

Calibration and validation of SSM-iCrop2 model for simulate the growth and yield of Lentil (*Lens culinaris*)

Z. Amani¹, F. Mondani^{1*}, M. Ghobadi¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding Author: f.mondani@razi.ac.ir

Introduction

Lentil is the third most important legume in the cold-season legume family. Legumes, as the second most important food source after cereals, account for about 613000 hectares of the annual cultivated area of crops in Iran. In terms of cultivated area, lentil is in third place among legumes after chickpeas and beans, and the provinces of Hamedan, Lorestan, Kerman, Fars and Bushehr are the main centers of production of this plant. Crop growth simulation models can play an important role in allowing farmers and planners to make decisions about the feasibility of systems (crops and technologies). These useful tools greatly facilitate the optimization of crop production and management strategies. Crop growth models also provide a useful tool in researches to simulate potential growth and yield. The aim of this study was to calibrate and validate the SSM-iCrop2 model for simulation of growth and yield of lentil in order to investigate the effect of sowing date and different irrigation under Kermanshah and Azna regions using the sub models associated with phenology, dry matter production and distribution and the changes in leaf area.

Materials and Methods

This study was conducted at Campus of Agricultural and Natural Resources, Razi University and in a leading farmer's farm in the Azna region. The SSM-iCrop2 model was used. This model has been tested and proved for a wide range of crops. This model requires limited and easily available input information. In order to collect the necessary information for model calibration and evaluation, experiments were conducted using a split factorial design with three replications in 2022 and 2023. In this way, one experiment was conducted to extract the parameters required for model calibration under the Kermanshah region in 2022, and then two other experiments were conducted to extract the information required to model validation under the Kermanshah and Azna regions in 2023. Treatments included supplementary irrigation (no irrigation, one irrigation at flowering stage, and two irrigations at flowering and seed filling stages) as the main factor, sowing date (February 17, March 21, March 20 for Kermanshah, March 6, 16, and 24 for Azna), and cultivar (Bile Savar, Kimia, and Gachsaran) as secondary factors. Measured data of phenological development stages and grain yield were used to evaluate the model. Model evaluation indices included linear regression fitting between observed and simulated data and their comparison with the slope of the 1:1 line, root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (nRMSE), mean error of approximation (MBE), and Wilmot's agreement index (d).

Results and Discussion

The model calibration results indicated appropriate accuracy of the plant parameter values used in the model structure, which led to very accurate prediction of growth and yield characteristics. The evaluation results showed acceptable accuracy of SSM-iCrop2 in simulating the process of changes in developmental stages and grain yield of cultivars in the studied treatments. The RMSE value of the developmental stage from sowing to physiological maturity in Kermanshah for the cultivars Bileh Savar, Kimia and Gachsaran was 2.5, 2.5 and 3.4 days, respectively, and in Azna it was 12.9, 12.5 and 11.8 days, respectively. The RMSE value of grain yield in Kermanshah ranged from 1.4 to 2.15 and from 4 to 7 g/m² in Azna.

Several studies have been conducted on the evaluation of the SSM-iCrop2 model in simulating grain yield in different crops. Among them is the research on soybean by Nehbandani et al. (2015), who reported satisfactory results regarding the model evaluation. They stated that this model can be used to determine the most suitable sowing and harvesting dates, grain yield, and other phenological stages of soybean.

Conclusion

The results indicated that the parameters related to phenology and grain yield of lentil cultivars were estimated with high accuracy. The model was able to successfully simulate the growth and yield of lentil despite different sowing dates and irrigation regimes, with a small number of available parameters. The results of the evaluation of the SSM-iCrop2 model showed that this model can simulate the development stages and grain yield of lentil in the Kermanshah and Azna regions with high accuracy. Therefore, according to these evaluation results, the SSM-iCrop2 model can be used to predict the growth and yield of lentil. This model can be used in studies simulating the yield of lentil in different climates and under different management conditions.

Keywords: Lentil cultivars, parameterization, simulation, grain yield, phenology

واسنجی و تعیین اعتبار مدل SSM-iCrop 2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris* Medik.)

زینب امانی^۱، فرزاد مندنی^{۱*}، مختار قبادی^۱

۱- گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

نویسنده مسئول: f.mondani@razi.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر به منظور تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو عدس انجام شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های لازم برای واسنجی و ارزیابی مدل، آزمایش‌هایی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنا طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ اجرا گردید. تیمارها شامل رژیم آبیاری (بدون آبیاری، یکبار آبیاری در مرحله گلدهی و دوبار آبیاری در مراحل گلدهی و پر شدن دانه) به عنوان عامل اصلی، تاریخ کشت (۲۷ بهمن، ۹ اسفند، ۲۱ اسفند برای کرمانشاه و ۶، ۱۶ و ۲۴ اسفند برای ازنا) و رقم (بیله سوار، کیمیا و گچساران) به عنوان فاکتور فرعی بود. نتایج واسنجی مدل حاکی از دقت مناسب مقادیر پارامترهای گیاهی بکار رفته در ساختار مدل بود که منجر به پیش‌بینی بسیار دقیق ویژگی‌های رشد و عملکرد شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان از دقت قابل قبول SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی روند تغییرات مراحل نمو و عملکرد دانه ارقام در تیمارهای مورد بررسی داشت. مقدار RMSE مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در کرمانشاه برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۵/۲، ۴/۳ و ۱۲/۹، ۱۲/۵ و ۱۱/۸ و روز بود. مقدار RMSE عملکرد دانه در کرمانشاه از ۴/۱ تا ۱۵/۲ و ازنا از ۴ تا ۷ گرم در متر مربع بود. بنابراین می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی وضعیت مدیریت زراعی و تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد عدس در شرایط کرمانشاه و ازنا استفاده کرد.

