



## Evaluation of DSSAT-CROPGRO-Canola Model to Simulate Growth and Yield of Two Canola (*Brassica napus* L.) Cultivars in Karaj

Gelareh Goodarzi<sup>1</sup>, Ahmad Ghanbari<sup>2\*</sup>, Saeid Soufizadeh<sup>3</sup>, Hamid Jabbari<sup>4</sup> and Ali Eskandari<sup>5</sup>

Received: 01-03-2021  
Revised: 30-08-2021  
Accepted: 31-08-2021  
Available Online: 31-08-2021

### How to cite this article:

Goodarzi, G., Ghanbari, A., soufizadeh, S., Jabbari, H., and Eskandari, A., 2023. Evaluation of DSSAT-CROPGRO-Canola model to simulate growth and yield of two canola (*Brassica napus* L.) cultivars in Karaj. Journal of Agroecology 15(1): 51-74.  
DOI: [10.22067/agry.2021.68623.1027](https://doi.org/10.22067/agry.2021.68623.1027)

### Introduction

Canola (*Brassica napus* L.) is known as the third most important oil crop in the world and is now cultivated over a large area of the world's farms in rotation with various crops, especially cereals (Reddy and Redi, 2003). Simulation models are a useful tool for predicting crop responses to different environments. The CSM-CROPGRO model (Jones et al., 2003) was integrated into the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) for simulating spring rapeseed (Saseendran et al., 2010). Due to limited studies on simulating the growth and yield of rapeseed in Iran, especially using DSSAT models, the purpose of this study was to calibrate and evaluate the DSSAT-CROPGRO-Canola model for simulating the growth and yield of two canola cultivars with different treatments of planting date and nitrogen in Karaj, Iran.

### Materials and Methods

A field experiment was performed as a split-plot factorial based on a randomized complete block design with three replications in 2017 and 2018. Two spring canola cultivars (Dalgan and Hyola-420) were planted under three levels of nitrogen (0, 70, and 210 kg.ha<sup>-1</sup>) on two planting dates (28 Feb and 19 Mar). Planting date was considered as the main factor, and cultivars and nitrogen levels were considered as sub-factors. Measured data during the growing season were leaf area index (LAI), total dry matter (TDM), yield and yield components, and dates of flowering and physiological maturity. Daily weather data, management events, and soil characteristics are imported to DSSAT. The first-year experimental data were used for calibration, and second-year data were used for model evaluation of developmental stages, LAI, TDM, and grain yield. The performance of the DSSAT-CROPGRO-Canola model during the calibration and evaluation was assessed using different statistics, root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE), Willmott's index (d), and coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of a 1:1 regression line.

### Results and Discussion

The results of evaluating phenological stages (anthesis day, first pod day, first seed day, and physiological maturity day) showed that the RMSE for the Dalgan cultivar was less than four days, and for the Hyola-420 cultivar, it was less than five days. This indicates that the model performed excellently in accurately simulating developmental stages. The model was able to simulate LAI up to the pod formation stage in different treatments.

1- Ph.D. Student of Crop Ecology, Department of Agroecology, Faculty of Agriculture, Zabol University, Zabol, Iran.

2- Professor, Department of Agroecology, Faculty of Agriculture, Zabol University, Zabol, Iran.

3- Assistant Professor, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4- Assistant Professor, Crop Physiology, Seed and Plant Improvement Institute (SPII) Department of Oilseeds. Karaj, Alborz Province, Iran.

5- Assistant Professor, Crop Physiology, Nuclear Agriculture Research Institute, Iran.

(\*- Corresponding author's Email: [ghanbari@uoz.ac.ir](mailto:ghanbari@uoz.ac.ir))

The nRMSE and d were 24.88% and 0.92 for the Dalgan cultivar and 22.72% and 0.95 for the Hyola-420 cultivar, respectively.

The model was also able to simulate the total dry matter at different planting dates as well as different levels of nitrogen fertilizer, and the values of nRMSE, d, and R2 for the Dalgan cultivar were 24.97%, 0.97 and 0.91\*\*. For the Hyola-420 cultivar, the values were 22.73%, 0.98, and 0.94\*\*. Additionally, the nRMSE, d, and R2 values for the number of grains per square meter were 14.97%, 0.98, and 0.91\*\* for the Dalgan cultivar and 15.37%, 0.98, and 0.90\*\* for the Hyola-420 cultivar, respectively.

The evaluation results for grain yield of canola cultivars showed that the RMSE was 395 and 265 kg.ha<sup>-1</sup>, d was 0.97, and R2 was 0.89\*\* and 0.91\*\* for Dalgan and Hyola-420 cultivars, respectively, confirming the high accuracy of the calibration. Therefore, this model can be used to evaluate the different effects of crop management and make decisions in canola cultivation systems. One of these decisions is to determine the best planting date for spring canola cultivars in the region. Based on the long-term model simulation of cultivars in different planting dates, it is recommended to plant spring canola up to 11 March in this region.

### **Conclusion**

The results of this study showed that the DSSAT-CROPGRO-Canola model had reliably good performance under different management and environmental conditions. CSM-CROPGRO-Canola model predicts grain yield responses to management and environmental conditions well and can now be employed for assessing the impacts of various agronomic management strategies and decisions making in canola production systems in Iran.

**Keywords:** Developmental stages, Genetic coefficients, Leaf area index, Modeling

## مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص ۷۴-۵۱

# ارزیابی مدل DSSAT-CROPGRO-Canola برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد دو رقم کلزا (*Brassica napus* L.) در منطقه کرج

گلاره گودرزی<sup>۱</sup>، احمد قنبری<sup>۲\*</sup>، سعید صوفی‌زاده<sup>۳</sup>، حمید جباری<sup>۴</sup> و علی اسکندری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

## چکیده

مدل‌سازی رشد و عملکرد کلزا یک روش مفید برای پیش‌بینی پاسخ کلزا (*Brassica napus* L.) به محیط‌های مختلف است. در این مطالعه، مدل CSM-CROPGRO-Canola در نرم‌افزار DSSAT v4.7 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد دو رقم کلزای بهاره (دلگان و هایولا ۴۲۰) در منطقه کرج بررسی شد. این مدل با استفاده از داده‌های گیاهی و خصوصیات خاک جمع‌آوری شده از آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت تیمارهای تاریخ کاشت و کود نیتروژن طی دو فصل رشد (۹۷-۱۳۹۵) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی مراحل فنولوژیکی (شروع گل‌دهی، شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک) نشان داد که برای رقم دلگان مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از چهار روز و برای رقم هایولا کمتر از پنج روز بود که نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی مراحل نمو بوده است. همچنین مدل به خوبی توانست در تاریخ‌های مختلف کاشت و همچنین سطوح مختلف کود نیتروژن، ماده خشک کل را شبیه‌سازی کند. نتایج اعتبارسنجی عملکرد دانه ارقام کلزا نیز نشان داد که مقدار RMSE ۳۹۵ و ۲۶۵ کیلوگرم در هکتار،  $d$  ۰/۹۷ و  $R^2$  برابر با  $0/۸۹^{**}$  و  $0/۹۱^{**}$  به ترتیب برای رقم دلگان و هایولا ۴۲۰ بود که نشان از دقت بالای مدل و انسجی مناسب آن می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی کلزا با استفاده از مدل CSM-CROPGRO-Canola رضایت‌بخش بوده است و نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی مراحل نمو و صفات مربوط به رشد و عملکرد ارقام کلزا می‌باشد. بدین ترتیب این مدل می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت کلزا مورد استفاده قرار گیرد. یکی از این تصمیم‌گیری‌ها تعیین بهترین تاریخ کاشت کلزای بهاره در منطقه است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه ارقام در تاریخ کاشت‌های مختلف با داده‌های بلندمدت، توصیه می‌شود، عملیات کاشت کلزای بهاره در این منطقه حداکثر تا ۲۰ اسفند انجام شود.

## واژه‌های کلیدی: شاخص سطح برگ، ضرایب ژنتیکی، مدل‌سازی، مراحل نمو

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، ایران.

۲- استاد گروه اکولوژی دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۳- استادیار دانشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

۴- استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات و تهیه نهال و بذر، کرج، ایران.

۵- استادیار پژوهشگاه انرژی اتمی - پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، ایران.

\*- نویسنده مسئول: (Email: ghanbari@uoz.ac.ir)

## مقدمه

ایران تا حد زیادی به دانه‌های روغنی وارداتی وابسته است تا بیش از ۱/۵ میلیون تن از مصرف روغن نباتی سالانه خود را تأمین کند (Negareh, 2011). در حال حاضر، نزدیک به ۸۰ درصد روغن نباتی مورد نیاز به صورت دانه روغنی وارد می‌شود (Bakhshi et al., 2021). در حال حاضر دو دهه، یکی از سیاست‌های اصلی غذایی دولت، خودکفایی در دانه‌های روغنی بود. از این میان کانولا به عنوان روغنی که به محصول رسیده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کلزا (*Brassica napus* L.) به عنوان سومین گیاه روغنی مهم دنیا شناخته شده است و به دلیل خصوصیتی مانند مقاومت به کم آبی، شوری و سرما، ارزش تناوبی زیاد، مقاومت نسبی به بافت خاک و قابلیت بالا برای رقابت با علف‌های هرز هم اکنون در سطح وسیعی از مزارع جهان در تناوب با محصولات مختلف به ویژه غلات کشت می‌شود (Reddy & Redi, 2003). عملکرد دانه کلزا از دهه ۱۹۷۰ دو برابر شده است (FAOSTAT, 2019) و با افزایش تقاضا برای انرژی تجدیدپذیر و مصرف رژیم غذایی، انتظار می‌رود تولید افزایش یابد. ارزش غذایی این محصول و سازگاری آن با اقلیم‌های مختلف باعث شده است تا این گیاه در اکثر نقاط کشور کشت شود (Zomorodian et al., 2010).

ارزیابی پاسخ کلزا به تغییرات آب و هوا و شیوه‌های مدیریت از طریق آزمایش‌های واقعی می‌تواند بسیار گران باشد. از طرف دیگر، مدل‌های رشد محصول با ادغام عوامل محیطی و شیوه‌های مدیریت محصول، عملکرد را شبیه‌سازی می‌کنند و از این رو، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی پاسخ محصولات به شرایط مختلف آب و هوایی و شیوه‌های مدیریت محصول هستند (RaesGeerts & Raes, 2009; et al., 2009; Boogaard et al., 1988; Van Dam et al., 1997). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به طور گسترده‌ای برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در تجزیه و تحلیل نظام‌های کشت، ارزیابی اثرات اقلیمی و ارزیابی روش‌های مدیریت محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند (Jones et al., 2003). این مدل‌ها می‌توانند برهم‌کنش‌های پیچیده خصوصیات خاک، شرایط اقلیمی، شیوه‌های مدیریت و ویژگی‌های ژنتیکی محصول را ادغام کنند که باعث درک بهتر از برهم‌کنش‌های پیچیده بین عوامل مؤثر بر رشد و نمو گیاهان می‌شوند (Kassie et al., 2016). یکی از جنبه‌های اصلی مدل‌های

شبیه‌سازی محصول، امکان استفاده آن‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی است، به شرطی که مدل مورد نظر در دامنه‌ی وسیعی از شرایط مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته باشد (Kassie et al., 2016).

در مقایسه با غلات، تنها چند مدل محصول برای کلزا ساخته شده است. مدل APSIM-Canola برای شبیه‌سازی کلزا در محیط‌های دیم استرالیا (Robertson et al., 1999) و مدل CSM-CROPGRO (Jones et al., 2003; Boote et al., 1998)؛ در سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری زیستی (DSSAT) برای شبیه‌سازی کلزای بهاره (Saseendran et al., 2010) تهیه شده است. سازگاری کامل‌تری برای کلزای پاییزه در شرایط مدیترانه‌ای توسط دلیگیوس و همکاران (Deligios et al., 2013) انجام شد و در DSSAT نسخه ۴/۷ ادغام شده است (Hoogenboom et al., 2017). DSSAT شامل زیرمدل‌هایی برای رشد و نمو محصول، بیلان آب خاک، عناصر غذایی و پویایی مواد آلی، مدیریت داده‌ها و یک موتور مرکزی است که فرآیندهای شبیه‌سازی را کنترل می‌کند و به عنوان یک ابزار پژوهش، می‌توان توصیه‌هایی در ارتباط با مدیریت محصول و بررسی مسائل زیست محیطی و پایداری را از آن استخراج کرد. این بسته شامل سیستم‌های مدیریت پایگاه داده‌ها برای خاک، داده‌های هواشناسی، ضرایب ژنتیکی و ورودی مدیریت، مدل‌های شبیه‌سازی محصول، مجموعه‌ای از ابزار و برنامه‌های اقلیمی و برنامه ارزیابی استراتژی برای ارزیابی گزینه‌ها از جمله انتخاب ارقام، تاریخ کاشت، تراکم، فاصله ردیف، نوع خاک، آبیاری، کود، تنش آبی در مراحل رویشی و زایشی می‌باشد (Fallah et al., 2021). در واقع، DSSAT ابزاری بسیار مفید برای کاهش قابل ملاحظه زمان و هزینه در آزمایشات مزرعه‌ای برای ارزیابی مناسب ارقام جدید و نظام‌های مدیریتی جدید است (Oteng-Darko et al., 2013; Bannayan et al., 2003).

