



## به‌زراعی کشاورزی

دوره ۲۲ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۳۹۹

صفحه‌های ۵۴۲-۵۳۱

مقاله پژوهشی:

### پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM\_iCrop برای پیش‌بینی رشدونمو باقلا در شرایط آب‌وهوایی گرگان

بنیامین ترابی<sup>۱\*</sup>، نجیب‌الله ابراهیمی<sup>۲</sup>، افشین سلطانی<sup>۳</sup>، ابراهیم زینلی<sup>۱</sup>

۱. دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳. استاد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸

#### چکیده

پژوهش حاضر به‌منظور تخمین پارامترهای مدل SSM\_iCrop و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشدونمو گیاه باقلا در شرایط آب‌وهوایی گرگان انجام شد. این پژوهش روی گیاه باقلا "رقم برکت" به‌صورت اسپلت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل تاریخ کاشت (۶ آذرماه، ۴ دی‌ماه و ۱۱ بهمن‌ماه) و تراکم بوته (۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ بوته در مترمربع) بودند. پارامترهای مربوط به مراحل فنولوژی، گسترش و پیرشدن سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب با استفاده از داده‌های آزمایش حاضر و دیگران تخمین زده شدند. نتایج ارزیابی مدل نشان داد مدل به‌خوبی می‌تواند روز تا گلدهی ( $CV=4/1$  و  $RMSE=3/8$ )، روز تا رسیدگی ( $CV=11/9$  و  $RMSE=8/1$ )، تعداد گره روی ساقه اصلی ( $CV=10/0$  و  $RMSE=1/7$ )، شاخص سطح برگ ( $CV=28/8$  و  $RMSE=0/8$ )، عملکرد بیولوژیک ( $CV=158/5$  و  $RMSE=21/6$ ) و عملکرد دانه ( $CV=118/6$  و  $RMSE=118/6$ ) را پیش‌بینی کند. بنابراین می‌توان از مدل SSM\_iCrop برای بررسی وضعیت مدیریت زراعی و تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد باقلا در شرایط گرگان استفاده کرد.

**کلیدواژه‌ها:** سطح برگ، شبیه‌سازی، عملکرد دانه، فنولوژی، ماده خشک.

### Parameterization and Evaluation of SSM\_iCrop Model for Prediction of Growth and Development of Faba Bean in Climatic Conditions of Gorgan

Benjamin Torabi<sup>1\*</sup>, Najibollah Ebrahimi<sup>2</sup>, Afshin Soltani<sup>3</sup>, Ebrahim Zeinali<sup>1</sup>

1. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

2. M.Sc. Student, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

3. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: February 17, 2019

Accepted: February 1, 2020

#### Abstract

The present study has been conducted to parameterize the SSM\_iCrop model and evaluate the prediction of growth and development of faba bean in Gorgan climate condition. It has been carried out on faba bean cv. "Barkat" as split-plot in randomized complete block design with four replications at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources during 2015-2016. The experimental factors are the planting date (27 November, 25 December, and 31 January) and plant density (5, 15, 25, and 35 plants/m<sup>2</sup>). The parameters of phenological stages, leaf expansion and senescence, production and distribution of dry matter, and water balance have been estimated, using the present data experiment along with other data. Results from model evaluation show that it can well predict days to flowering ( $RMSE=3.8$  and  $CV=4.1$ ), days to maturity ( $RMSE=11.9$  and  $CV=8.1$ ), node number on main stem ( $RMSE=1.7$  and  $CV=10.0$ ), leaf area index ( $RMSE=0.8$  and  $CV=28.8$ ), biological yield ( $RMSE=158.5$  and  $CV=21.6$ ), and grain yield ( $RMSE=118.6$  and  $CV=24.7$ ). Therefore, the SSM\_iCrop model is a great option to evaluate the agronomic management and analyze the growth and yield of faba bean in Gorgan conditions.

**Keywords:** Leaf area, phenology, simulation, grain yield, dry matter.

## ۱. مقدمه

باقلا با نام علمی (*Vicia faba* L.) به خانواده Fabaceae تعلق دارد. وجود ۲۳/۴ درصد پروتئین در دانه خشک باقلا باعث شده که امروزه به‌عنوان یکی از حبوبات عمده در منطقه خاورمیانه، آفریقا، چین و حتی نقاطی از اروپا و استرالیا در تغذیه انسان و دام توجه زیادی به آن شود. باقلا با سطح زیر کشت ۲/۱ میلیون هکتار یکی از مهم‌ترین بقولات دانه‌ای در دنیا به‌شمار می‌رود (Karkanis *et al.*, 2018). سطح زیر کشت باقلا در ایران حدود ۳۰ هزار هکتار است که عمده‌ترین مناطق تولید آن استان‌های گلستان، خوزستان، مازندران و گیلان می‌باشند (Bagheri & Torabi, 2015). باقلا به‌دلیل داشتن پروتئین زیاد، مواد معدنی و ویتامین‌ها بسیار مغذی است. باقلا به‌علت تثبیت نیتروژن جو، در حفظ پایداری سیستم‌های کشاورزی نقش به‌سزایی دارد (Karkanis *et al.*, 2018). بنابراین، انجام پژوهش‌های زراعی روی این گیاه می‌تواند کمک شایانی در افزایش عملکرد و تولید آن داشته باشد. انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای جهت بررسی راه‌کارهای مدیریتی و ژنوتیپی جهت افزایش عملکرد باقلا هزینه‌بر و زمان‌بر خواهد بود. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌صورت مکمل آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌تواند از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای زمان‌بر و هزینه‌بر جلوگیری کنند (Soltani & Hoogenboom, 2007).