کلیدواژه: شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مراحل نمو

مقدمه

در بین حبوبات، عدس (*Lens culinaris* Medik.) یک گیاه دانه‌ای یکساله است که از ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد به عنوان اولین محصول اهلی شده است (Ersline, Sarker, & Kumar, 2016). عدس یک محصول مغذی مهم است که به دلیل محتوای بالای مواد مغذی پرمصرف و کم‌مصرف، از جمله مواد معدنی، در سراسر جهان کشت و مصرف می‌شود (Benayad & Aboussaleh, 2021). سومین حبوبات مهم فصل سرد پس از نخود و نخودفرنگی در سراسر جهان است (Sehgal et al., 2021). کانادا با تولید ۲/۸۷ میلیون تن عدس در رتبه اول قرار دارد و تقریباً ۴۴ درصد از تولید جهانی را به خود اختصاص داده است و پس از آن هند، استرالیا، ترکیه و ایالات متحده قرار دارند. این پنج کشور ۸۲ درصد از کل تولید جهانی عدس را به خود اختصاص

داده‌اند (FAO, 2023). حبوبات به عنوان دومین منبع مهم غذایی بعد از غلات حدود ۶۱۳ هزار هکتار از سطح زیر کشت سالانه محصولات زراعی را در ایران تشکیل می‌دهند. از نظر سطح زیرکشت، عدس بعد از نخود و لوبیا جایگاه سوم را در بین حبوبات داشته و استان‌های همدان، لرستان، کرمان، فارس و بوشهر مراکز اصلی تولید این گیاه هستند (Ministry of Agriculture, 2023). پروتئین دانه عدس در مقایسه با دیگر حبوبات، مانند نخود کیفیت بالاتری دارد (Odero-Yeboah et al., 2022). کشت عدس به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی مواد آلی و توانایی تثبیت نیتروژن از طریق همزیستی، نقش مهمی در حفظ و بهبود حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند (Abraham, 2015).

برای افزایش بهره‌وری کشاورزی و سودآوری مزرعه، تعیین کمیت تعاملات بین خاک، رشد گیاه، عوامل محیطی و شیوه‌های مدیریتی بسیار مهم است. این امر به سیاست‌گذاران و کشاورزان در تصمیم‌گیری آگاهانه برای کاهش خطرات مرتبط با بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند (Banerjee). مدل‌سازی رشد گیاه به ما اجازه می‌دهد تا فرضیه‌های مختلفی را آزمایش کرده و آزمایش‌های مجازی در مورد فرایندهای رشد گیاه انجام دهیم که در غیر این صورت ممکن است این آزمایشات به مدت زمان طولانی در شرایط مزرعه نیازمند باشد. انواع مختلفی از مدل‌های رشد گیاه، با درجات مختلف پیچیدگی، بسته به هدف از کاربرد آن‌ها وجود دارد (Fourcaud et al., 2008). SSM¹ به گروهی از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی اطلاق می‌شود که ساخت آن‌ها به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد. در این زمان سینکلر مدلی برای رشد و نمو سویا تهیه کرد (Sinclair, 1986). طی سی سال بعد ساختار این مدل بهبود یافت و تقریباً برای همه گیاهان زراعی قابل استفاده شد (Soltani, Maddah, & Sinclair, 2013). این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک (سبز شدن، شروع موثر پر شدن دانه، پایان موثر پر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. مدل شبیه‌سازی محصول SSM iCrop2N یک مدل ساده شده از مدل‌های محصول SSM است که برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد محصولات مختلف در شرایط محیطی مختلف و برآورد مقیاس بزرگ تولید محصول به ویژه در ارزیابی اثرات اقلیمی مناسب است (Soltani et al., 2020). این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. مدل، شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا، خاک و مدیریتی استفاده می‌کند. این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌هرز را بر روی گیاه در نظر نمی‌گیرد. ساختار کلی مدل SSM به صورت مدل‌های ماژولار معرفی می‌شود که شامل چند زیر مدل اصلی است. زیر مدل فنولوژی^۲ که شامل مراحل فنولوژیک در مدل به عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. زیر مدل توسعه سطح برگ^۳ که تعیین کننده گسترش سطح برگ و شاخص سطح برگ است. گسترش و پیری برگ‌ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است. زیرمدل تولید ماده خشک^۴ که در آن تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تابش دریافت شده و دما تخمین زده می‌شود. زیرمدل تخصیص ماده خشک^۵ که شامل تقسیم ماده خشک بین برگ، ساقه،

¹ Simple Simulation Models

² Phenology sub-model

³ Leaf Area Development

⁴ Dry Matter Production

⁵ Partitioning/Allocation

ریشه و اندام زایشی است و زیر مدل عملکرد نهایی¹ که شامل تبدیل ماده خشک تجمع یافته به دانه یا اندام اقتصادی است (Soltani & Sinclair, 2012).

عملکرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به عوامل اقلیمی، خاکی، مدیریتی و ژنتیکی تا حدود زیادی به داده‌های ورودی و کیفیت پارامتریابی بستگی دارد (Manschadi et al., 2021). مدل‌های گیاهان زراعی از پارامترهای مختلف گیاهی و محیطی برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کنند و قبل از بکارگیری این مدل‌ها بایستی آن‌ها را پارامتریابی و سپس ارزیابی نمود (Hasiao et al., 2009). پارامتریابی عبارتست از تعیین پارامترها و ضرایب مدل برای منطقه مورد مطالعه به منظور تصحیح مراحل فنولوژی و عملکرد (Soltani and Sinclair, 2012). در تحقیقی که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی در ایران انجام گردید گزارش شد که می‌توان از این مدل برای بررسی سیستم‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مدیریت مزارع لوبیا با اطمینان استفاده کرد (Mohammadi et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر که به منظور تخمین پارامترهای SSM-iCrop و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو گیاه باقلا در گرگان انجام شده بود، نتایج نشان داده شد که با استفاده از پارامترهای بدست آمده، ارزیابی مدل حاکی از دقت قابل قبول مدل برای پیش‌بینی فنولوژی، شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گیاه باقلا است (Torabi et al., 2020). مدل SSM-iCrop به واسطه دارا بودن مزیت‌هایی مانند تسهیل در آزمون، کاربرد و درک تفسیر و نتایج و نیاز به حداقل ورودی‌ها در تجزیه و تحلیل عملکرد کاربرد بالایی دارد (Rahban et al., 2020). بنابراین پژوهش حاضر با هدف تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop2 برای گیاه عدس (ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران) و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشد و نمو این گیاه در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنای انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور تهیه داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2، پژوهش‌هایی در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی و شهرستان ازنای در مزرعه یک کشاورز پیشرو طی سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام گرفت. به این صورت که یک آزمایش به منظور استخراج پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ و سپس دو آزمایش دیگر جهت استخراج اطلاعات مورد نیاز برای تعیین اعتبار مدل تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنای در سال ۱۴۰۱ اجرا گردید. موقعیت منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهرستان کرمانشاه با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر بود. آنالیز خاک قبل از کاشت در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ انجام شد و در نهایت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در هر دو محل آزمایش مشخص گردید (جدول ۱). شهرستان

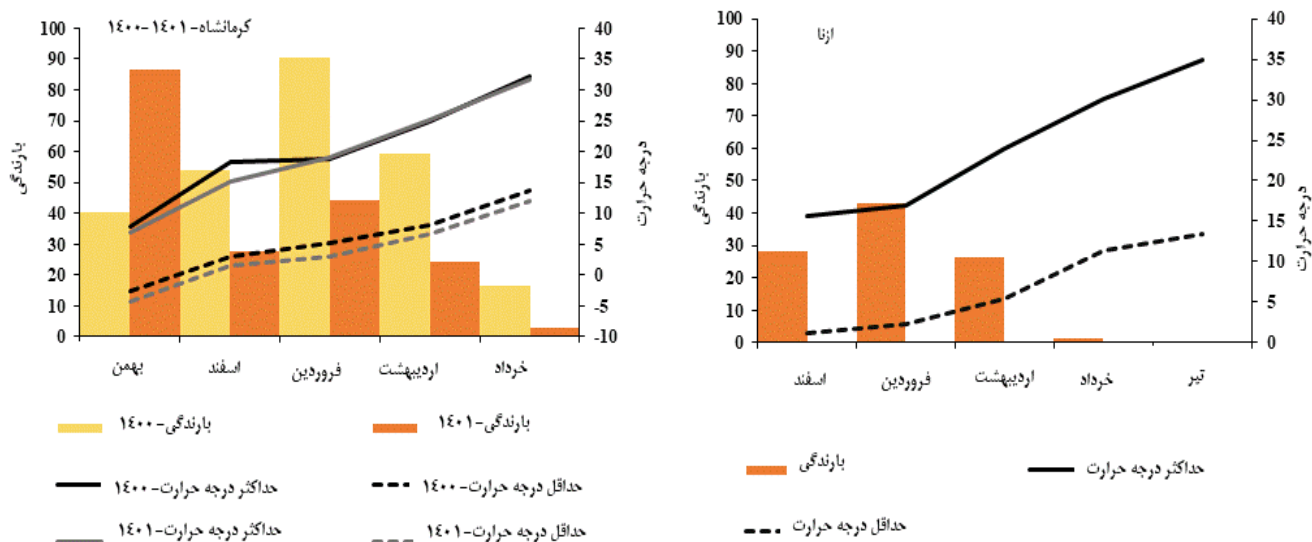
¹ Yield Formation

کرمانشاه از نظر اقلیمی به عنوان اقلیم معتدل و نیمه خشک (مدیترانه‌ای) با میانگین دمای ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد محسوب می‌شود. شهرستان ازنا نیز با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۸۷۰ متر است. اطلاعات هواشناسی مناطق مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در محل اجرای آزمایش

Table 1. Soil physical and chemical traits in the region of experiment

منطقه Region	عمق Depth	کربن آلی OC (%)	شیب Slope	حد ظرفیت زراعی DUL (m)	مقدار آب در زمان اشباع SAT (m)	شماره منحنی خاک CN	نقطه پژمردگی LL (m)	زهکشی DRAINF
کرمانشاه Kermanshah	30	1.50	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
	60	1.10	10	0.32	0.49	79	0.22	0.55
ازنا Azna	30	1.8	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55
	60	1.2	10	0.35	0.45	79	0.23	0.55