مدل CROPGRO فرآیندهایی مانند نمو رویشی و زایشی را شبیه‌سازی می‌کند که براساس آن طول دوره رشد گیاه، طول دوره رشد ریشه و برگ، شروع و طول دوره رشد اندام‌های زایشی مانند غلاف و دانه‌ها را تعیین می‌کند (Boote et al., 2002). در مدل CROPGRO خصوصیات گونه، اکوتیپ و رقم در فایل‌های جداگانه

تعریف شده که برای شبیه‌سازی محصولات خاص استفاده می‌شود و به راحتی می‌توان بدون ایجاد تغییر در کد برنامه، صرفاً با تغییر در پارامترهای موجود در این فایل‌ها این مدل را برای شبیه‌سازی محصولات جدید سازگار کرد (Jones et al., 2003). فرض بر این است که بیشتر این فرآیندها در سیستم گیاه - خاک در بین گونه‌ها ثابت مانده و بنابراین، کمبود مطالعات مربوط به فرآیندهای خاص برای یک محصول خاص برای مدل‌سازی مانعی برای توسعه مدلی برای آن محصول نباشد. در نتیجه، مدل CROPGRO برای شبیه‌سازی محصولاتی از قبیل کلزا (*Brassica napus* L.)، سویا (*Glycine max*)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*)، لویبا (*Phaseolus vulgaris*)، نخود (*Cicer arietinum*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و گیاهان برآکیاریا (*Brachiaria* sp.) با موفقیت سازگار شده است (Jones et al., 2003).

تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص گیاه کلزا با استفاده از این مدل‌ها انجام شده است. مدل CSM-CROPGRO-Canola برای کلزای بهاره در شرق کانادا برای پیش‌بینی عملکرد و مراحل نمو مورد بررسی قرار گرفت (Jing et al., 2016). نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای کالیبره شده مراحل رشد و عملکرد کلزای بهاری را به خوبی شبیه‌سازی کرده و نیاز به برنامه‌های کاربردی، مانند شبیه‌سازی پاسخ کلزا بهاره به حالات اقلیمی آینده را برآورده می‌کند. هونار و همکاران (Honar et al., 2011) مدل CropSyst را برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا واسنجی کردند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق بالایی با نتایج مزرعه‌ای داشتند. مجرد و همکاران (Mojarrad et al., 2014) در تحقیقی به بررسی نقش عوامل آب و هوایی در تعیین تاریخ کشت و طول دوره رشد کلزا با استفاده از مدل CropSyst پرداختند. نتایج این محققان بر اساس مدل CropSyst بیانگر اعتماد به این مدل جهت ارائه نتایج قابل قبول بود. جیلاردلی و همکاران (Gilardelli et al., 2016) نیز با واسنجی و صحت‌سنجی مدل WOFOST به این نتیجه رسیدند که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا داشت. در تحقیقی از داده‌های برداشت شده یک مزرعه کلزا در دهلران برای واسنجی مدل AquaCrop استفاده کردند (Arvaneh et al., 2011). پس از واسنجی، این محققان به شبیه‌سازی عملکرد کلزا با استفاده از این مدل پرداختند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج مزرعه‌ای داشت. راهبان و همکاران (Rahban et al., 2021) با هدف شبیه‌سازی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کلزا در سطح کشور، مدل SSM-iCrop را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که شبیه‌سازی رشد کلزا با استفاده از مدل SSM-iCrop رضایت‌بخش بوده است و نتایج حاکی از برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی عملکرد کلزا در ایران می‌باشد. زلک و همکاران (Zelege et al., 2011) و موسوی‌زاده و همکاران (Mousavizadeh et al., 2016) نیز با واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای محصول کلزا گزارش کردند که این مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا داشت. نتایج واسنجی مدل APSIM برای شبیه‌سازی عملکرد و مراحل نمو کلزا در استان چهارمحال و بختیاری نشان داده است که مقدار nRMSE برای مراحل نمو کمتر از دو درصد و برای عملکرد ۷/۲ درصد بوده است (Heidarybeni et al., 2018). همچنین مطالعه دیگری شبیه‌سازی عملکرد کلزا با استفاده از مدل WOFOST انجام شد که مقدار nRMSE برای عملکرد دانه کلزا نه درصد و برای عملکرد بیولوژیک ۶/۷ درصد مشاهده شد (Farhangfar et al., 2017).

ابراهیمی پاک و همکاران (Ebrahimipak et al., 2019) در پژوهشی به منظور ارزیابی سه مدل گیاهی AquaCrop، WOFOST و CropSyst با استفاده از داده‌های دو سال زراعی ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد قزوین گزارش کردند که متوسط اختلاف مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst به ترتیب ۱۰/۲، ۱۲/۱ و ۱۲/۶ درصد بود. با توجه به مطالعات اندک شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا در ایران به خصوص مدل‌های DSSAT، هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی مدل DSSAT-CROPGRO-Canola برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد دو رقم کلزا در منطقه کرج با تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و نیتروژن بود.

## مواد و روش‌ها

### آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای در دو سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج واقع در جاده قدیم کرج- قزوین انجام شد. خصوصیات خاک محل آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین میانگین دمای ماهیانه حداقل

تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص گیاه کلزا با استفاده از این مدل‌ها انجام شده است. مدل CSM-CROPGRO-Canola برای کلزای بهاره در شرق کانادا برای پیش‌بینی عملکرد و مراحل نمو مورد بررسی قرار گرفت (Jing et al., 2016). نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای کالیبره شده مراحل رشد و عملکرد کلزای بهاری را به خوبی شبیه‌سازی کرده و نیاز به برنامه‌های کاربردی، مانند شبیه‌سازی پاسخ کلزا بهاره به حالات اقلیمی آینده را برآورده می‌کند. هونار و همکاران (Honar et al., 2011) مدل CropSyst را برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا واسنجی کردند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق بالایی با نتایج مزرعه‌ای داشتند. مجرد و همکاران (Mojarrad et al., 2014) در تحقیقی به بررسی نقش عوامل آب و هوایی در تعیین تاریخ کشت و طول دوره رشد کلزا با استفاده از مدل CropSyst پرداختند. نتایج این محققان بر اساس مدل CropSyst بیانگر اعتماد به این مدل جهت ارائه نتایج قابل قبول بود. جیلاردلی و همکاران (Gilardelli et al., 2016) نیز با واسنجی و صحت‌سنجی مدل WOFOST به این نتیجه رسیدند که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا داشت. در تحقیقی از داده‌های برداشت شده یک مزرعه کلزا در دهلران برای واسنجی مدل AquaCrop استفاده کردند (Arvaneh et al., 2011). پس از واسنجی، این محققان به شبیه‌سازی عملکرد کلزا با استفاده از این مدل پرداختند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج مزرعه‌ای داشت. راهبان و همکاران (Rahban et al., 2021) با هدف شبیه‌سازی محصولات خاص استفاده می‌شود و به راحتی می‌توان بدون ایجاد تغییر در کد برنامه، صرفاً با تغییر در پارامترهای موجود در این فایل‌ها این مدل را برای شبیه‌سازی محصولات جدید سازگار کرد (Jones et al., 2003). فرض بر این است که بیشتر این فرآیندها در سیستم گیاه - خاک در بین گونه‌ها ثابت مانده و بنابراین، کمبود مطالعات مربوط به فرآیندهای خاص برای یک محصول خاص برای مدل‌سازی مانعی برای توسعه مدلی برای آن محصول نباشد. در نتیجه، مدل CROPGRO برای شبیه‌سازی محصولاتی از قبیل کلزا (*Brassica napus* L.)، سویا (*Glycine max*)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*)، لویبا (*Phaseolus vulgaris*)، نخود (*Cicer arietinum*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و گیاهان برآکیاریا (*Brachiaria* sp.) با موفقیت سازگار شده است (Jones et al., 2003).

تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص گیاه کلزا با استفاده از این مدل‌ها انجام شده است. مدل CSM-CROPGRO-Canola برای کلزای بهاره در شرق کانادا برای پیش‌بینی عملکرد و مراحل نمو مورد بررسی قرار گرفت (Jing et al., 2016). نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای کالیبره شده مراحل رشد و عملکرد کلزای بهاری را به خوبی شبیه‌سازی کرده و نیاز به برنامه‌های کاربردی، مانند شبیه‌سازی پاسخ کلزا بهاره به حالات اقلیمی آینده را برآورده می‌کند. هونار و همکاران (Honar et al., 2011) مدل CropSyst را برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا واسنجی کردند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق بالایی با نتایج مزرعه‌ای داشتند. مجرد و همکاران (Mojarrad et al., 2014) در تحقیقی به بررسی نقش عوامل آب و هوایی در تعیین تاریخ کشت و طول دوره رشد کلزا با استفاده از مدل CropSyst پرداختند. نتایج این محققان بر اساس مدل CropSyst بیانگر اعتماد به این مدل جهت ارائه نتایج قابل قبول بود. جیلاردلی و همکاران (Gilardelli et al., 2016) نیز با واسنجی و صحت‌سنجی مدل WOFOST به این نتیجه رسیدند که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا داشت. در تحقیقی از داده‌های برداشت شده یک مزرعه کلزا در دهلران برای واسنجی مدل AquaCrop استفاده کردند (Arvaneh et al., 2011). پس از واسنجی، این محققان به شبیه‌سازی عملکرد کلزا با استفاده از این مدل پرداختند و نشان دادند که نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج مزرعه‌ای داشت. راهبان و همکاران (Rahban et al., 2021) با هدف شبیه‌سازی محصولات خاص استفاده می‌شود و به راحتی می‌توان بدون ایجاد تغییر در کد برنامه، صرفاً با تغییر در پارامترهای موجود در این فایل‌ها این مدل را برای شبیه‌سازی محصولات جدید سازگار کرد (Jones et al., 2003). فرض بر این است که بیشتر این فرآیندها در سیستم گیاه - خاک در بین گونه‌ها ثابت مانده و بنابراین، کمبود مطالعات مربوط به فرآیندهای خاص برای یک محصول خاص برای مدل‌سازی مانعی برای توسعه مدلی برای آن محصول نباشد. در نتیجه، مدل CROPGRO برای شبیه‌سازی محصولاتی از قبیل کلزا (*Brassica napus* L.)، سویا (*Glycine max*)، بادام زمینی (*Arachis hypogaea*)، لویبا (*Phaseolus vulgaris*)، نخود (*Cicer arietinum*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و گیاهان برآکیاریا (*Brachiaria* sp.) با موفقیت سازگار شده است (Jones et al., 2003).

کاشت به‌عنوان عامل اصلی و رقم و سطوح نیتروژن به‌عنوان عوامل فرعی در نظر گرفته شد. عملیات کشت بذر به‌صورت دستی با عمق کشت ۲-۲/۵ سانتی متر و به‌صورت سه عدد بذر در هر گودال کشت شد. عملیات تنک و مبارزه با علف‌های هرز برای هر یک از تیمارهای آزمایشی به‌صورت یکسان و جداگانه انجام شد.

و حداکثر و بارش ماهیانه دوره کاشت تا برداشت کلزا در هر دو سال در جدول ۲ نشان داده شده است.