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی مجموعه‌ای از معادلات ریاضی هستند که فرایندهای رشد گیاه را توصیف می‌کنند. این مدل‌ها می‌توانند ابزار مفیدی جهت بررسی وضعیت ژنتیکی گیاه، محیط و مدیریت زراعی باشند (Soltani & Sinclair, 2012). مدل‌های شبیه‌سازی برای درک واکنش گیاهان زراعی به پویایی سیستم آب-خاک-گیاه-اقلیم استفاده می‌شوند (Soltani, 2009). هم‌چنین، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی در ارزیابی

صفات فیزیولوژیک برای رسیدن به عملکرد بالاتر و نیز در بهبود مدیریت زراعی برای به حداکثر رساندن کارایی استفاده از منابع قابل‌دسترس استفاده می‌شوند (Sinclair, 2000; Soltani & Hoogenboom, 2007). از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب (Boote *et al.*, 1998)، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی (Sinclair, 2000; Soltani *et al.*, 2000; Manschadi *et al.*, 2006)، تعیین بهترین مدیریت زراعی (O'Leary & Connor, 1998; Soltani *et al.*, 2001; Soltani & Hoogenboom, 2007) و تخمین عملکرد بالقوه (Meinke & Hammer, 1995) استفاده شده است.

از جمله مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رشدونمو گیاهان زراعی استفاده می‌شود می‌توان به مدل DSSAT (Jones *et al.*, 2003)، APSIM (McCown *et al.*, 1996) و CropSyst (Stockle *et al.*, 2003)، ORIZA2000 (Bouman *et al.*, 2001)، GECROS (Yin & van Laar, 2005) و LINTUL (Spitters & Schapendonk, 1990) اشاره کرد. علاوه بر مدل‌های یادشده مدل دیگری به نام SSM\_iCrop توسط Soltani *et al.* (2013) برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است. این مدل یک مدل ساده و مکانستیک است و دارای فرضیه‌های کمی برای فرایندهای کلیدی در توسعه محصول، رشد و عملکرد است و روی روابطی تأکید دارد که نیاز به کم‌ترین فرضیه‌ها را دارند و در طیف وسیعی از شرایط، مناسب باشند. این مدل برای اولین بار برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم استفاده شد اما به‌تازگی برای استفاده در سایر گیاهان زراعی توسعه یافته است. مدل SSM\_iCrop تمام جنبه‌های مهم فیزیولوژیکی محصولات زراعی تحت شرایط تشعشع محدود، آب محدود و نیتروژن محدود را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی جهت تجزیه و تحلیل

خشک بوته‌ها به تفکیک برگ و سایر اندام‌ها در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت با ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. در پایان آزمایش با استفاده از داده‌های حاصله پارامترهای گیاهی مدل تخمین زده شد. برای مشاهده جزئیات بیشتر در مورد نحوه تخمین پارامترهای مدل به Ebrahimi *et al.* (2017) رجوع شود.

رشد و عملکرد و اثر متقابل آن با محیط و مدیریت زراعی در یک مکان خاص مستلزم برآورد پارامترهای گیاهی برای گیاه موردنظر و نیز ارزیابی کارایی مدل در پیش‌بینی رشدونمو در منطقه موردنظر می‌باشد (Torabi & Soltani, 2013a). بنابراین پژوهش حاضر با هدف تخمین پارامترهای مدل SSM\_iCrop برای گیاه باقلا و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشدونمو در گرگان انجام شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان واقع در غرب گرگان با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۰ متری از سطح دریا با متوسط بارندگی ۶۰۷ میلی‌متر، میانگین دمای ۱۳ درجه و نوسان دمایی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ به اجرا درآمد.

این آزمایش روی گیاه باقلا رقم "برکت" به صورت اسپلت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل تاریخ کاشت (۶ آذرماه، ۴ دی‌ماه و ۱۱ بهمن‌ماه) و تراکم بوته (۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ بوته در مترمربع) بودند. بذرها به صورت دستی و با فاصله ردیف ثابت ۵۰ و عمق ۵ سانتی‌متر کشت شدند. در زمان کاشت مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات پتاسیم، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۳۵ کیلوگرم در هکتار کود اوره به خاک اضافه شد.

نمونه‌گیری از تمام کرت‌ها از مرحله شش تا هشت برگی تا پایان مرحله رشد در فاصله زمانی هر هفت تا ۱۰ روز انجام شد. در هر نمونه برداری سطح برگ ۱۰ بوته با دستگاه سطح برگ‌سنج دلتا تی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد. وزن

### ۲.۲. توصیف مدل و مقادیر پارامترها

مدل SSM-iCrop یک مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی است که شامل زیرمدل‌های فنولوژی، تولید و زوال سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی مدل SSM-iCrop اطلاعات روزانه آب‌وهوا (شامل دمای حداکثر و حداقل، بارندگی و تشعشع خورشیدی)، ویژگی‌های ژنتیکی رقم (شامل پارامترهای رشدونمو)، ویژگی‌های خاک (شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر لایه) و مدیریت زراعی (شامل کاربرد آبیاری، کود، تراکم و تاریخ کاشت) مورد نیاز است (Soltani *et al.*, 2013).

### فنولوژی

پیش‌بینی فنولوژی در مدل SSM-iCrop براساس مفهوم روز بیولوژیک صورت گرفت (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013). یک روز بیولوژیک شامل روزی است که گیاه در بهترین شرایط از نظر دما و فتوپریود قرار دارد. در هر مرحله از کاشت تا رسیدگی برداشت، روز بیولوژیک (BDt) برای هر روز از حاصل ضرب توابع دما (tempfun) و فتوپریود (ppfun) به دست می‌آید:

$$BDt = tempfun \times ppfun \quad (1)$$

مقادیر هر یک از توابع فوق بین صفر تا یک متغیر است.

روز بیولوژیک تجمعی از مجموع روز بیولوژیک روزانه

1. Delta T Device

که در آن  $T$ ،  $T_b$ ،  $To1$ ،  $To2$  و  $T_c$  به ترتیب متوسط دمای هوا، دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی، دمای مطلوب فوقانی و دمای سقف برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشند.