شکل ۱- میانگین حداقل و حداکثر دماهای ماهانه و بارندگی تجمعی در طول فصل رشد عدس در کرمانشاه و ازنا

Figure 1- Average of minimum and maximum monthly temperatures and cumulative precipitation during the lentil growing season in Kermanshah and Azna

آزمایشات بصورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری تکمیلی (بدون آبیاری، یکبار آبیاری تکمیلی در مرحله گلدهی و دوبار آبیاری تکمیلی در مراحل گلدهی و شروع غلاف‌دهی) به عنوان فاکتور اصلی و تاریخ کشت و رقم به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. ارقام مورد مطالعه شامل سه رقم بیله سوار (ILL6037)، کیمیا (FLIP 92-12L) و گچساران بودند. ارقام در جدول شماره ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۲- خصوصیات ارقام مورد بررسی

Table 2. Characteristics of the studied cultivars

رقم Cultivar	طول دوره رشد Growth period (Day)	پتانسیل عملکرد Yield potential (kg.h ⁻¹)	وزن صد دانه 100-seed weight (gr)
کیمیا Kimiya	90-110	1263	5
بیله سوار Bilehsavar	90-110	1196	5.7
گچساران Gachsaran	90-110	1200	5

کشت به صورت بهاره انجام گرفت. تاریخ کشت در منطقه کرمانشاه بر مبنای بارندگی موثر (اولین بارندگی کافی برای جوانه زنی و استقرار گیاه) در تاریخ‌های ۲۷ بهمن، ۹ اسفند و ۲۱ اسفند و در منطقه ازنا بر مبنای بارندگی موثر شامل ۶ اسفند، ۱۶ اسفند و ۲۴ اسفند بود. آماده سازی و تسطیح زمین قبل از کشت با توجه به تاریخ کشت با استفاده از گاوآهن قلمی انجام گرفت. ابعاد هر کرت فرعی ۲/۲۵ در ۳ متر، فاصله روی ردیف، ۲/۵ سانتی‌متر، فاصله بین ردیف، ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بین رژیم‌های آبیاری، ۳ متر در نظر گرفته شد. هر کرت فرعی شامل چهار ردیف کشت بود. سپس در تاریخ‌های مورد نظر، کشت بذر ضد عفونی شده (مانکوزب با غلظت دو در هزار) عدس به صورت دستی در عمق ۳ سانتی متری کشت شد. کنترل علف‌های هرز به صورت وجین دستی انجام گرفت. کود اوره به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت (۶ برگچه‌ای و قبل از گل‌دهی) تقسیم گردید. آبیاری تکمیلی توسط لوله پلی اتیلن و نوار تیپ و به صورت قطره‌ای در مراحل نمو گلدهی و پر شدن دانه انجام گرفت. حجم آب ورودی به هر کرت توسط کنتور اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

جدول ۳- میزان آب آبیاری و زمان مصرف آب آبیاری تکمیلی برای مناطق کرمانشاه و ازنا

Table 3- Irrigation water amount and time of supplementary irrigation consumed for Kermanshah and Azna regions

منطقه region	تاریخ کشت Sowing Date	زمان اعمال تیمار آبیاری (روز پس از کاشت) Irrigation timing (day after planting)		حجم آبیاری (میلی متر) Irrigation volume (mm)	
		یکبار آبیاری Single-irrigation	دوبار آبیاری Double-irrigation	یکبار آبیاری Single-irrigation	دوبار آبیاری Double-irrigation
کرمانشاه Kermanshah	۲۷ بهمن February 16	75	80	46.4	62.2
	۹ اسفند February 28	79	85	46.7	64
	۲۱ اسفند March 12	64	72	44.6	66.7
	۶ اسفند February 25	80	93	35	57.6
	۱۶ اسفند March 6	81	91	37	59.3
ازنا Azna	۲۴ اسفند March 14	68	81	41	59.3

برآورد نیاز آبی گیاه با استفاده از تشتک تبخیر از فرمول زیر محاسبه گردید.

$$ET = Kc * Kpan * ETpan \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه ET تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر در روز)، ETpan تبخیر و تعرق از تشتک (میلی‌متر در روز)، kpan ضریب تشت (برای کرمانشاه ۰/۷ و برای ازنا ۰/۸) و kc ضریب گیاهی بر اساس مرحله رشد گیاه است (Ghamarnia, Palash & Bashipour, 2022). پس از محاسبه مقدار روزانه ET، مجموع آن در طول هر مرحله رشدی (مرحله گل‌دهی و مرحله پر شدن غلاف) به‌عنوان نیاز آبی گیاه در آن مرحله در نظر گرفته شد. مقدار ضریب Kc برای کرمانشاه برای دوره گلدهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۱/۰۸ (Saremi, Farhadi, Maleki, Farhadi, 2015) بود و برای ازنا برای دوره گلدهی و پر شدن بذر به ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۱/۱۹ (FAO, 56) بود.