آزمایش به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار به اجرا در آمد. دو رقم کلزای بهاره (دلگان و هایولا ۴۲۰) در دو تاریخ کاشت (۹ و ۲۹ اسفند) تحت سه سطح نیتروژن (صفر، ۷۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) کاشته شد. تاریخ

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آزمایش در سال مختلف  
Table 1- Physical and chemical properties of soil at two different years

سال Year	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point	نقطه ظرفیت زرعی Field capacity	رطوبت اشباع Saturation	وزن	کربن آلی Organic C (%)	اسیدیته pH
							مخصوص ظاهری Bulk density (g.cm <sup>-3</sup> )		
2017	14.3	24.1	61.6	0.128	0.244	0.439	1.40	1.13	7.8
2018	15.6	22.2	62.2	0.131	0.240	0.430	1.42	1.02	7.7

جدول ۲- میانگین ماهانه دما و بارش در طول دوره رشد کلزا برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸  
Table 2- Monthly mean temperatures and accumulated precipitation during the canola growing season, February to July 2017-2018

ماه Month	دمای حداقل		دمای حداکثر		بارش	
	Tmin (°C)		Tmax (°C)		Precipitation (mm)	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018
Feb.	-5.2	-0.2	5.4	10.1	80.8	51.9
Mar.	1.2	5.0	12.0	18.8	51.8	14.5
Apr.	6.2	5.5	19.0	18.7	51.4	46.2
May.	12.3	10.7	26.8	23.7	20.2	34.9
Jun.	15.9	16.6	32.4	32.4	4.9	13.8
Jul.	19.9	21.4	34.7	37.3	3.9	5.8

هزارم گرم توزین و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. تجزیه‌های آماری و ترسیم گراف‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و Excel صورت پذیرفت.

#### شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا توصیف مدل

مدل CROPGRO یک مدل محصول معمولی است که با استفاده از پارامترهای فتوسنتز سطح برگ و محاسبات جذب نور، فتوسنتز کنوپی را به‌صورت روزانه محاسبه می‌کند. مدل CROPGRO به‌عنوان یک رویکرد عمومی برای مدل‌سازی محصولات زراعی به این مفهوم که دارای یک کد منبع مشترک است، توسعه یافته است، اما می‌تواند رشد تعدادی از محصولات

داده‌های گیاهی که در طول دوره رشد اندازه‌گیری شدند عبارت از سطح برگ، ماده خشک کل، عملکرد و اجزای عملکرد، تاریخ‌های گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک بود. نمونه‌برداری‌های تخریبی در طول دوره رشد گیاه از زمان سبز شدن تا برداشت صورت پذیرفت. برای تعیین اجزای عملکرد از هر کرت ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و متوسط تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف محاسبه گردید. برای محاسبه وزن هزاردانه، هشت نمونه ۱۰۰ تایی از دانه‌های هر کرت آزمایشی به‌طور تصادفی انتخاب و با ضرب کردن میانگین وزن آن‌ها در عدد ۱۰ وزن هزاردانه محاسبه شد. برای تعیین عملکرد دانه از ردیف‌های میانی هر کرت با رعایت حاشیه، برداشت صورت گرفت و در نهایت، عملکرد دانه محاسبه شد. به این صورت که پس از آنکه رطوبت دانه‌ها به ۱۰ درصد رسید، وزن دانه‌ها با ترازوی یک

در ارتباط با هر مرحله کالیبراسیون، یک مقایسه گرافیکی بصری انجام شد و RMSE بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده محاسبه شد و پارامترهای بهینه با کمترین RMSE به دست آمد. شاخص‌های آماری که برای مقایسه نتایج داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل با داده‌های واقعی مورد استفاده قرار گرفت شامل RMSE، جذر میانگین خطای نرمال شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تشخیص ( $R^2$ ) بود. از RMSE جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شد. 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 می‌شود (Yang et al., 2014). همچنین 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 را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982). مقادیر پارامترهای کالیبره شده در جدول ۳ آمده است. داده‌های مستقل از آزمایش سال دوم برای ارزیابی مدل کالیبره شده استفاده شد.

برازش رگرسیونی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ از جمله رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های اعتبار مدل‌هاست (Nassiri Mahallati, 2000). مدل در صورتی از دقت کافی در پیش‌بینی مشاهدات برخوردار خواهد بود که خط رگرسیون دارای شیبی برابر یک بوده و بر خط ۱:۱ ( $y=x$ ) منطبق باشد. برای این منظور معادله خط رگرسیونی برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده که معادله آن در زیر آمده است با خط ۱:۱ از طریق آزمون t مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$\text{Predicted} = a + (b \times \text{Observed}) \quad (1)$$

که در آن،  $b=1$  به‌عنوان فرض صفر ( $H_0$ ) و  $b \neq 1$  به‌عنوان فرض یک ( $H_1$ ) در آزمون t در نظر گرفته شد. همچنین برای ارزیابی عرض از مبدأ دو خط،  $a=0$  به‌عنوان فرض صفر ( $H_0$ ) و  $a \neq 0$  به‌عنوان فرض یک ( $H_1$ ) در آزمون t مدنظر قرار گرفت. اگر فرض صفر رد نشود، به این معنی است که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده معنی‌دار نیست و فرض یک نیز عکس این موضوع را نشان می‌دهد.

مختلف را پیش‌بینی کند. این مدل برای شبیه‌سازی بیش از ۱۰ محصول از جمله حبوبات، محصولات دانه روغنی، سبزیجات و علوفه‌ای با موفقیت سازگار شده است و در بسته DSSAT ادغام شده است (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2017).

#### داده‌های ورودی مدل

داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی، تشعشع (محاسبه شده با استفاده از تعداد ساعات آفتابی)، رطوبت نسبی و سرعت باد آماده شد و توسط ابزار WeatherMan نرم‌افزار 4.7 DSSAT، فایل داده‌های هواشناسی ساخته شد. همچنین فایل خصوصیات خاک هر سال آزمایش از قبیل بافت خاک، ظرفیت نگهداری آب، میزان ماده آلی و اسیدیته خاک توسط ابزار SBuild ساخته و به DSSAT معرفی شد.

#### ارزیابی مدل

از داده‌های آزمایشی سال اول برای واسنجی مدل برای مراحل نمو، LAI، زیست‌توده و عملکرد دانه استفاده شد. در این مطالعه، برآورد پارامترهای مدل بر اساس سعی و خطا و با توجه به مفهوم و تعریف هر پارامتر در محدوده معقول آن‌ها و همچنین با استفاده از ابزار Sensitivity نرم‌افزار DSSAT برای رسیدن به حداقل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. یک روش سیستماتیک برای واسنجی اکثر مدل‌های رشد محصولات ارائه شده و آن بدین صورت است که ابتدا بایستی تاریخ گل‌دهی و تاریخ رسیدگی و سپس تجمع ماده خشک و شاخص سطح برگ و در نهایت اجزای عملکرد و عملکرد دانه مورد واسنجی قرار گیرد (Hoogenboom et al., 1999). پارامترهای تعیین‌کننده زمان ظهور گل به تدریج در حدود مقدار پیش فرض کاهش یا افزایش یافت تا تاریخ گل‌دهی شبیه‌سازی شده با مقدار اندازه‌گیری شده مطابقت پیدا کرد. کار مشابهی با سایر پارامترهای تعیین‌کننده مراحل نمو محصول انجام شد. پس از کالیبره شدن پارامترهای نمو محصول، پارامترهای تعیین‌کننده سطح برگ کالیبره شدند. به‌طور مشابه، سطح ویژه برگ در اطراف مقادیر پیش فرض تنظیم شد تا LAI شبیه‌سازی شده با LAI مشاهده شده در طول فصل رشد محصول مطابقت داشته باشد. پس از آن، سایر پارامترها به همان روش برای زیست‌توده و عملکرد دانه کالیبره شدند.

جدول ۳- ضرایب ژنتیکی پیش فرض و کالیبره شده مدل CROPGRO-Canola برای دو رقم کلزا

Table 3- The calibrated genetic coefficients in the CROPGRO-Canola model with their default values and calibrated values for two canola cultivars

پارامتر Parameter	تعریف Definition	پیش فرض Default†	دلگان Dalgan	هایولا ۴۲۰ Hyola-420
PP-SEN	شیب پاسخ نسبی نمو در مقابل دوره نوری Slope of the relative response of development vs. photoperiod (1/h)	-0.011	-0.021	-0.009
EM-FL	زمان بین جوانه و ظهور گل Time between emergence and flower appearance (PD‡)	28.5	21.0	25.5
FL-SH	زمان بین اولین گل و غلاف دهی Time between first flower and beginning pod (PD)	13	10	11
FL-SD	زمان بین اولین گل و دانه بستن Time between first flower and beginning seed (PD)	19.0	14.5	17.5
SD-PM	زمان بین دانه بستن و رسیدگی فیزیولوژیکی Time between beginning seed and physiological maturity (PD)	26.5	30.5	25.5
FL-LF	زمان بین دانه بستن و پایان توسعه برگ Time between beginning seed and end of leaf expansion (PD)	3	3	3
LFMAX	حداکثر میزان فتوسنتز برگ Maximum leaf photosynthetic rate (mg CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	1.28	1.13	1.00
SLAVR	سطح برگ ویژه رقم در شرایط رشد استاندارد Specific leaf area of cultivar under standard growth conditions (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	330	350	340
SIZLF	حداکثر اندازه برگ کامل Maximum size of full leaf (cm <sup>2</sup> )	100	100	110
XFRT	حداکثر کسری از رشد روزانه که به پوسته بذر تخصیص داده می شود Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed-shell	1.00	1.00	1.00
WTPSD	حداکثر وزن تک دانه Maximum weight per seed (g)	0.003	0.003	0.003
SFDUR	مدت زمان پر شدن بذر برای غلاف در شرایط استاندارد Seed filling duration for pod cohort under standard conditions (PD)	20	25	25
SDPDV	بذر در هر غلاف در شرایط استاندارد Seeds per pod at standard growth conditions (no.pod-1)	22	18	18
PODDUR	مدت زمان افزودن غلاف در شرایط استاندارد Duration of pod addition under standard conditions (PD)	10	10	10
THRSH	درصد دانه خالص [دانه + پوسته]-۱ Threshing percentage [seed (seed + shell)-1]	81	81	81
SDPRO	درصد پروتئین در دانه Fraction protein in seeds (g. g <sup>-1</sup> )	0.23	0.23	0.23
SDLIP	درصد روغن در دانه Fraction oil in seeds (g.g-1)	0.480	0.403	0.417

روز فتوترمال

‡ Photothermal day

## نتایج و بحث

### واسنجی مدل

نتایج برآورد ضرایب ژنتیکی برای ارقام دلگان و هایولا در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج واسنجی مدل براساس مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده با استفاده از شاخص های آماری RMSE، nRMSE و D-index و R<sup>2</sup> انجام شد (جدول ۴). نتایج حاصل از

شبیه سازی مراحل فنولوژیکی (شروع گل دهی، شروع خورجین دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک) نشان داد که برای رقم- های دلگان و هایولا، مدل DSSAT با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه سازی نموده است (شکل ۱). برای روز تا گل دهی مقدار RMSE ۲/۳۱ و ۲/۶۸ روز به ترتیب برای ارقام دگان و هایولا به دست آمد که این معیار آماری نشان دهنده توانایی عالی مدل در شبیه سازی روز تا



**شاخص سطح برگ**

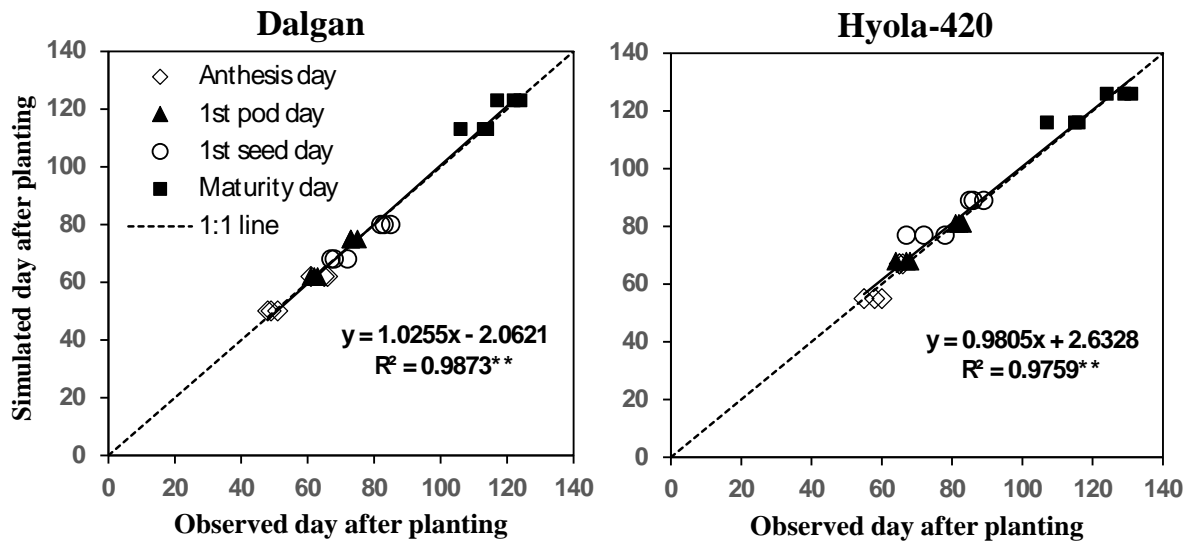
با تغییر پارامترهای SIZLF و SLAVR سعی شد تا مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ به نقاط اندازه‌گیری شده نزدیک شده و حداقل RMSE و شاخص‌های آماری مطلوبی به‌دست آید (جدول ۲). شکل ۲ روند شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در مقابل نقاط مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. این مدل توانست LAI را تا مرحله تشکیل خورجین در تیمارهای مختلف شبیه‌سازی کند.