تابع دوتکه‌ای برای بررسی اثر فتوپریود (Soltani *et al.*, 2006a؛ شکل ۱-ب):

$$\text{ppfun} = 1 \quad \text{اگر } PP \geq CPP \quad (3)$$

$$\text{ppfun} = 1 - \text{ppsen} \quad \text{اگر } PP < CPP$$

در این رابطه  $PP$  نشان‌دهنده فتوپریود (ساعت در روز)،  $CPP$  فتوپریود بحرانی که کم‌تر از آن سرعت نمو شروع به کاهش می‌کند و  $PPsen$  ضریب حساسیت به طول روز است. برآورد پارامترهای مربوط به واکنش گیاه باقلا به دما و فتوپریود در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

(BDt) حاصل می‌شود. هر یک از مراحل فنولوژیک زمانی به وقوع می‌پیوندد که روز بیولوژیک تجمعی برای آن مرحله به روز بیولوژیک تجمعی موردنیاز آن مرحله برسد.

در مدل حاضر، از تابع دندان مانند برای بررسی اثر دما و از تابع دوتکه‌ای برای بررسی اثر فتوپریود بر فنولوژی باقلا استفاده شد.

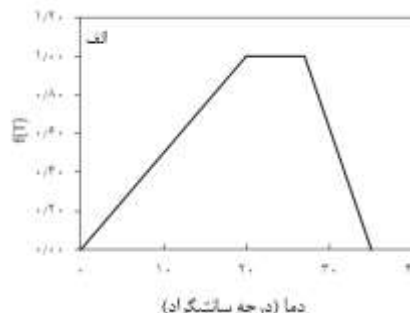
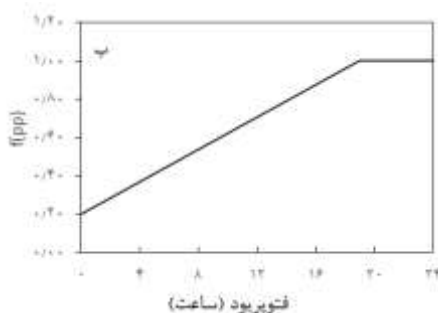
تابع دندان مانند (Torabi & Soltani, 2013b; Soltani *et al.*, 2006b؛ شکل ۱-الف):

$$\text{tempfun} = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) \quad \text{اگر } T_b < T < T_{o1} \quad (2)$$

$$\text{tempfun} = (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) \quad \text{اگر } T_{o2} < T < T_c$$

$$\text{tempfun} = 0 \quad \text{اگر } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$$

$$\text{tempfun} = 1 \quad \text{اگر } T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$$



شکل ۱. توابع مورد استفاده در مدل‌سازی فنولوژی. تابع دندان مانند برای واکنش دما (الف) و تابع دوتکه‌ای برای واکنش فتوپریود (ب).

جدول ۱. تخمین پارامترهای فنولوژی برای گیاه باقلا رقم برکت

منبع	مقدار	واحد	علامت اختصاری	پارامترها
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۳	درجه سانتی‌گراد	$T_b$	دمای پایه برای نمو
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۱۹/۸	درجه سانتی‌گراد	$To1$	دمای مطلوب تحتانی برای نمو
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۲۷/۹	درجه سانتی‌گراد	$To2$	دمای مطلوب فوقانی برای نمو
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۳۵/۰	درجه سانتی‌گراد	$T_c$	دمای سقف برای نمو
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۱۹	ساعت	CPP	فتوپریود بحرانی
Ajam Norouzi & Soltani, 2008	۰/۰۱	ساعت در روز	PPsen	ضریب حساسیت به فتوپریود
پژوهش حاضر	۹	روز	BdSOWEMR	روز بیولوژیک از کاشت تا سبز شدن
پژوهش حاضر	۲۹	روز	BdEMRFLW	روز بیولوژیک از سبز شدن تا گلدهی
پژوهش حاضر	۱۰	روز	BdFLWPOD	روز بیولوژیک از گلدهی تا غلاف‌دهی
پژوهش حاضر	۱۰	روز	BdPODFIL	روز بیولوژیک از غلاف‌دهی تا پر شدن دانه
پژوهش حاضر	۲۲	روز	BdFILMAT	روز بیولوژیک از پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک
پژوهش حاضر	۸	روز	BdMATHAR	روز بیولوژیک از رسیدگی فیزیولوژیک تا برداشت

### تولید و زوال سطح برگ

شبیه‌سازی تولید سطح برگ در دو مرحله از سبزشدن تا پایان تولید برگ و از پایان تولید برگ تا شروع رشد دانه صورت می‌گیرد. در مرحله اول، شبیه‌سازی تولید سطح برگ از طریق میزان شاخص فیلوکرون (واحد دمایی بین ظهور گره یا برگ‌های متوالی) در ساقه اصلی تخمین زده می‌شود. در این مرحله سطح برگ بالقوه هر روز (PLA) به‌عنوان تابعی از تعداد گره یا برگ در ساقه اصلی در آن روز (MSNN) تخمین زده می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani et al., 2013):

$$PLA = PLACON \times MSNN^{PLAPOW} \quad (4)$$

PLACON و PLAPOW ضرایب ثابت معادله هستند. مقدار PLAPOW به تراکم وابسته است و مقدار آن طبق معادله زیر اصلاح می‌شود:

$$PLAPOW = PLAPOW25 \times (1.2 - 0.0018 \times PDEN) \quad (5)$$

که در آن PLAPOW25 مقدار PLAPOW در تراکم ۲۵ بوته و PDEN تراکم بوته می‌باشد. در مرحله دوم، شبیه‌سازی تولید سطح برگ از طریق حاصل ضرب مقدار ماده خشک تولیدی تخصیص یافته به برگ در سطح ویژه برگ (SLA) تخمین زده می‌شود. زوال برگ تحت تأثیر دمای کشنده بالا و پایین قرار می‌گیرد. تخمین پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی و زوال سطح برگ در جدول (۲) آورده شده‌اند.