پس از سبز شدن (مرحله شش برگه‌ای) تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک، در مراحل مختلف نمو، از هر کرت به صورت تصادفی سه بوته برداشت شد. بعد از رسیدگی فیزیولوژیک (قهوه‌ای رنگ شدن غلاف‌ها) و انتهای فصل رشد، جهت برداشت نهایی دو ردیف از هر کرت به صورت کف برداشت شد. سپس جهت تعیین وزن خشک کل ابتدا نمونه‌ها به مدت زمان ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و سپس توسط ترازو توزین گردیدند. جهت تعیین عملکرد دانه، غلاف‌ها جدا شده و سپس کاه و کلش آن تمیز گردیده و سپس توزین شد. برای جلوگیری از ریزش و پوک شدن غلاف‌ها زمانی که رطوبت دانه حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد بود برداشت انجام شد. سطح برگ با استفاده از نرم افزار Microvision j محاسبه گردید. مساحت برگ‌های هر بوته با تصویر برداری از آن‌ها محاسبه و شاخص سطح برگ در هر تیمار با تمهیم این مقدار در واحد متر مربع محاسبه شد. در پایان با استفاده از داده‌های حاصل پارامترهای گیاهی مدل تخمین زده شدند.

توصیف مدل

مدل SSM- iCrop2 یک مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی و نسخه ساده شده‌ای از مدل اصلی SSM است (Soltani, Maddah, & Sinclair, 2013). این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک (سبز شدن، شروع موثر پر شدن دانه، پایان موثر پر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. این مدل دارای کد باز بوده و از محیط اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. در این مدل شبیه‌سازی‌ها به صورت روزانه انجام می‌گیرد. این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌هرز را بر رشد و نمو گیاه شبیه‌سازی نمی‌کند. مراحل نمو فنولوژیک در مدل به عنوان تابعی از دما، طول روز و تنش کمبود آب است. گسترش و پیری برگ‌ها تابعی از دما، مواد فتوسنتزی فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن است (Soltani et al., 2013). تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تابش دریافت شده و دما تخمین زده می‌شود. در مدل SSM به دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیری برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، شبیه‌سازی نمو فنولوژیک و تولید ماده خشک نیاز به پارامترهای ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد (Soltani et al., 2020).

ورودی‌های مدل شامل اطلاعات روزانه آب و هوا (دمای حداکثر و حداقل بر حسب (درجه سانتی‌گراد)، تشعشع (بر حسب مگاژول در متر مربع) و بارندگی (بر حسب میلی‌متر)، اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه (عرض جغرافیایی، کمبود فشار بخار، غلظت دی‌اکسید کربن و تغییرات دما و بارندگی)، پارامترهای گیاهی مرتبط با فرایندهای مختلف نمو فنولوژیک، تغییرات سطح برگ، تولید ماده خشک، تشکیل عملکرد و روابط آب و گیاه و اطلاعات مربوط به خاک منطقه مورد نظر از جمله عمق خاک، ضریب الییدو، فاکتور زهکشی، شماره خاک برای محاسبه روان‌آب، مقدار آب در زمان اشباع (بر حسب میلی‌متر)، مقدار آب در زمان ظرفیت زراعی (بر حسب میلی‌متر) و مقدار آب قابل دسترس (بر حسب میلی‌متر) است. اطلاعات خاکشناسی از نتایج آزمون خاک محل اجرای تحقیق استخراج شد (جدول ۱).

واسنجی پارامترهای مدل SSM-iCrop2

برای واسنجی مدل، پارامترهای مورد نیاز از اطلاعات آزمایش اجرا شده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ استخراج شد (جدول ۴). به منظور واسنجی مدل اطلاعات ورودی شامل جزئیات مدیریت زراعی (سال و تاریخ کاشت، زمان و مقدار آبیاری) و ویژگی‌های خاک و پارامترهای مورد نظر برای منطقه اجرای آزمایش که از نمونه برداری خاک مندرج در جدول ۱ استخراج گردید استفاده شد. داده‌های هواشناسی روزانه (حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی و میزان بارش) برای منطقه مورد نظر از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. با استفاده از برنامه Srad-Calc (Soltani and Sinclair, 2012) میزان تشعشع خورشیدی بر اساس ساعت آفتابی و روز از سال محاسبه شد. بر اساس منابع مربوط به مدل SSMiCrop2، پارامترهای گیاهی زیادی در شبیه‌سازی مدل به کار می‌روند. اما با توجه به ماهیت مدل و نقش فیزیولوژیکی این عوامل در رشد و عملکرد گیاه، اثر آن‌ها در نهایت از طریق کاهش سه پارامتر اصلی اعمال شده و باعث افت رشد و عملکرد گیاه می‌شود. این سه پارامتر عبارت از حداکثر شاخص سطح برگ (LAIMX)، حداکثر شاخص برداشت (HLMX) و واحد دمای کاشت تا برداشت (tu HAR) است (Soltani et al., 2020). ابتدا روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (زمانی که دانه‌ها کاملاً شکل گرفته و غلاف‌های یک سوم پایینی گیاه به رنگ قهوه ایی است و غلاف‌ها هنگام تکان دادن صدا می‌دهند) در مزرعه برای هر رقم و تیمار ثبت شد (Erskin, Muehlbauer & Short, 1990) و سپس مقدار میانگین درجه روز رشد طبق فرمول (رابطه ۲) محاسبه شد و به عنوان پارامتری برای tu HAR وارد مدل شد تا روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک با مزرعه منطبق شود. برای انطباق میزان وزن خشک کل نیز باید حداکثر شاخص سطح برگ در مدل برای هر رقم و تیمار وارد شود در نهایت میزان عملکرد دانه از طریق حداکثر شاخص برداشت تعیین گردد.