گل‌دهی بوده است. مدل در شبیه‌سازی شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک نیز موفق بوده است، به‌طوری‌که برای رقم دلگان RMSE کمتر از چهار روز و برای رقم هایولا کمتر از پنج روز بود. همچنین سایر شاخص‌های آماری نیز دقت و اسنجی مراحل نمو را تأیید می‌کنند (جدول ۴). همچنین نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ برای مراحل نمو ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

جدول ۴- نتایج واسنجی مدل برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک، عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک کل و شاخص سطح برگ دو رقم کلزا  
Table 4- Results of model calibration to simulate phenological stages, grain yield, total dry matter, and leaf area index of two canola cultivars

صفات Variable	n	دلگان Dalgan				هایولا ۴۲۰ Hyola-420			
		مجذور میانگین	مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده	d	R <sup>2</sup> (1:1)	مجذور میانگین	مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده	d	R <sup>2</sup> (1:1)
		مربعات خطا RMSE	nRMSE (%)			مربعات خطا RMSE	nRMSE (%)		
شروع گل‌دهی Anthesis day	6	2.31	4.05	0.97	0.94**	2.68	4.32	0.93	0.87**
شروع خورجین‌دهی 1 <sup>st</sup> pod day	6	1.29	1.90	0.99	0.98**	1.91	2.59	0.98	0.97**
شروع تشکیل دانه 1 <sup>st</sup> seed day	6	3.03	3.98	0.95	0.94**	5.02	6.27	0.87	0.82**
رسیدگی فیزیولوژیک Maturity day	6	3.83	3.30	0.87	0.70**	4.47	3.73	0.88	0.82**
شاخص سطح برگ* LAI	42	0.34	26.95	0.93	0.77**	0.50	32.22	0.93	0.75**
ماده خشک کل Total dry matter (kg.ha <sup>-1</sup> )	57	1086	19.43	0.98	0.92**	1224	25.59	0.97	0.95**
تعداد دانه در مترمربع Number of seed (#/m <sup>2</sup> )	6	5980	9.85	0.99	0.97**	14130	34.33	0.89	0.80**
عملکرد دانه Seed yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	6	140	8.61	0.99	0.97**	241	23.37	0.95	0.88**

\*: شاخص سطح برگ از ابتدای دوره رشد تا مرحله خورجین‌دهی (هفت مرحله)  
\*: LAI from the beginning to the pod formation (7 stages)



شکل ۱- شروع گل‌دهی، شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵

Fig. 1- Anthesis day, 1<sup>st</sup> pod day, 1<sup>st</sup> seed day, and physiological maturity day: simulated values vs. observed values. Dalgan (left) and Hyola-420 (right) cultivars in 2017

تعداد نقاط در هر مرحله شش عدد که مربوط به سه سطح کود در دو تاریخ کاشت می‌باشند. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

The number of points in each stage is 6, which are related to the three levels of fertilizer on two different planting dates. The fitted regression line for observed vs. predicted data (solid line) is compared with the 1:1 line (dotted line).

جدول ۵- نتایج آزمون t برای مقایسه شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده با داده‌های مرحله واسنجی

Table 5- Results of the t-test for comparing slope (b) and intercept (a) of the 1:1 line against the fitted linear regression by calibration data

صفات Variable	پارامتر Parameter	مقدار Value	خطای استاندارد Standard error	t	فرض صفر H0
<b>مراحل نمو Phenological stages</b>					
دلگان Dalgan	عرض از مبدأ Intercept (a)	-2.062	2.043	1.009	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	1.026	0.025	1.031	قبول Accepted
هایولا ۴۲۰ Hyola-420	عرض از مبدأ Intercept (a)	2.633	2.858	0.921	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	0.981	0.033	0.593	قبول Accepted
تعداد دانه Seed numbers	عرض از مبدأ Intercept (a)	-1274	7486	0.170	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	1.064	0.132	0.490	قبول Accepted
عملکرد دانه Seed yield	عرض از مبدأ Intercept (a)	26.91	125.2	0.215	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	1.005	0.082	0.059	قبول Accepted
شاخص سطح برگ* LAI	عرض از مبدأ Intercept (a)	0.084	0.092	0.911	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	0.900	0.056	1.770	قبول Accepted

\*: داده‌ها مربوط به شاخص سطح برگ از ابتدای دوره رشد تا مرحله خورجین‌دهی (هفت مرحله) بوده است.

\*: LAI data is from the beginning of growth to the pod formation (7 stages).

### ماده خشک کل

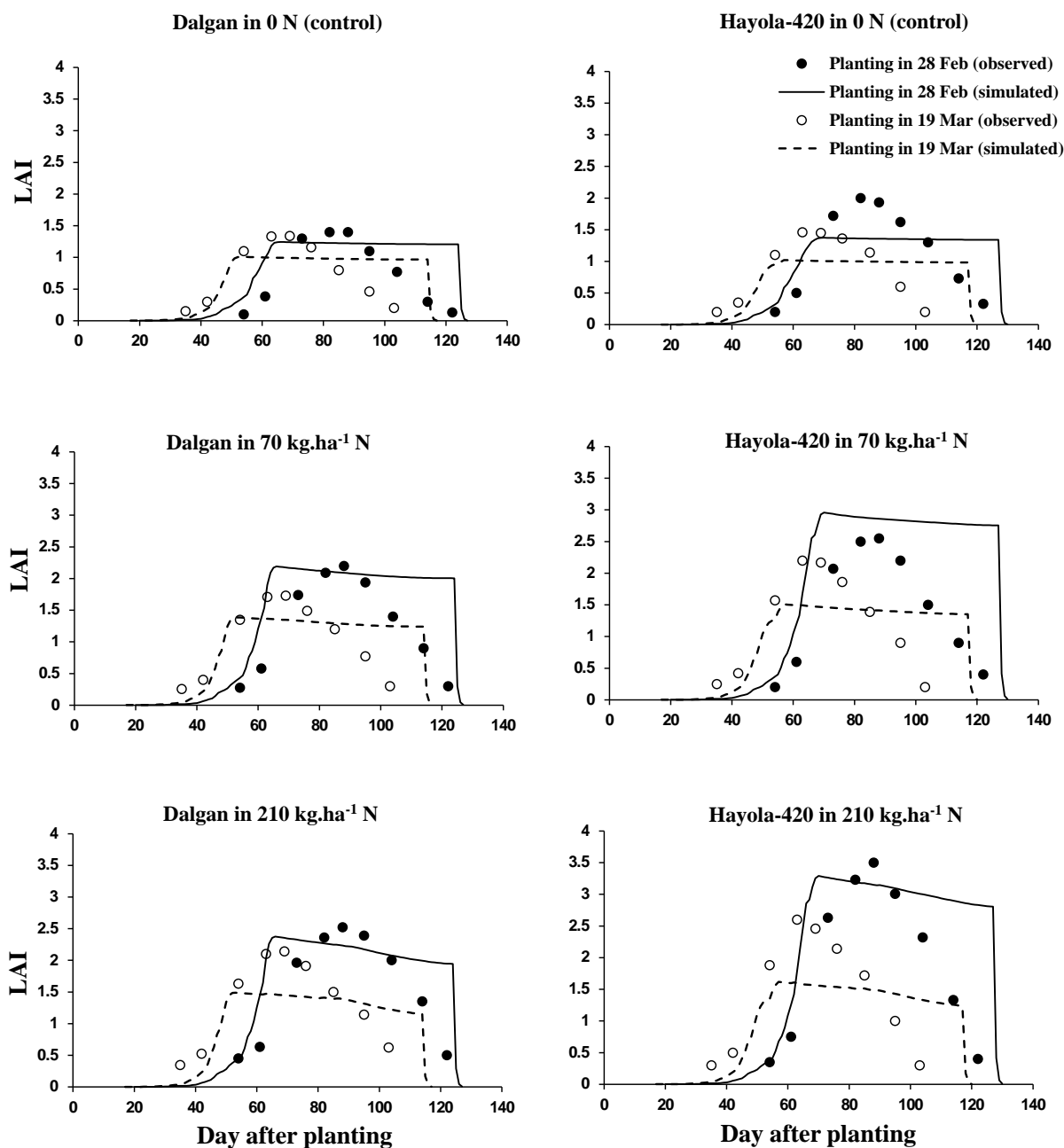
پس از کالیبره شدن مدل برای پارامترهای مربوط به مراحل نمو و LAI، پارامترهای مربوط به ماده خشک کل کالیبره شدند تا فاصله بین زیست توده شبیه سازی شده و اندازه گیری شده به حداقل برسد (شکل ۳). معیارهای ارزیابی مدل (جدول ۲) شبیه سازی قابل قبول مدل با توجه به روند تجمع زیست توده کلزا را نشان داده است. شبیه سازی ماده خشک کل با nRMSE بسیار کمتری (۱۹/۴۳ درصد برای رقم دلگان و ۲۵/۵۹ درصد برای رقم هایولا ۴۲۰) نسبت به مطالعه (Deligios et al., 2013) داشت که nRMSE را ۴۱ درصد گزارش کرده است. بنابراین، نتایج نشان دهنده موفقیت مدل در شبیه سازی ماده خشک کل است (جدول ۲).

### تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه

پارامترهای مربوط به مدت زمان پرشدن بذر (SFDUR) و تعداد دانه در غلاف (SDPDV) نسبت به مقادیر پیش فرض مدل تغییر کردند تا تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه شبیه سازی شده به مقادیر اندازه گیری شده آزمایش سال اول به عنوان داده های کالیبراسیون نزدیک شوند (جدول ۱). در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و کود نیتروژن، تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه شبیه سازی شده نزدیک به مقدار اندازه گیری شده بود (شکل ۴). در رقم دلگان تیمارهای بدون کود، تعداد دانه در مترمربع شبیه سازی شده کمتر برآورد شد و همچنین مدل در تیمارهای کودی ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار رقم هایولا ۴۲۰ تعداد دانه در مترمربع بیش برآورد کرد (شکل ۴). معیارهای ارزیابی مدل برای عملکرد دانه نشان داد که RMSE، nRMSE، d و R<sup>2</sup> برای رقم دلگان به ترتیب ۱۴۰ کیلوگرم در هکتار، ۸/۶۱ درصد، ۰/۹۹ و ۰/۹۷\*\* و برای رقم هایولا ۴۲۰ به ترتیب ۲۴۱ کیلوگرم در هکتار، ۲۳/۳۷ درصد، ۰/۹۵ و ۰/۸۸\*\* بود که نشان دهنده دقت بالای واسنجی مدل است (جدول ۲). این نتایج قابل مقایسه با نتایج سایر محققین در ارتباط با شبیه سازی کلزا بود (Deligios et al., 2013; Jing et al., 2016). همچنین نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ برای تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی داری ندارد (جدول ۵).