### تولید و توزیع ماده خشک

میزان ماده خشک روزانه تولیدی (DBP) براساس تشعشع فعال فتوسنتزی (IPAR؛ مگاژول در مترمربع بر روز)، کسری از تشعشع دریافتی که صرف تولید ماده خشک در گیاه می‌گردد (FINT)، کارایی مصرف نور (RUE؛ گرم بر مگاژول) و ضریب اصلاحی تنش خشکی برای رشد (WSFG؛ بین صفر تا یک متغیر است) تخمین زده

می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani et al., 2013):

$$DBP = IPAR \times FINT \times RUE \times WSFG \quad (6)$$

کسر دریافتی از تشعشع فعال فتوسنتزی با استفاده از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور برآورد می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani et al., 2013):

$$FINT = 1 - \text{Exp}(-KPAR \times LAI) \quad (7)$$

میزان کارایی مصرف نور از معادله زیر محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani et al., 2013):

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (8)$$

در معادله فوق IRUE کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد و TCFRUE ضریب اصلاحی کارایی استفاده از تشعشع برای میانگین دمای روزانه هوا می‌باشد (جدول ۳).

سهم مقدار ماده خشک تولیدی روزانه اختصاص یافته به برگ، ساقه و دانه با توجه به ضرایب تخصیص ماده خشک به برگ، ساقه و دانه تعیین می‌شود (جدول ۳). وزن خشک تجمعی برگ، ساقه و دانه از جمع وزن خشک روزانه این اندام‌ها تخمین زده می‌شود. در شروع پرشدن دانه تا پایان پرشدن دانه علاوه بر این که کل ماده خشک تولیدی به دانه اختصاص داده می‌شود، مقداری از ماده خشک ذخیره شده در قبل از پرشدن دانه از طریق انتقال مجدد به سمت دانه می‌رود. کسری از ماده خشک تولیدی که به دانه انتقال می‌یابد (FRTRL) ۲۲ درصد ماده خشک کل (WTOP) است (جدول ۳).

### ۳.۲. ارزیابی مدل

پس از برآورد پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های حاصل از پژوهش حاضر و آزمایش دیگران (جدول‌های ۱ تا ۳)، کارایی مدل در پیش‌بینی رشدونمو گیاه باقلا با استفاده از یکسری داده‌های مستقل مورد ارزیابی قرار گرفت (Rahemi

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Oi - Pi)^2}{n - 1}} \quad (9)$$

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n(Oi - \bar{O})(Pi - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(Oi - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n(Pi - P)^2}} \quad (11)$$

که در آن  $O_i$  مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده و  $P_i$  مقادیر متغیر شبیه‌سازی شده یا پیش‌بینی شده توسط مدل هستند. مقادیر RMSE و CV پایین‌تر و  $r$  بالاتر نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی بالاتر مدل برای آن متغیر مذکور می‌باشد.

Karizaki *et al.*, 2015; Rahemi Karizaki & Foroughi, 2016; Hashemabadi & Sedaghatthoor, 2005; Zeinali *et al.*, 2014; Kiyankbakt *et al.*, 2015; Khadempir *et al.*, 2014; Hassanzadeh *et al.*, 2014; Hasanvand *et al.*, 2015; Rabiee & Jilani, 2014

برای ارزیابی مدل از معیارهای آماری از قبیل RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)،  $r$  (ضریب همبستگی)، CV (ضریب تغییرات) و نمودار ۱:۱ استفاده شد. این آماره‌ها برای هر متغیر به صورت زیر محاسبه شدند:

جدول ۲. تخمین پارامترهای سطح برگ برای گیاه باقلا رقم برکت

پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار	منبع
فیلوکرون	Phyl	درجه سانتی‌گراد در روز	۵۲	پژوهش حاضر
ضریب ارتباط‌دهنده سطح برگ بوته به تعداد گره در ساقه	PLACON	-	۰/۳	پژوهش حاضر
ضریب ارتباط‌دهنده سطح برگ بوته به تعداد گره در ساقه	PLAPOW25	-	۲/۷	پژوهش حاضر
سطح ویژه برگ	SLA	مترمربع بر گرم	۰/۰۳	پژوهش حاضر

جدول ۳. تخمین پارامترهای تولید و توزیع ماده خشک برای گیاه باقلا رقم برکت

پارامترها	علامت اختصاری	واحد	مقدار	منبع
دمای پایه برای تولید ماده خشک	TbRUE	درجه سانتی‌گراد	۲	Soltani & Sinclair, 2012
دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک	To1RUE	درجه سانتی‌گراد	۱۴	Soltani & Sinclair, 2012
دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک	To2RUE	درجه سانتی‌گراد	۳۰	Soltani & Sinclair, 2012
دمای سقف برای تولید ماده خشک	TcRUE	درجه سانتی‌گراد	۳۸	Soltani & Sinclair, 2012
ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی	KPAR	-	۰/۸۵	Rahemi Karizaki <i>et al.</i> , 2014
کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب قبل از شروع رشد دانه‌ها	IRUE	گرم بر مگاژول	۲/۵	Rahemi Karizaki <i>et al.</i> , 2014
ضریب توزیع ماده خشک به برگ‌ها از سبزشدن تا پایان رشد برگ (مرحله ۱)	FLF1A	گرم بر گرم	۰/۴۹	پژوهش حاضر
ضریب توزیع ماده خشک به برگ‌ها از سبزشدن تا پایان رشد برگ (مرحله ۲)	FLF1B	گرم بر گرم	۰/۰۹	پژوهش حاضر
وزن خشک تاج در نقطه عطف بین مرحله ۱ و ۲	WTOPL	گرم بر مترمربع	۴۴	پژوهش حاضر
ضریب تخصیص به برگ از پایان رشد برگ تا شروع رشد دانه	FLF2	گرم بر گرم	۰/۰۱۳	پژوهش حاضر
پتانسیل شاخص برداشت روزانه	PDHI	گرم بر گرم در روز	۰/۰۱۴	پژوهش حاضر
کسر ماده خشک انتقالی به دانه	FRTRL	-	۰/۲۲	Soltani & Sinclair, 2012
ضریب پرشدن دانه	GCC	گرم بر گرم	۱	Soltani & Sinclair, 2012