$$GDD = T_{base} - \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

جدول ۴- پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل

Table 4. Attributes used in model calibration

Table 4. Attributes used in model calibration												
تاریخ کاشت Sowing date	حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index (LAIMX)				حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index (HLMX)			واحد دمایی کاشت تا برداشت Thermal units from planting to harvest (tuHAR)				
	آبیاری Irrigation	کیمیا Kimiya	بیله سوار Belehavar	گچساران Gachsaran		کیمیا Kimiya	بیله سوار Belehavar	گچساران Gachsaran		کیمیا Kimiya	بیله سوار Belehavar	گچساران Gachsaran
۲۷ بهمن February 16th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.5	2.3		0.28	0.28	0.27		1417	1405	1444
	یکبار آبیاری One irrigation	2.4	2.6	2.5		0.29	0.29	0.28		1417	1405	1444
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.6	2.7	2.6		0.29	0.29	0.28		1417	1405	1444
۶ اسفند February 28th	بدون آبیاری No irrigation	2.2	2.3	2.1		0.28	0.28	0.27		1470	1459	1495
	یکبار آبیاری One irrigation	2.3	2.4	2.2		0.29	0.29	0.28		1470	1459	1495
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.4	2.5	2.2		0.29	0.29	0.28		1470	1459	1495
۲۱ اسفند March 12th	بدون آبیاری No irrigation	2.1	2.2	2		0.28	0.28	0.27		1502	1490	1526
	یکبار آبیاری One irrigation	2.2	2.3	2.1		0.29	0.28	0.28		1502	1490	1526
	دو بار آبیاری Two irrigations	2.3	2.3	2.2		0.29	0.28	0.28		1502	1490	1526

تعیین اعتبار مدل

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن‌ها با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده^۲ (nRMSE)، میانگین خطای تقریبی^۳ (MBE) و شاخص توافق ویلموت^۴ (d) بود که از طریق روابط ۳ تا ۶ محاسبه شدند. برای ارزیابی مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده مراحل نمو فنولوژیک (گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) و عملکرد دانه در آزمایش‌های اجرا شده تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا در سال ۱۴۰۱ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(s_i - o_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

1. Root mean square error
2. Normalized root mean squared error
3. Mean bias error
4. Willmott index of Agreement

$$d=1-\frac{\sum_{i=0}^n (S_i-O_i)^2}{\sum_{i=0}^n (|S_i-\bar{O}|+|O_i-\bar{O}|)^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$nRMSE(\%)=\sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(S_i-O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$MBE=\sum_{i=0}^n \frac{(S_i-O_i)}{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

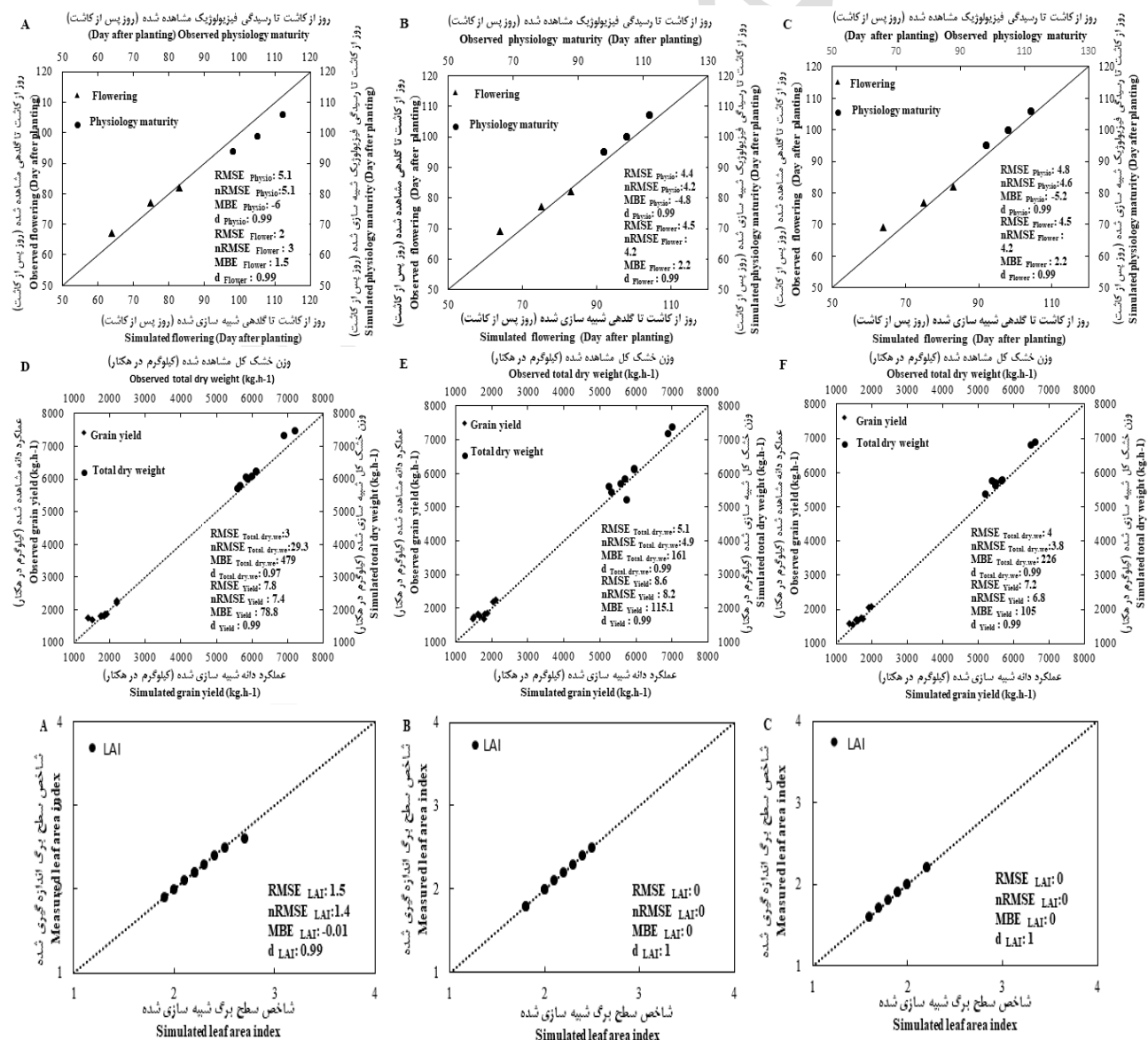
در روابط، n تعداد مشاهدات، O_i مقادیر مشاهده شده، S_i مقادیر شبیه‌سازی شده و O میانگین مقدار مشاهده شده برای مشاهده i ام است (Willmott, 1982). مقادیر شاخص ویلموت می‌توانند بین ۰ و ۱ متغیر باشد، مقدار ۱ نشانگر توافق کامل بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است. جذر میانگین مربعات خطا نیز اطلاعاتی در مورد انحراف کلی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارائه می‌دهد. میانگین مربعات خطای نرمال شده (%) تفاوت نسبی داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده را نشان می‌دهد و با نزدیک شدن به صفر دقت شبیه‌سازی مدل افزایش می‌یابد. مقادیر مثبت میانگین خطای تقریبی نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیش‌تر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن بیانگر این است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کم‌تر از مقادیر واقعی است. علاوه بر این، تطابق خط ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل توانسته صفت موردنظر را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