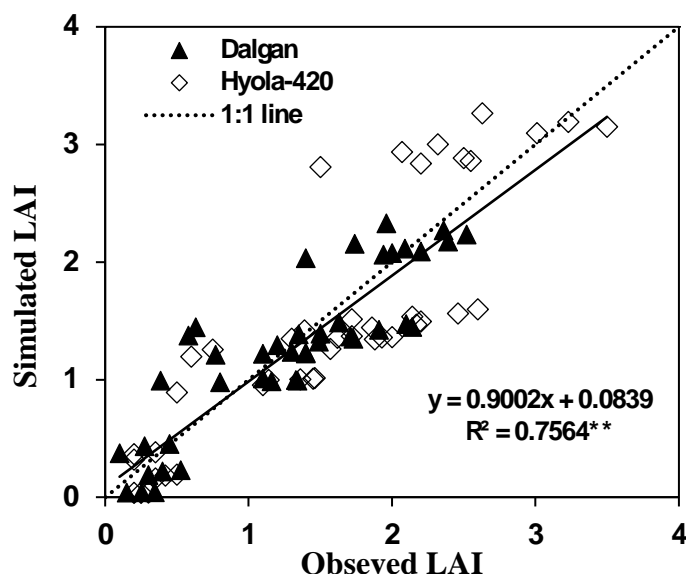
اما در دوره پایانی رشد کلزا LAI شبیه سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه گیری LAI حداکثر بود. به عنوان مثال، مقدار LAI اندازه گیری شده بسیار کم تر از LAI شبیه سازی شده در ۱۲۰ روز پس از کاشت بود. در این مدل، LAI شبیه سازی شده به جای LAI اندازه گیری، از الگوی شاخص سطح سبز گیاه (PAI) پیروی می کند. این موضوع را می توان با ویژگی ویژه بیوفیزیکی گیاه کلزا که قبل از رسیدگی فیزیولوژیک، ریزش برگ ها اتفاق افتاده ولی غلاف های سبز منبع اصلی فتوسنتز هستند، توضیح داد (Gammelvind et al., 1996). در نسخه فعلی مدل CSM-CROPGRO-Canola در DSSAT ۷4.6، توابع جذب نور و فتوسنتز غلاف مشخص نشده است، اگرچه یک مدل CROPGRO اختصاصی برای شبیه سازی سطح برگ و سطح غلاف ها برای سویا ایجاد شده است (Timsina et al., 2007). این مدل در اواخر فصل رشد، از غلاف ها برای جذب نور و فتوسنتز برای رشد را استفاده می کند. بنابراین، برآورد بیش از حد LAI از شروع غلاف دهی کلزا اتفاق افتاده است (Jing et al., 2016). با این حال، با مقایسه شاخص سطح برگ شبیه سازی شده با مقادیر مشاهده ای در ارقام از ابتدای رشد تا شروع تشکیل خورجین نشان از دقت قابل قبول مدل در شبیه سازی LAI تا مرحله تشکیل خورجین بود (شکل ۳). به طوری که مقادیر nRMSE، d و R<sup>2</sup> برای رقم دلگان به ترتیب ۲۶/۹۵ درصد، ۰/۹۳ و ۰/۷۷\*\* و برای رقم هایولا ۴۲۰ به ترتیب ۳۲/۲۲ درصد، ۰/۹۳ و ۰/۷۵\*\* به دست آمد (جدول ۴). همچنین نتایج آزمون t مربوط به مقایسه شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نشان داد که از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با هم نداشتند (جدول ۵).

PAI و LAI برای محاسبه جذب نور و فتوسنتز در بعضی از مدل های محصول که برای شبیه سازی کلزا مانند CERES-Rape (Gabielle et al., 1998)، LINTUL-BRASNAP (Robertson et al., 1997) و APSIM-Canola (Habekotté, 1999) لحاظ شده اند. به طور کلی، در این مدل های کلزا، ضریب خاموشی و کارایی مصرف نور در خورجین ها کمتر از برگ ها بود، که این مطلب در آزمایش های واقعی نیز به اثبات رسیده است (Gammelvind et al., 1996). در مدل فعلی CSM-CROPGRO-Canola، رشد خورجین ها شبیه سازی شده بودند، اما توابع جذب و استفاده از نور مشخص نشده اند (Jing et al., 2016).



شکل ۲- شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن در سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶

Fig. 2- Trend of leaf area index simulated against the observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in various treatments of planting dates and nitrogen fertilizer levels in 2017



شکل ۳- شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵

Fig. 3- Simulated LAI vs. observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in 2017

تعداد نقاط در هر رقم ۴۲ عدد که مربوط به سه سطح کود در دو تاریخ کاشت در ۷ مرحله رشدی از کاشت تا شروع تشکیل خورجین می‌باشند. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

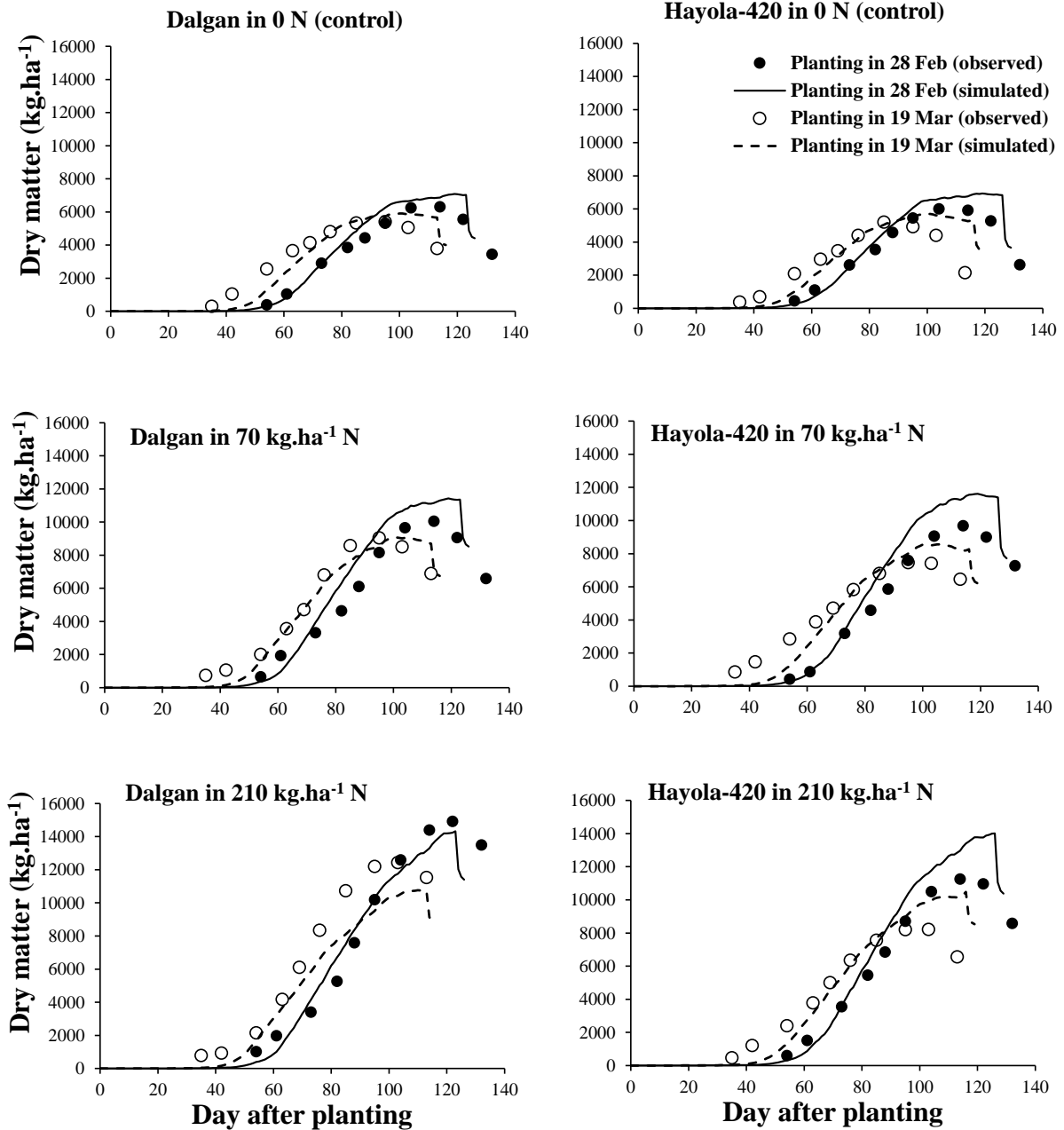
The number of points in each cultivar is 42, which corresponds to three levels of N fertilizer on two planting dates during seven growth stages from cultivation to pod formation. Fitted regression among observed and predicted data (solid line) vs. the 1:1 line (dotted line) is shown in the figure.

(et al., 2006).

نتایج اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن نشان داد که این مدل تا حد بسیار خوبی توانسته LAI را در طول فصل رشد تا مرحله تشکیل خورجین شبیه‌سازی کند (شکل ۷). اما در اواخر دوره رشد کلزا LAI شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری LAI حداکثر بود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این مدل شاخص سطح سبز گیاه را متناسب با تعداد غلاف‌ها در نظر گرفته با LAI تلفیق می‌کند. بنابراین بهتر است شاخص سبز گیاه را در آزمایش‌ها، اندازه‌گیری و به‌عنوان داده‌های اندازه‌گیری شاخص سطح برگ مدل را ارزیابی کرد (Jing et al., 2016). با این حال، مقدار  $d$ ,  $nRMSE$  و  $R^2$  برای رقم دلگان به‌ترتیب ۲۴/۸۸ درصد، ۰/۹۲ و ۰/۷۴\*\* و برای رقم هایولا ۴۲۰ به‌ترتیب ۲۲/۷۲ درصد، ۰/۹۵ و ۰/۸۱\*\* بود که با توجه موارد ذکر شده نتایج این مدل در شبیه‌سازی LAI تا مرحله تشکیل خورجین در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و کود نیتروژن قابل قبول بوده است (جدول ۶).

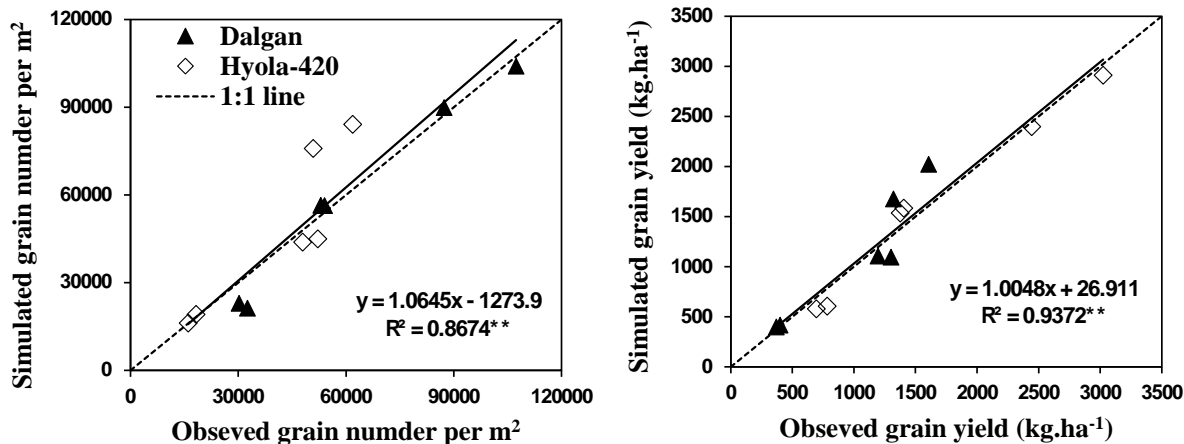
#### اعتبارسنجی مدل: برای تعیین اعتبار مدل از مجموعه‌ای از

داده‌های آزمایش سال دوم که در برآورد ضرایب ژنتیکی مدل در مرحله واسنجی به کار نرفته بودند، استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی طول دوره کاشت تا گل‌دهی ارقام در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر RMSE کوچک‌تر از سه روز نشان از دقت بالای واسنجی مدل دارد (جدول ۶). این دقت بالا در مورد مرحله فنولوژیکی شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و کاشت تا رسیدگی هر دو رقم کلزا نیز مشاهده شد (شکل ۶). معیارهای آماری نشان از توانایی مدل در شبیه‌سازی صفات فنولوژیکی ارقام کلزا در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و کود نیتروژن می‌باشد (جدول ۶). همچنین شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازش داده شده مراحل نمو ارقام دگان و هایولا از طریق آزمون  $t$  اختلاف معنی‌داری با خط ۱:۱ نشان نداد (جدول ۷). پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاه اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حدود زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد. به همین ترتیب، ممکن است پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرایندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشند (Soltani



شکل ۴- روند تجمع ماده خشک شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن در سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶

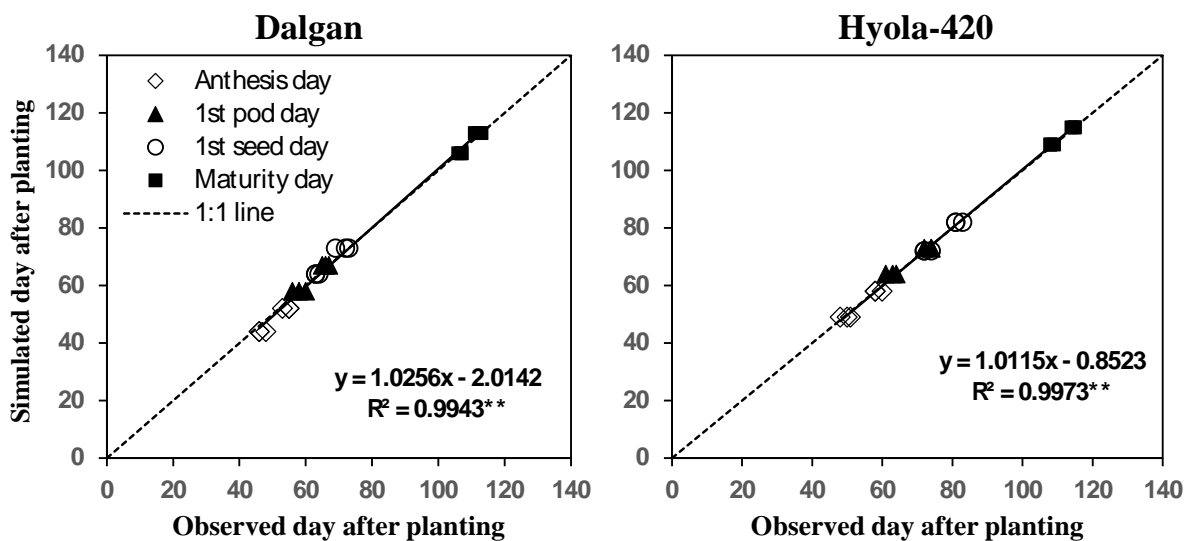
Figure 4- Accumulation of simulated dry matter vs. the observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in various treatments of planting dates and nitrogen fertilizer levels in 2017



شکل ۵- تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶  
 Fig. 5- Simulated number of grains per square meter (left) and simulated seed yield (right) vs. respective observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in 2017

تعداد نقاط هر صفت ۶ عدد که مربوط به سه سطح کود نیتروژن در دو تاریخ کاشت می‌باشند. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

The number of points for each trail is 6, which corresponds to the three levels of N fertilizer on two planting dates. Fitted regression among observed and predicted data (solid line) against the 1:1 line (dotted line) is shown in the figure.