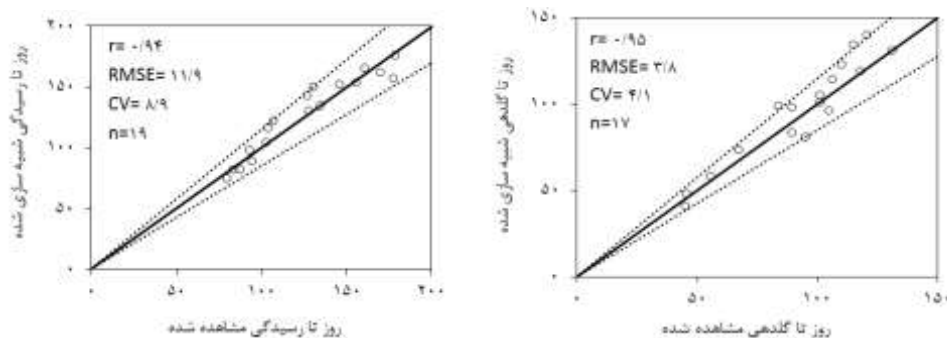
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. روز تا گلدهی و رسیدگی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گیاه باقلا نشان داد که مدل SSM\_iCrop با دقت خوبی مراحل روز تا گلدهی و رسیدگی را شبیه‌سازی کرده است، به طوری که نتایج حاصل از ارزیابی فنولوژی مدل نشان داد مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا گلدهی ۳/۸ روز و برای روز تا رسیدگی ۱۱/۹ روز است. ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای روز تا گلدهی ۴/۱ درصد و برای روز تا رسیدگی ۸/۱ درصد بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی است. هم‌چنین همبستگی بالای روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی مشاهده شده نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی گیاه باقلا در شرایط آب‌وهوایی گرگان موفق بوده است ( $r > 0/94$ ; شکل ۲).

نتایج Soltani & Sinclair (2015) به منظور شبیه‌سازی رشد، توسعه و عملکرد گندم در فصل‌های مختلف در منطقه گرگان نشان دادند مدل SSM (Soltani & Sinclair, 2012; CropSyst) نسبت به مدل‌های ساده APSIM (Keating et al., 2003) و DSSAT (Jones et al., 2003) کارایی و دقت بیشتری در

پیش‌بینی مراحل فنولوژی گندم دارد. در مدل SSM برای صفت روز تا گلدهی  $r=0/98$  و  $CV=4/5$ ،  $RMSE=4/8$  و برای روز تا رسیدگی  $r=0/96$  و  $CV=5/6$ ،  $RMSE=8/2$  مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج SSM-Legumes (Ghanem et al., 2015) در بررسی مدل در لبنان و سوریه برای گیاه عدس نشان داد دقت مدل در پیش‌بینی مراحل نمو در پژوهش حاضر بیش‌تر بوده است. در مطالعه Ghanem et al. (2015) مقدار RMSE برای روز تا گلدهی برابر با ۱۶/۷ روز بود که معادل ۱۱ درصد از میانگین زمان مشاهده شده تا گلدهی بود و همبستگی بین زمان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده تا گلدهی ۰/۶۸ بود. مقدار RMSE برای روز تا رسیدگی ۱۰/۷ روز (معادل شش درصد از میانگین زمان مشاهده شده تا رسیدگی) و ضریب همبستگی برای آن ۰/۸۸ بود. نتایج پژوهش Nehbandani et al. (2016) در زمینه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-Legume برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان، حاکی از کارایی قابل قبول مدل در پیش‌بینی روز تا گلدهی ( $CV=11$ ،  $RMSE=5/8$ ) و روز تا رسیدگی ( $CV=6$ ،  $RMSE=8/7$ ) بود. نتایج نشان داد دقت مدل SSM در پیش‌بینی مراحل نمو این گیاهان نسبت به دقت مدل باقلا در مطالعه حاضر تفاوت چندانی نداشت.



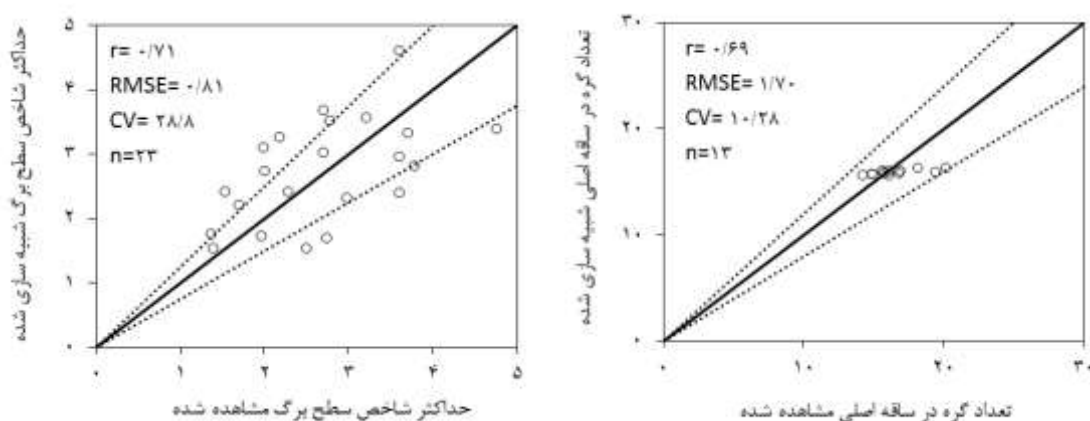
شکل ۲. مقادیر روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده. خط ۱:۱ و خطوط  $\pm 15$  درصد نیز در شکل نشان داده شده‌اند.