مراحل فنولوژی نقش بسزایی در سیستم مدیریت کشت دارند و به همین دلیل، تعیین دقیق پارامترهای مرتبط با فنولوژی اهمیت زیادی در کارهای شبیه‌سازی دارند (Nehbandani et al., 2015). نتایج واسنجی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که پارامترهای تخمین زده شده (جدول ۴) در ساختار مدل از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک و عملکرد دانه ارقام عدس مورد بررسی در تیمارهای آزمایش برخوردار است (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو از کاشت تا گلدهی رقم کیمیا به ترتیب برابر با ۲ روز، ۳ درصد میانگین مشاهدات و ۱/۵، رقم بیل سوار به ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ و رقم گچساران به ترتیب برابر با ۴/۵ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۲/۲ بود. در هر سه رقم و شرایط تیمارهای آبیاری شاخص ویلموت (d) برابر با ۰/۹۹ بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطای تقریبی برای مراحل نمو از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای رقم کیمیا به ترتیب برابر با ۵/۱ روز، ۵/۱ درصد میانگین مشاهدات و ۶-، برای رقم بیل سوار به ترتیب برابر با ۴/۴ روز، ۴/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۴/۸- و رقم گچساران به ترتیب برابر با ۴/۸ روز، ۴/۶ درصد میانگین مشاهدات و ۵/۲- بود. شاخص ویلموت (d) برای مراحل نمو از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی در شرایط تیمارهای آزمایش برابر با ۰/۹۹ بود. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند (شکل ۲).

اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه رقم کیمیا بین ۸ تا ۹۳ کیلوگرم در هکتار، رقم بیل به سوار بین ۱۹ تا ۱۳۸ کیلوگرم در هکتار و رقم گچساران بین ۱۳ تا ۹۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطا تقریبی برای عملکرد دانه رقم کیمیا به ترتیب ۷/۸ کیلوگرم در هکتار، ۷/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۷۸/۸، برای رقم بیل به سوار به ترتیب ۶۸ کیلوگرم در هکتار، ۸/۲ درصد میانگین مشاهدات و ۱۱۵/۱ و برای رقم گچساران به ترتیب ۷/۲ کیلوگرم در هکتار، ۶/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۱۰۵ بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۵ درصد تغییرات مشاهده شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطا تقریبی برای وزن خشک کل در رقم کیمیا به ترتیب ۳۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۹/۳ درصد میانگین مشاهدات و ۴۷۹، برای رقم بیل به سوار به ترتیب ۸/۶ کیلوگرم در هکتار، ۴/۹ درصد میانگین مشاهدات و ۱۶۱ و برای رقم گچساران به ترتیب ۴ کیلوگرم در هکتار، ۳/۸ درصد میانگین مشاهدات و ۲۲۶ بود (شکل ۲).



شکل ۲- نتایج واسنجی: مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک (شکل A: رقم کیمیا، شکل B: رقم بیله سوار، شکل C: رقم گچساران)، عملکرد دانه و وزن خشک کل ارقام عدس (شکل D: رقم کیمیا، شکل E: رقم بیله سوار، شکل F: رقم گچساران) در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ‌های مختلف کاشت

Figure 2- The results of calibration: comparison of simulated and measured values of number of days from sowing to anthesis date and to physiological maturity (A: Kimiya, B: Bilehsavar, C: Gachsaran), grain yield and total dry weight of lentil cultivars (D: Kimiya, E: Bilehsavar, F: Gachsaran) in different sowing dates and different irrigation

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۷ درصد تغییرات مشاهده شده عملکرد دانه را پیش‌بینی کند (شکل ۲). مقدار جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطا تقریبی برای شاخص سطح برگ در رقم کیمیا به ترتیب ۱.۵، ۱/۴ درصد میانگین مشاهدات و ۰/۰۱-، برای رقم بیله سوار و گچساران به ترتیب برابر با صفر بود (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۹ درصد تغییرات مشاهده شده سطح برگ را پیش‌بینی کند (شکل ۲).