شکل ۶- شروع گل‌دهی، شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در سال زراعی ۱۳۹۶-۹۷

Fig. 6- Anthesis day, 1<sup>st</sup> pod day, 1<sup>st</sup> seed day, and physiological maturity day simulated against observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in 2018

تعداد نقاط در هر مرحله ۶ عدد که مربوط به سه سطح کود نیتروژن در دو تاریخ کاشت می‌باشند. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

The number of points in each stage is 6, which relates to the three levels of fertilizer on two planting dates. Fitted regression among observed and predicted data (solid line) against the 1:1 line (dotted line) is shown.

جدول ۶- نتایج اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک، عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک کل و شاخص سطح برگ دو رقم کلزا  
Table 6- Results of model evaluation to simulate phenological stages, seed yield, total dry matter yield, and leaf area index of two canola cultivars

صفات Variable	n	دلگان Dalgan				هایولا ۴۲۰ Hyola-420			
		مجذور میانگین مربعات خطا RMSE	مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده nRMSE (%)	d	R <sup>2</sup> (1:1)	مجذور میانگین مربعات خطا RMSE	مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده nRMSE (%)	d	R <sup>2</sup> (1:1)
شروع گل‌دهی Anthesis day	6	2.68	5.35	0.89	0.94**	1.29	2.39	0.98	0.94**
شروع خورجین‌دهی 1 <sup>st</sup> pod day	6	1.47	2.37	0.97	0.91**	1.47	2.16	0.98	0.96**
شروع تشکیل دانه 1 <sup>st</sup> seed day	6	1.78	2.66	0.96	0.91**	1.08	1.40	0.99	0.96**
رسیدگی فیزیولوژیک Maturity day	6	1.08	0.99	0.97	0.94**	0.71	0.63	0.99	0.98**
شاخص سطح برگی* LAI*	42	0.38	24.88	0.92	0.74**	0.36	22.72	0.95	0.82**
ماده خشک کل Total dry matter (kg.ha <sup>-1</sup> )	57	1285	24.97	0.97	0.91**	1150	22.73	0.98	0.94**
تعداد دانه در مترمربع Number of seed (#/m <sup>2</sup> )	6	13043	14.97	0.98	0.91**	10294	15.37	0.98	0.90**
عملکرد دانه Seed yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	6	395	16.98	0.97	0.89**	265	16.25	0.97	0.91**

\*: داده‌ها مربوط به شاخص سطح برگ از ابتدای دوره رشد تا مرحله خورجین‌دهی (هفت مرحله) بوده است.

\*: Data belonged to LAI from the beginning to the pod formation (7 stages).

شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک به خط ۱:۱ هستند و این یعنی مدل به‌خوبی واسنجی شده و می‌توان با آن عملکرد را در سال‌های مختلف با دقت خوبی شبیه‌سازی کرد. همچنین نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برآزش داده شده با خط ۱:۱ برای تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برآزشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۷). میزان RMSE ۳۹۵ و ۲۶۵ کیلوگرم در هکتار، d ۰/۹۷ و R<sup>2</sup> ۰/۸۹\*\* و ۰/۹۱\*\* به ترتیب برای رقم دلگان و هایولا ۴۲۰ دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه را تأیید می‌کند (جدول ۶). همچنین مقادیر RMSE، d و R<sup>2</sup> برای تعداد دانه در

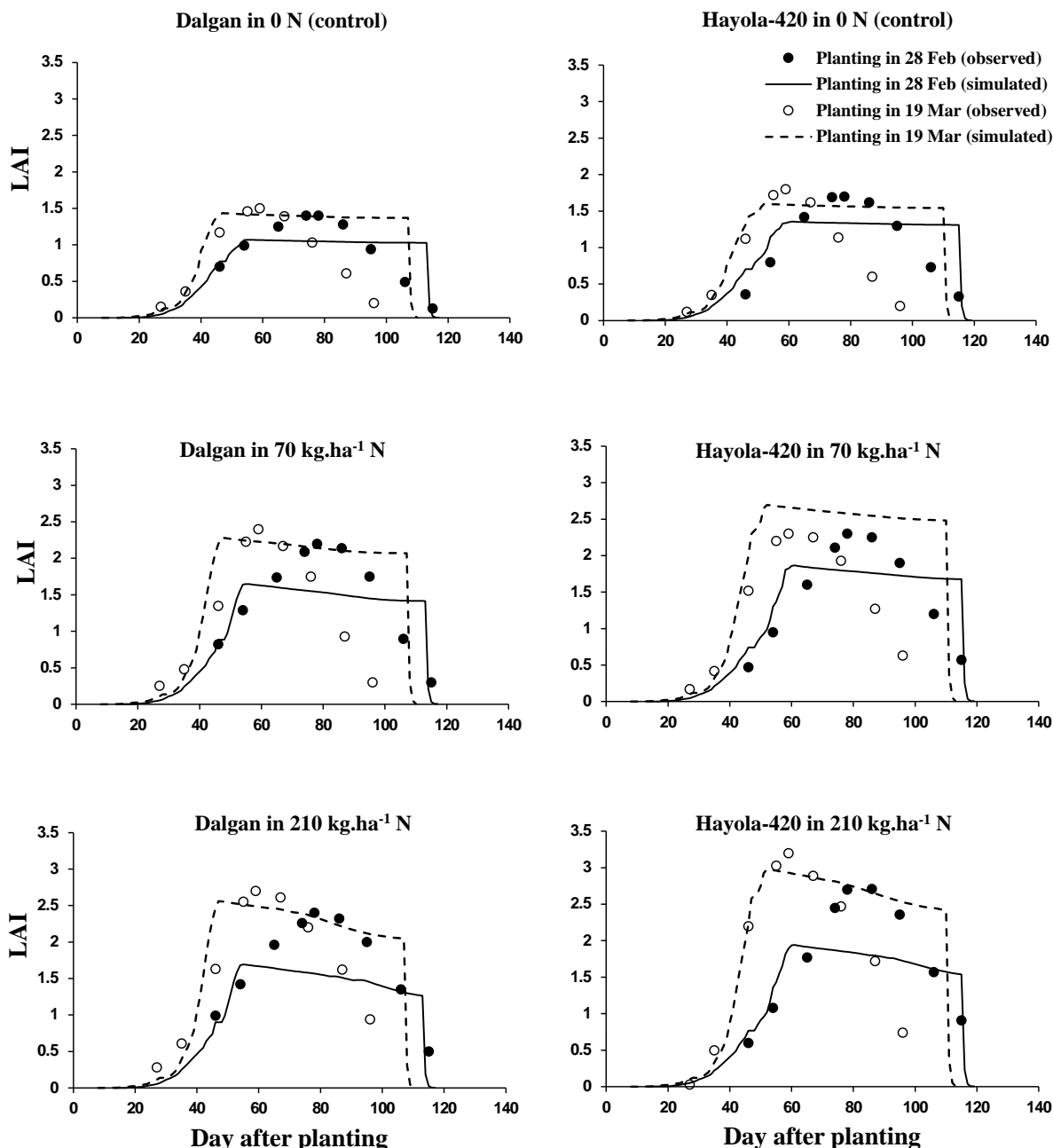
نتایج اعتبارسنجی روند ماده خشک کل شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل به‌خوبی توانسته در تاریخ‌های مختلف کاشت و همچنین سطوح مختلف کود نیتروژن ماده خشک کل را شبیه‌سازی کند (شکل ۸). به‌طور کلی، میزان RMSE، d و R<sup>2</sup> برای رقم دلگان به ترتیب ۲۴/۹۷ درصد، ۰/۹۷ و ۰/۹۱\*\* و برای رقم هایولا ۴۲۰ به ترتیب ۲۲/۷۳ درصد، ۰/۹۸ و ۰/۹۴\*\* بود که نشان‌دهنده دقت مدل در شبیه‌سازی ماده خشک کل است (جدول ۶).

اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه دو رقم کلزا در تاریخ‌های مختلف کاشت‌های مختلف و سطوح مختلف کود نیتروژن در شکل ۹ نشان داده شده است که نقاط



گندم در مناطق مختلف اقلیمی ایران بررسی شده بود، نشان داد که مقدار nRMSE و d به ترتیب کمتر از ۲۰ درصد و بالاتر از ۰/۸ بوده است که با نتایج این هماهنگ است (Fallah et al., 2021).

مترمربع به ترتیب ۱۴/۹۷، ۰/۹۸ و ۰/۹۱\*\* برای رقم دلگان و ۱۵/۳۷، ۰/۹۸ و ۰/۹۰\*\* برای رقم هایولا ۴۲۰ بود که نشان دهنده دقت بالای مدل و واسنجی مناسب آن می باشد (جدول ۶). نتایج اعتبارسنجی مدل DSSAT-Nwheat نیز که برای شبیه سازی عملکرد دانه ارقام



شکل ۷- شاخص سطح برگ شبیه سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶

Fig. 7- Simulated leaf area index vs. the observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in different treatments of planting dates and nitrogen fertilizer levels in 2018

جدول ۷- نتایج آزمون t برای مقایسه شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده با داده‌های اعتبارسنجی  
 Table 7. Results of the t-test for comparing slope (b) and intercept (a) of the 1:1 line against the fitted linear regression by evaluation data

صفات Variable	پارامتر Parameter	مقدار Value	خطای استاندارد Standard error	t	فرض صفر H0
مراحل نمو Phenological stages					
دلگان Dalgan	عرض از مبدأ Intercept (a)	-2.014	1.251	1.610	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	1.026	0.017	1.547	قبول Accepted
هایولا ۴۲۰ Hyola-420	عرض از مبدأ Intercept (a)	-0.852	0.910	0.937	قبول Accepted
	شیب (b) Slope (b)	1.012	0.011	1.020	قبول Accepted
تعداد دانه Seed number	عرض از مبدأ Intercept (a)	279	8375	0.033	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	0.984	0.098	0.162	قبول Accepted
عملکرد دانه Seed yield	عرض از مبدأ Intercept (a)	61.19	212.7	0.288	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	0.936	0.094	0.676	قبول Accepted

می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی کلزا با استفاده از مدل CSM- CROPGRO-Canola رضایت‌بخش بوده است و نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی مراحل نمو و صفات مربوط به رشد و عملکرد ارقام کلزا می‌باشد. بدین ترتیب، این مدل می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت کلزا مورد استفاده قرار گیرد.