### ۲.۳. تعداد گره روی ساقه اصلی

جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تعداد گره در ساقه اصلی ۱/۷۰ است که حدود ۱۰ درصد میانگین تعداد گره مشاهده شده در ساقه اصلی است (شکل ۳). مقدار ضریب همبستگی برای تعداد گره مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده توسط مدل برابر ۰/۶۹ بود که نشان‌دهنده دقت نسبتاً خوب این مدل برای شبیه‌سازی تعداد گره می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشخص است، تقریباً همه داده‌های مربوط به تعداد گره در ساقه اصلی در بازه خطوط  $\pm 20\%$  قرار دارند که خود دلیلی بر دقت نسبتاً بالای این مدل در پیش‌بینی پارامتر موردنظر می‌باشد. نتایج پژوهش *Nehbandani et al.* (2016) نشان داد مدل SSM-Legume تعداد گره روی ساقه اصلی برای گیاه سویا را تا حدودی با دقت کم‌تری نسبت به تعداد گره روی ساقه اصلی برای گیاه باقلا در مطالعه حاضر برآورد کردند. آن‌ها مقدار RMSE و CV برای پیش‌بینی تعداد گره روی ساقه اصلی را ۱/۷ و ۱۳ درصد برآورد کردند.

### ۳.۳. شاخص سطح برگ

شکل (۳) شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ را با استفاده از مدل SSM\_iCrop نشان می‌دهد. جزر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای حداکثر شاخص سطح برگ ۰/۸۱ است که حدود ۲۸/۸ درصد میانگین سطح برگ مشاهده شده در زمان حداکثر شاخص سطح برگ است. مقدار ضریب همبستگی بین حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده شده در برابر شبیه‌سازی شده برابر ۰/۷۱ بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول این مدل برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ می‌باشد. *Soltani & Sinclair* (2011) در بررسی و توسعه مدل شبیه‌سازی نخود (SSM-Chickpea) نشان دادند که برای پیش‌بینی LAI مقدار RMSE معادل  $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  بود که تقریباً معادل ۴۸ درصد از میانگین LAI مشاهده شده بود. هم‌چنین ضریب همبستگی بین شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برابر ۰/۷۶ گزارش شد. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با تحقیق *Soltani & Sinclair* (2011) نشان می‌دهد که دقت مدل در پیش‌بینی شاخص سطح برگ در پژوهش حاضر بیش‌تر بوده است.



شکل ۳. مقادیر تعداد گره در ساقه اصلی و حداکثر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده. خط ۱:۱ و خطوط  $\pm 20\%$  و  $\pm 25\%$  درصد نیز در شکل نشان داده شده‌اند.



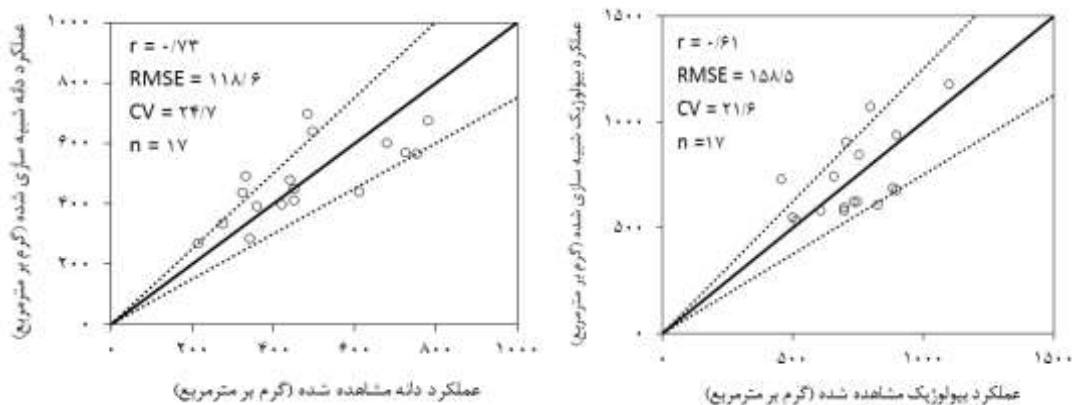
### ۳.۴. عملکرد بیولوژیک و دانه

شکل (۴) نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی مدل برای عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را با مدل SSM\_iCrop نشان می‌دهد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد بیولوژیک ۱۵۸/۵ گرم در مترمربع بود که ۲۱/۶ درصد میانگین بود. مقدار ضریب همبستگی بین عملکرد بیولوژیک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برابر ۰/۶۱ بود که حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک توسط مدل می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) برای مدل SSM\_iCrop مشخص است عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده از خط ۱:۱ می‌باشد که رابطه نشان‌دهنده دقت تقریباً خوب این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک می‌باشد. همان‌طوری که در شکل (۴) مشخص است مقادیر پیش‌بینی‌شده عملکرد بیولوژیک در بازه خطوط  $\pm 25$  درصد قرار دارند. قرارگیری اعداد پیش‌بینی‌شده در بین خطوط  $\pm 25$  خود دلیلی بر قابل قبول بودن دقت این مدل در پیش‌بینی پارامتر مورد نظر می‌باشد.