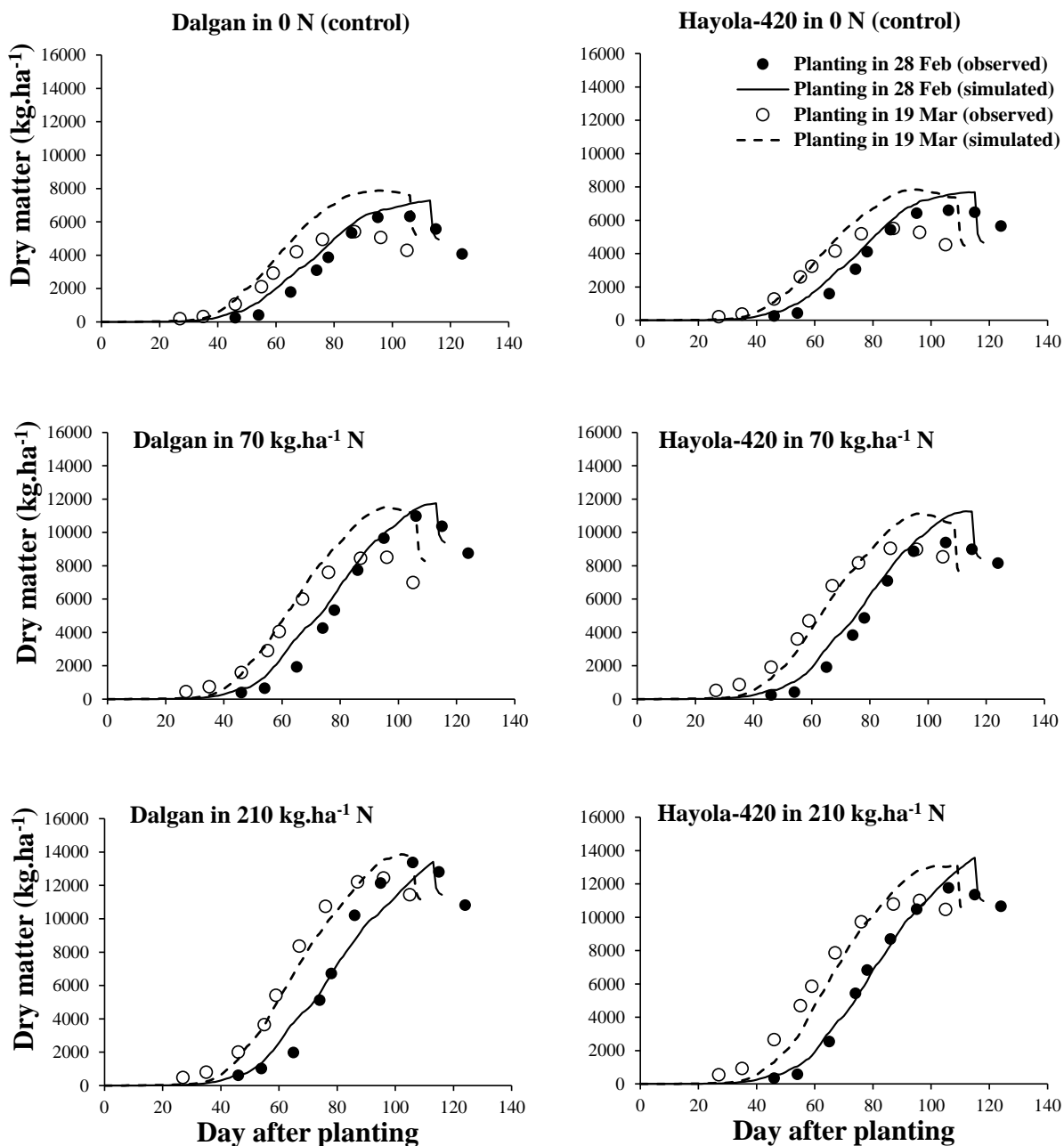
#### تعیین تاریخ کاشت بهینه کلزای بهاره در منطقه

یکی از کاربردهای مدل پس از اعتبارسنجی تعیین بهترین مدیریت مزرعه جهت حصول بالاترین عملکرد با استفاده از ابزار آنالیز فصلی DSSAT است. در اینجا ۱۰ تاریخ کاشت فرضی از ۱۰ بهمن تا ۱۰ اردیبهشت به فاصله ۱۰ روز تعریف شد و مدل برای هر دو رقم با داده‌های ۳۰ ساله (۱۳۹۷-۱۳۶۸) منطقه کرج اجرا و میزان عملکرد دانه شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که با تأخیر در کاشت عملکرد دانه ارقام کلزا کاهش می‌یابد که این کاهش عملکرد از تاریخ ۲۰ اسفند به بعد شدیدتر خواهد بود (شکل ۱۱). بنابراین، در این منطقه با توجه اقلیم بلندمدت بایستی حداکثر تا ۲۰ اسفند عملیات کاشت کلزای بهاره انجام شود. همچنین نتایج نشان داد که رقم دلگان به خصوص در تاریخ کاشت‌های زود هنگام از عملکرد بیشتری

برای آنکه دقت مدل در ارزیابی با قاطعیت بیشتری اعلام شود، تمام نقاط مربوط به آزمایشات تیمارهای کودی و تاریخ کاشت در دو سال با هم ادغام و یک شکل نهایی برای دو رقم کلزا ترسیم گردید (شکل ۱۰). نتایج ارزیابی کلی مدل براساس مقایسه هم‌زمان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده صفات مربوط به مراحل نمو، شاخص سطح برگ حداکثر، ماده خشک کل، تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه نشان داد که مدل به‌خوبی توانسته این صفات را در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و کود نیتروژن در دو سال آزمایش شبیه‌سازی کند. شاخص‌های آماری  $d$ ،  $nRMSE$  و  $R^2$  برای رقم دلگان به ترتیب ۱۰/۲۸ درصد، ۰/۹۹ و ۰/۹۷\* و برای رقم هایولا ۴۲۰ به ترتیب ۱۰/۵۴، ۰/۹۹ و ۰/۹۷\* بود که نتایج این ارزیابی را تأیید می‌کند (شکل ۱۰). معمولاً برای مدل‌ها مقدار  $nRMSE$  کمتر از ۲۰ درصد دقت بالای مدل را نشان می‌دهد (Hammer et al., 2010; Fallah et al., 2021). همچنین مقدار شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازش داده شده برای ارقام دگان و هایولا از طریق آزمون t اختلاف معنی‌داری با خط ۱:۱ نشان نداد (جدول ۸). نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا با نتایج گزارش شده توسط سایر محققین (Amiri et al., 2018; Rahban et al., 2021a) هم‌خوانی داشت. بنابراین،

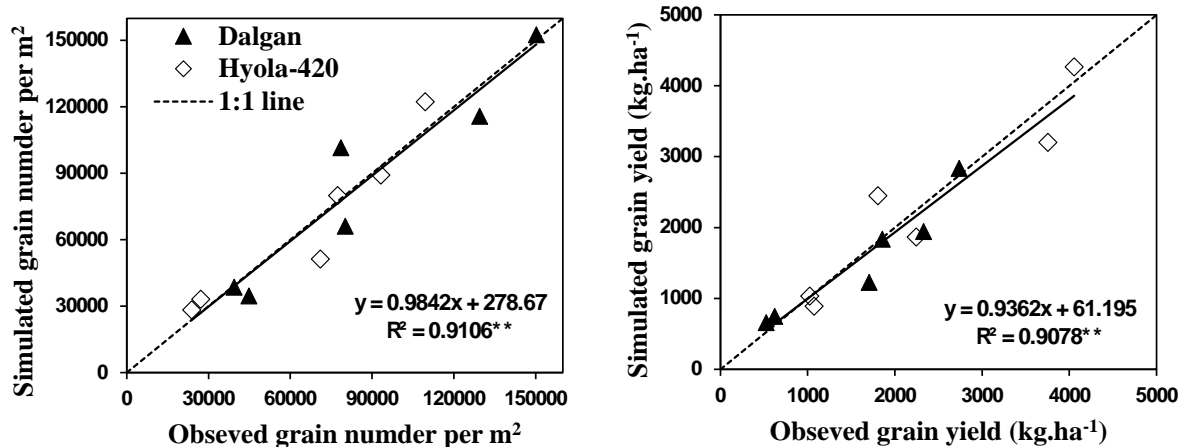
طیفی از داده‌های اقلیمی اهمیت زیادی پیدا کرده است (Amiri, Deihimfard et al., 20152018).

نسبت به رقم هایولا ۴۲۰ برخوردار خواهد بود (شکل ۱۱). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در تجزیه و تحلیل نظام‌های زراعی در واکنش به عملیات مدیریتی و تحت شرایط متغیر محیطی با وجود دسترسی به



شکل ۸- روند تجمع ماده خشک شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و سطوح کودی نیتروژن در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶

Fig. 8- Trend of simulated dry matter accumulation vs. the observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in different treatments of planting dates and nitrogen fertilizer levels in 2018

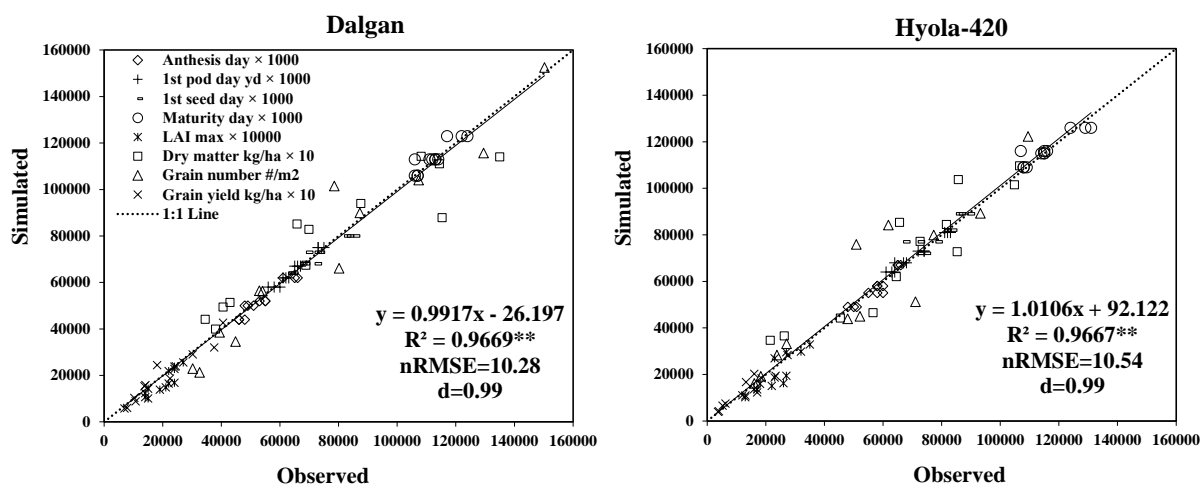


شکل ۹- تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰ در سال ۱۳۹۶-۹۷

Fig. 9- Simulated number of seeds per square meter and simulated seed yield vs. respective observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars in 2018

تعداد نقاط هر صفت ۶ عدد که مربوط به سه سطح کود نیتروژن در دو تاریخ کاشت می‌باشند. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

The number of points for each trail is 6, which corresponds to the three levels of N fertilizer on two planting dates. Fitted regression among observed and predicted data (solid line) against the 1:1 line (dotted line) is shown.



شکل ۱۰- ارزیابی کلی مدل در شبیه‌سازی صفات مراحل نموی، شاخص سطح برگ حداکثر، ماده خشک کل، تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای ارقام دلگان و هایولا ۴۲۰

Fig. 10- Overall evaluation of the model for simulating the developmental (parameters) traits: maximum LAI, total dry matter, number of seeds per square meter and seed yield. Simulated values vs. the observed values of Dalgan and Hyola-420 cultivars are demonstrated for each parameter

تعداد نقاط برای هر صفت ۱۲ عدد که مربوط به سه تیمار کودی در دو تاریخ کاشت در دو سال آزمایش است. رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده (خط ممتد) در مقایسه با خط ۱:۱ (خط منقطع) در شکل نشان داده شده است.

The number of points for each trail is 12, which corresponds to the three levels of N fertilizer on two planting dates in two years. Fitted regression among observed and predicted data (solid line) against the 1:1 line (dotted line) is shown.

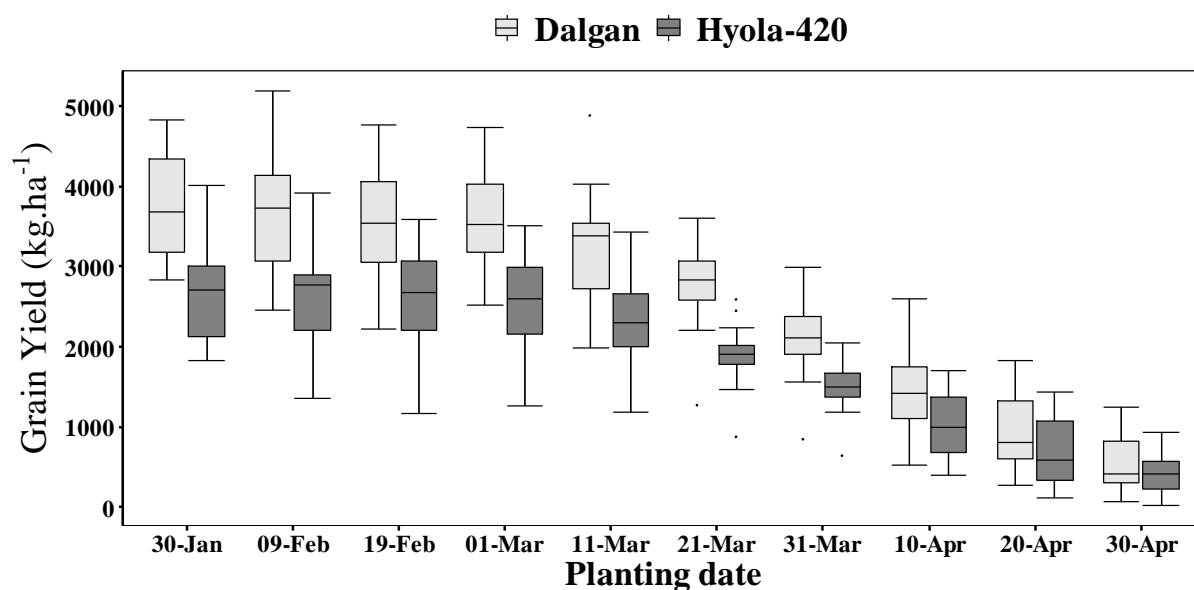
جدول ۸- نتایج آزمون t برای مقایسه شیب و عرض از مبدأ خط ۱:۱ با معادله رگرسیونی برازش داده شده با مجموعه‌ای از داده‌های هر رقم کلزا که در شکل ۹ نشان داده شده است

Table 8- Results of the t-test for comparing slope (b) and intercept (a) of the 1:1 line against the fitted linear regression by all data for each canola cultivar, as shown in figure 9

ارقام Variable	پارامتر Parameter	مقدار Value	خطای استاندارد Standard error	t	فرض صفر H0
دلگان Dalgan	عرض از مبدأ Intercept (a)	-26.197	1337.1	0.020	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	0.9917	0.0189	0.440	قبول Accepted
هایولا ۴۲۰ Hyola-420	عرض از مبدأ Intercept (a)	92.122	1334.2	0.069	قبول Accepted
	شیب Slope (b)	1.0106	0.0193	0.548	قبول Accepted

دوران رشد زایشی گیاه خصوصاً گل‌دهی و غلاف‌دهی با تنش خشکی انتهایی فصل و دماهای بالا جلوگیری کرده و با افزایش کارایی مصرف آب، عملکرد بیولوژیک و نهایتاً عملکرد نخود را افزایش دهد (Amiri, 2018).

در مطالعه‌ای به‌منظور تعیین بهترین تاریخ کاشت نخود دیم در استان کرمانشاه با استفاده از مدل SSM-Chickpea مشخص شد که تاریخ کاشت زودهنگام اول اسفند می‌تواند ضمن افزایش طول دوره رشد گیاه و هم‌زمانی بیشتر باران با فصل رشد گیاه از مصادف شدن



شکل ۱۱- تغییرات عملکرد دانه شبیه‌سازی شده ارقام کلزا در تاریخ کاشت‌های مختلف در دوره ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹)

Fig. 11- Response of simulated seed yield of two canola cultivars in different planting dates during 30 years (1989-2018)

### نتیجه‌گیری

مرحله تشکیل غلاف در تیمارهای مختلف شبیه‌سازی کند. اما در دوره پایانی رشد کلزا LAI شبیه‌سازی شده دارای خطای بیش‌برآورد بود که دلیل آن استفاده مدل از الگوی شاخص سطح سبز گیاه به‌جای LAI بود. همچنین مدل به‌خوبی توانست در تاریخ‌های مختلف کاشت و همچنین سطوح مختلف کود نیتروژن، ماده خشک کل را

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مراحل فنولوژیکی (شروع گل‌دهی، شروع خورجین‌دهی، شروع تشکیل دانه و رسیدگی فیزیولوژیک) نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل نمو بوده است. این مدل تا حد بسیار خوبی توانست شاخص سطح برگ (LAI) را تا

ایران مورد استفاده قرار گیرد. یکی از این تصمیم‌گیری‌ها تعیین بهترین تاریخ کاشت کلزای بهار در منطقه است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه ارقام در تاریخ کاشت‌های مختلف با داده‌های بلندمدت نشان داد که با تأخیر در کاشت عملکرد دانه ارقام کلزا کاهش می‌یابد و بایستی حداکثر تا ۲۰ اسفند عملیات کاشت کلزای بهاره انجام شود.

شبیه‌سازی کند. نتایج اعتبارسنجی تعداد دانه در مترمربع و عملکرد دانه ارقام کلزا نیز نشان از دقت بالای مدل و واسنجی مناسب آن بود. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که مدل CSM-CROPGRO-Canola پاسخ‌های عملکرد دانه به مدیریت و شرایط محیطی را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند و می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت کلزا در

## References

- Amiri, S.R. (2018). Determining the optimum sowing date of chickpea in Kermanshah province using modeling approach. *Journal of Plant Ecophysiology*, 10(32), 130-141. (In Persian with English Summary)
- Arvaneh, H., Abbasi, F., & Eslami, H. (2011). Validation and testing of AquaCrop under farmers' management, 1<sup>st</sup> National Conference on Agrometeorology and Agricultural Water Management. University of Tehran, Iran. 22 November 2011, p. 125.
- Bakhshi, B., Rostami-Ahmadvandi, H. & Fanaei, H. R. (2021). Camelina, an adaptable oilseed crop for the warm and dried regions of Iran. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*, 1(1), 39-45. [http://www.cajpsi.com/article\\_128592.html](http://www.cajpsi.com/article_128592.html)
- Bannayan, M., Crout, N. M. J., & Hoogenboom, G. (2003). Application of the CERES-wheat model for within-season prediction of winter wheat yields in the United Kingdom. *Agronomy Journal*, 95, 114-125. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1140a>
- Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Rotter, R.P., Cabrera, J. M. C. A., & Van Laar, H. H. (1998). WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
- Boote, K. J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., & Pickering, N. B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In: G. Tsuji G. Hoogenboom and P. Thornton (Eds). *Understanding options for agricultural production. Springer, the Netherlands*. p. 99-128.
- Boote, K.J., Mínguez, M. I., & Sau, F. (2002). Adapting the CROPGRO–legume model to simulate growth of faba bean. *Agronomy Journal*, 94, 743-756.
- Deihimfard, R., Nassiri Mahallati, M., & Koocheki A. (2015). Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modeling. *Field Crops Research*, 184, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.002>
- Deligios, P.A., Farci, R., Sulas, L., Hoogenboom, G., & Ledda, L. (2013). Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: Model adaptation at a field scale. *Field Crops Research*, 144, 100-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.017>
- Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to simulate rapeseed yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13, 715-726. (In Persian with English Summary)
- Fallah, M. H., Nezami, A., Khazaie, H. R., & Nassiri Mahallati, M. (2021). Evaluation of DSSAT-Nwheat model across a wide range of climate conditions in Iran. *Journal of Agroecology*, 12, 561-580. (In Persian with English Summary) <https://doi.org/10.22067/jag.v12i4.77250>
- FAOSTAT. (2019). FAO, Statistics Division. <http://faostat3.fao.org/download/T/TP/E> (verified 15 March 2019).
- Farhangfar, S., Bannayan, M., Khazaei, H. R., & Mousavi Baygi, M. (2017). Evaluating canola yield under arid and climate change conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15, 355-367. (In Persian with English Summary)
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., & Andersen, M. N. (1998). Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57, 95-111. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00120-2)
- Gammelvind, L. H., Schjoerring, J. K., Mogensen, V.O., Jensen, C.R., & Bock, J. G. H. (1996). Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 186, 227–236.

- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Gilardelli, C., Stella, T., Frasso, N., Cappelli, G., Bregaglio, S., Chiodini, M. E., Scaglia, B., & Confalonieri, R. (2016). Wofost -GTC: A new model for the simulation of winter rapeseed production and oil quality. *Field Crops Research*, 197, 125-132.
- Habekotté, B. (1997). Options for increasing seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A simulation study. *Field Crops Research*, 54, 109-126. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00041-5)
- Hammer, G. L., Van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S. C., Broad, I., Harland, P., & Muchow, R. C. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany*, 61, 2185-2202. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq095>
- Heidarybeni, M., Yazdanpanh, H., & Mehnatkesh, A. (2018). Impacts of climate change on canola yields and phenology (Case study: Chahrmahal and Bakhtiari, Iran). *Physical Geography Research Quarterly*, 50, 373-389. (In Persian with English Summary)
- Honar, T., Sabet Sarvestani, A., Kamgar Haghighi, A. A., & Shams, S. (2011). Calibration of crop system model for growth simulation and yield estimation of canola. *Water Soil*, 25, 593-605. (In Persian with English Summary)
- 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., Moreno, L. P., & Jones, J. W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., & Tsuji, G.Y. (1999). DSSAT v3, Vol. 4. University of Hawaii, Honolulu, HI.
- Jing, Q., Shang, J., Qian, B., Hoogenboom, G., Huffman, T., Liu, J., Ma, B.L., Geng, X., Jiao, X., Kovacs, J., & Walters, D. (2016). Evaluation of the CSM-CROPGRO-Canola model for simulating canola growth and yield at West Nipissing in Eastern Canada. *Agronomy Journal*, 108, 575-584.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
- Kassie, B. T., Asseng, S., Porter, C. H., & Royce, F. S. (2016). Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. *European Journal of Agronomy*, 81, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.012>
- Mojarrad, F., Farhadi, B., & Kheyri, R. (2014). The role of climatic factors in determining the start date of planting and growing period of colza with application of CropSyst model, Case study: Coastal provinces of Caspian Sea in Iran. *Physical Geography Research*, 46, 463-476. (In Persian with English Summary)
- Mousavizadeh, S. F., Honar, T., & Ahmadi, S. H. (2016). Assessment of the AquaCrop Model for simulating canola under different irrigation managements in a semiarid area. *International Journal of Plant Production*, 10, 425-445.
- Nassiri Mahallati, M. (2000). Modeling the Growth Processes of Agricultural Plants. The Publications University of Mashhad. Mashhad, Iran.
- Negaraesh, A. (2011). Development of oil seed cultivars. *Journal of Aftabgardan*, 27, 28-39. (In Persian with English Summary)
- Oteng-Darko, P., Yeboah, S., Addy, S. N. T., Amponsah, S., & Owusu Danquah, E. (2013). Crop modeling: A tool for agricultural research - A review. *E3 Journal of Agricultural Research and Development*, 2, 1-6.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop model to predict phenology, yield, and water productivity of canola (*Brassica napus* L.) in Iran condition. *Journal of Agroecology*, 13, 157-177. (In Persian with English Summary)
- Reddy, T. Y., & Reddi, G. H. S. (2003). Principles of Agronomy. Kalyani Publishers, Ludhiana. pp. 48-77.
- Robertson, M. J., Holland, J. F., Kirkegaard, J.A., & Smith, C. J. (1999). Simulating growth and development of canola in Australia. 10<sup>th</sup> International Rapeseed Congress, Canberra, Australia, CSIRO, Dickson, Australia, 26-29

- September 1999, p. 245-247.
- Saseendran, S. A., Nielsen, D. C., Ma, L., & Ahuja, L. R. (2010). Adapting CROPGRO for Simulating Spring Canola Growth with Both RZWQM2 and DSSAT 4.0. *Agronomy Journal*, 102, 1606-1621.
- Saseendran, S. A., Nielsen, D. C., Ma, L., & Ahuja, L. R. (2010). Adapting CROPGRO for simulating spring canola growth with both RZWQM2 and DSSAT 4.0. *Agronomy Journal*, 102, 1606-1621.
- Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J., & Zeinali, E. (2006). Modeling chickpea growth and development: Phonological development. *Field Crops Research*, 99, 1-13.
- Timsina, J., Boote, K. J., & Duffield, S. (2007). Evaluating the CROPGRO soybean model for predicting impacts of insect defoliation and depodding. *Agronomy Journal*, 99, 148-157. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0338>
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., & Van Diepen, C.A. (1997). Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University, pp. 167.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorology Society*, 63, 1309-1313. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
- 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 System*, 127, 81-89.
- Zelege, K., Luckett, D., & Cowley, R. (2011). Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. *Agronomy Journal*, 103, 1610-1618.
- Zomorodian, A., Kavosi, Z., & Momenzadeh, L. (2011). Determination of EMC isotherms and appropriate mathematical models for canola. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 407-413. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.10.006>