شکل (۴) رابطه خطی برازش‌یافته بین مقادیر عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده آن را به‌همراه مقادیر

ضریب همبستگی، ضریب تغییرات و جذر میانگین مربعات خطا برای باقلا توسط مدل SSM\_iCrop نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل از ارزیابی مدل، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۱۱۸/۶ گرم در مترمربع بود که معادل ۲۴/۷ درصد میانگین عملکرد مشاهده‌شده است. ضریب همبستگی (r) بین عملکرد مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ۰/۷۲ برآورد شد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بیش‌تر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 25$  درصد می‌باشند. بر این اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از مدل SSM رضایت‌بخش بود که نشان‌دهنده برآورد صحیح و دقیق پارامترهای گیاه باقلا برای مدل و همچنین تصدیق‌کننده کارایی مدل در تخمین مقدار عملکرد باقلا می‌باشد.

Soltani & Sinclair (2015) به‌منظور شبیه‌سازی رشد، توسعه و عملکرد گندم در فصل‌های مختلف در منطقه گرگان با استفاده از مدل SSM (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013) نشان داد ضریب همبستگی بین عملکردهای شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ۰/۶۷ و RMSE برابر ۳۰۸/۴ Kg/ha و معادل ۱۴/۳ درصد از میانگین عملکرد دانه مشاهده‌شده بود.



شکل ۴. عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه مشاهده‌شده در مقابل شبیه‌سازی‌شده.

خط ۱:۱ و خطوط  $\pm 25$  درصد نیز در شکل نشان داده شده‌اند.

تراکم بوته، نیاز آبی، نیاز کودی و تعیین الگوی مناسب کشت باقلا در مزرعه و تجزیه و تحلیل عملکرد آن در شرایط گرگان استفاده کرد.

#### ۵. تشکر و قدردانی

از مسئول آزمایشگاه‌های گروه زراعت دانشگاه جهت کمک به پیشبرد تحقیق حاضر، تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۷. منابع

- Ajam Norouzi, H., & Soltani, A. (2008). Prediction of flowering occurrence in faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 15(5), 65-77. (In Persian).
- Bagheri, V., & Torabi, B. (2015). A simple model for simulation of growth, development and yield in faba bean in province Golestan. *Journal of Crop Production*, 8(2), 133-152. (In Persian).
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., & Pickering, N.B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., & Thornton, P.K. (Editors), *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 99-128.
- Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., Ten Berge, H.F.M., & Van Laar, H.H. (2001). *ORYZA2000: Modeling Lowland Rice* (ISBN 971-22-0171-6). International Rice Research Institute / Wageningen University and Research Centre, Los Banos (Philippines) / Wageningen, pp. 235.
- Ebrahimi, N., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2017). Prediction of dry matter production and leaf area index in faba bean (*Vicia faba* L.) under different planting dates and densities. *Crops Impovment*, 20(1), 283-298. (In Persian). DOI: 10.22059/JCI.2018.237540.1791
- Ghanem, M. E., Marrou, H., Soltani, A., Kumar, S., & Sinclair, T. R. (2015). Lentil variation in phenology and yield evaluated with a model. *Agronomy Journal*, 107(6), 1967-1977. DOI: 10.2134/agronj15.0061

Marrou *et al.* (2014) نشان دادند که مدل SSM-Legumes برای گیاه لوبیا در جنوب غربی فرانسه ماده خشک کل را با RMSE برابر  $110 \text{ g.m}^{-2}$  و عملکرد دانه را با RMSE برابر  $41 \text{ g.m}^{-2}$  برآورد کرد. Soltani & Sinclair (2011) در مدل شبیه‌سازی نخود (SSM-Chickpea) نشان دادند مقدار RMSE برای عملکرد دانه برابر  $26 \text{ g.m}^{-2}$  (۱۵ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده) بود. نتایج پژوهش Nehbandani *et al.* (2016) با استفاده از مدل SSM-Legume برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان نشان داد این مدل عملکرد دانه را با  $RMSE=48$  و  $CV=15$  برآورد کرد.

#### ۸. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، پارامترهای مورد نیاز مدل iLegume-SSM برای گیاه باقلا رقم برکت براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای برآورد شد. سپس ارزیابی مستقل مدل با استفاده از آزمایش‌هایی که از آنها برای برآورد پارامتر استفاده نشده بود، انجام شد. با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر و مطالعه دیگران، ارزیابی مدل حاکی از دقت قابل قبول مدل برای پیش‌بینی فنولوژی، شاخص سطح برگ و تعداد گره در ساقه اصلی، عملکرد بیولوژیک و عملکرد نهایی گیاه باقلا بود. البته با توجه به ماهیت صفات مورد ارزیابی، بیش‌ترین دقت پیش‌بینی مربوط به فنولوژی ( $r=0/95$ ,  $CV=4/1$ ,  $RMSE=3/8$ )، برای مرحله گلدهی و  $r=0/94$ ,  $CV=8/9$ ,  $RMSE=11/9$  و کم‌ترین دقت پیش‌بینی مربوط به سطح برگ ( $r=0/71$ ,  $CV=28/8$ ,  $RMSE=0/81$ ) و  $r$  برای دقت پیش‌بینی عملکرد به ترتیب  $118/3$ ،  $24/7$  و  $0/71$  برآورد شد. به‌طور کلی، می‌توان استنباط کرد که از نتایج ارزیابی به‌دست‌آمده برای مدل SSM\_iCrop می‌توان برای تعیین مدیریت مناسب از لحاظ زمان کاشت،

- Hasanvand, H., Siadat, A., Moradi Telavat, M.R. Mussavi, H., & Karaminejad, A.H. (2015). Yield and some morphological characteristics of two faba bean (*Vicia faba* L.) cultivars to different sowing dates in Ahwaz region. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(2), 79-89. (In Persian).
- Hashemabadi, D., & Sedaghatthoor, S. (2005). Study of mutual effect of the sowing date and plant density on yield and yield components of winter *Vicia faba* L. *Journal of Agricultural Sciences*, 12(1), 136-142. (In Persian).
- Hassanzadeh, A., Rahemi Karizaki, A., Nakhzari Moghadam, A., & Biabani, A. (2014). The combined effect of terminal heat the end of growth season and competition between plants on phenology, yield and components yield in faba bean. *Journal of Crop Production*, 6(4), 151-163. (In Persian).
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, & J.T. Ritchie. (2003). DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Lepse, L., Fernández, J.A., Vagen, I.M., Rewald, B., Alsiña, I., Kronberga, A., Balliu, A., Olle, M., Bodner, G., Dubova, L., Rosa, E. & Savvas, D. (2018). Faba bean cultivation – revealing novel managing practices for more sustainable and competitive European cropping systems. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1115. DIO: 10.3389/fpls.2018.01115
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., & Smith, C.J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4), 267-288. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Khadempir, M., Zeinali, E., Soltani, A., & Torani, M. (2014). Study of leaf area index and dry matter accumulation and partitioning trend in two bean cultivars under inter-row spacing and planting date. *Applied Research of Plant Ecophysiology*, 1(3), 15-36. (In Persian).
- Kiyabakht, M., Zeinali, E., Siahmarguee, A., Sheikh, F., & Pouri, G.M. (2015). Effect of sowing date on grain yield and yield components and green pod yield of three faba bean cultivars in Gorgan climatic conditions. *Journal of Crop Production*. 8(1), 99-119. (In Persian).
- Manschadi, A. M., Christopher, J. & Hammer, G. L. (2006). The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional Plant Biology*, 33, 823-837. DOI: 10.1071/FP06055
- Marrou, H., Sinclair, T. R., & Metral, R. (2014). Assessment of irrigation scenarios to improve performances of Lingot bean (*Phaseolus vulgaris*) in southwest France. *European Journal of Agronomy*, 59, 22-28. DOI: 10.1016/j.eja.2014.05.006
- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., & Freebairn, D.M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agricultural System*, 50, 255-271. DIO: 10.1016/0308-521X(94)00055-V
- Meinke, H., & Hammer, G.L. (1995). A peanut simulation model. II: Assessing regional production potential. *Agronomy Journal*, 87, 1093-1099.
- Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raisi, S., & Najafi, R. (2016). Parameterization and evaluation of SSM\_iLegume model for prediction of growth and development of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 22(3), 1-26.
- O'Leary, G. J. & Connor, D. J. (1998). A simulation study of wheat crop response to water supply, nitrogen, stubble retention and tillage. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49, 11-19. DOI: 10.1071/A97020
- Rabiee, M., & Jilani, M. (2014). Effect of the planting date, row spacing and seed rate on grain yield and protein yield of faba bean (*Vicia faba* L.) in Rasht. *Iranian Journal of Pulses Research*, 5(1), 9-22. (In Persian).
- Rahemi Karizaki, A., & Foroughi, A. (2016). Seed filling trend of faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by planting date and density. *Journal of Ecophysiology*, 1(37), 89-102. (In Persian).
- Rahemi Karizaki, A., Hassanzadeh, A., Biabani, A., & Foroughi, A. (2015). Allometric relationship between leaf area and vegetative characteristics in broad bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Ecophysiology*, 7(23), 156-164. (In Persian).
- Rahemi-Karizaki A., Hassanzadeh A., Nakhzari-Moghaddam, A., & Biabani A. (2014). Estimation of extinction coefficient and radiation use efficiency in *Vicia Faba*. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 1(2), 1-14. (In Persian).
- Sinclair, T. R. (2000). Model analysis of plant traits leading to prolonged crop survival during severe drought. *Field Crops Research*, 68, 211-217. DOI: 10.1016/S0378-4290(00)00125-8

- 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: 10.1016/j.fcr.2007.06.003
- Soltani, A. & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling physiology of crop development, growth and yield*. Cabi. 322p.
- Soltani, A. (2009). *Mathematical Modeling in Field Crops*. Mashhad Univ. Press, 175p. (In Persian)
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.06.021
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.10.019
- Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J., & Zeinali, E. (2006a). Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crops Research*, 99, 1-13. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.02.004
- Soltani, A., Khooe, F.R., Ghassemi-Golezani, K., & Moghaddam, M. (2000). Thresholds for chickpea leaf expansion and transpiration response to soil water deficit. *Field Crops Research*, 68, 205-210. DOI: 10.1016/S0378-4290(00)00122-2
- Soltani, A., Khooe, F.R., Ghassemi-Golezani, K., & Moghaddam, M. (2001). A simulation study of chickpea crop response to limited irrigation in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 49, 225-237. DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00143-8
- Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T.R. (2013). SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711-740. DOI: 10.22069/IJPP.2013.1266
- Soltani, A., Robertson, M.J. Torabi, B., Yousefi-Daz, M., & Sarparast, R. (2006b). Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agriculture and Forest Meteorology*, 138, 156-167. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.04.004
- Spitters, C.J.T., & Schapendonk, A.H.C.M. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil*, 123, 193-203. DOI: 10.1007/BF00011268
- Stockle, C.O., Donatelli, M., & Nelson, R.L. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, 289-307. DOI: 10.1016/s1161-0301(02)00109-0
- Torabi, B., & Soltani, A. (2013a). A simple model for simulating corn S.C. 704 yield. *Journal of Crop Production and Processing*, 3(7), 47-58. (In Persian).
- Torabi, B., & Soltani, A. (2013b). Quantifying response of chickpea emergence to temperature. *Journal of Crop Production and Processing*, 2(6), 109-119. (In Persian).
- Yin, X., & van Laar, H.H. (2005). Crop systems dynamics: an ecophysiological simulation model of genotype-by-environment interactions. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands, 156p.
- Zeinali, E., Soltani, A., Toorani, M., & Khadempir, M. (2014). Allometric relationships between leaf area and vegetative characteristics in faba bean. *Journal of Plant Production*, 20(4), 1-21. (In Persian).