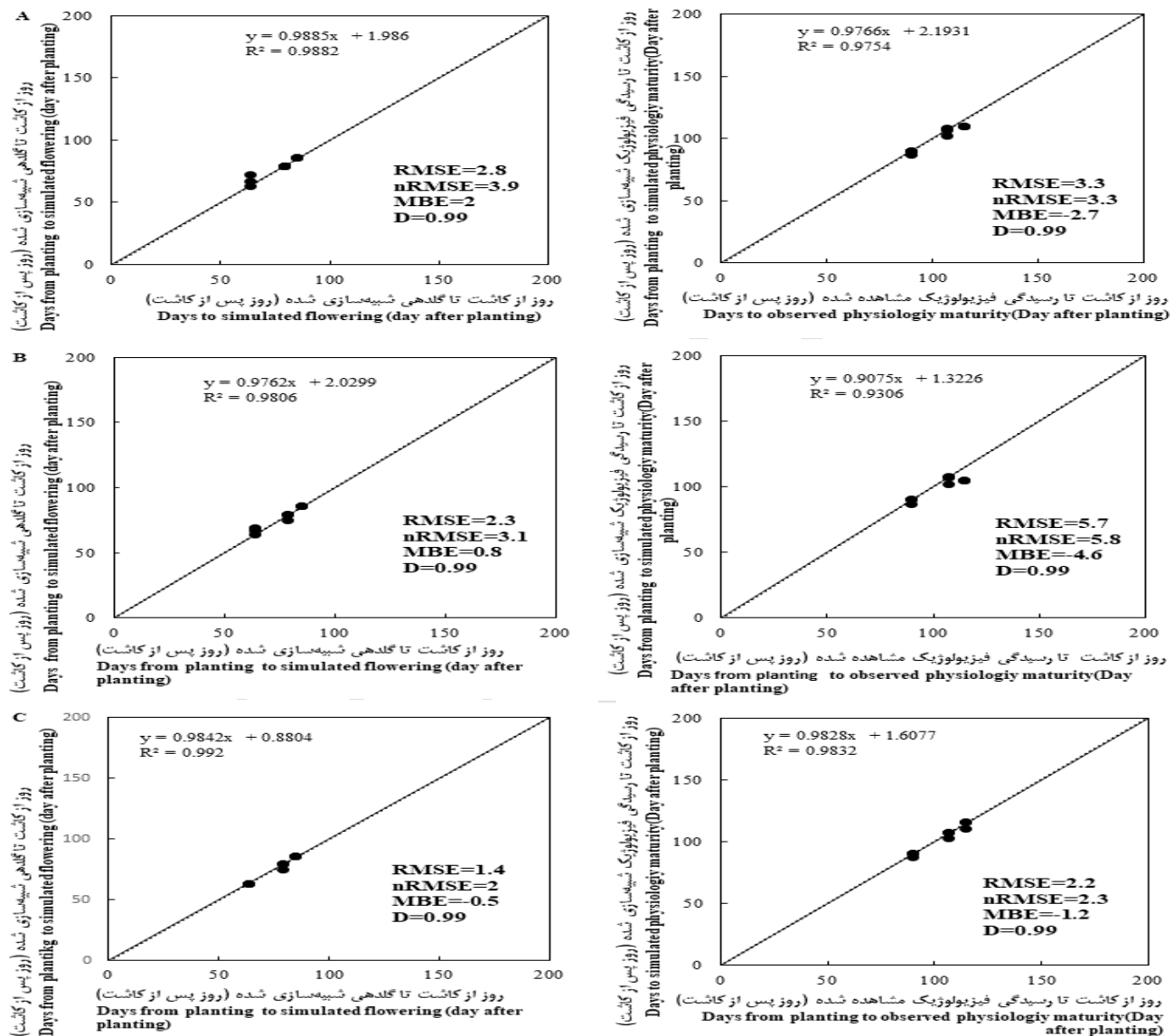
بطور کلی نتایج شاخص‌های آماری نشان داد که دقت پارامترهای گیاهی انتخاب شده در فرآیند واسنجی مدل SSM-iCrop2 قابل قبول بود. مطالعات متعدد نتایج مشابهی از واسنجی مدل SSM-iCrop2 را گزارش کرده‌اند. در تحقیقی دیگر گزارش شد که پارامترهای بکار رفته در مدل SSM-iCrop2 از دقت قابل قبولی برخوردار است (اگر مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۱۰ درصد باشد در سطح عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد قابل قبول و در صورتی که بیش از ۳۰ درصد باشد در سطح ضعیف ارزیابی می‌شود) به گونه‌ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا ۱۲ روز گزارش شد که حاکی از دقت نسبتاً خوب بود (Nahbandani et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر که با هدف پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی انجام شده بود نتایج نشان داد جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برابر با ۶۲ گرم در متر مربع بود (Mohammadi et al., 2022). نامبردگان اظهار داشتند که می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای بررسی سیستم‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مزارع لوبیا با اطمینان استفاده کرد.

ارزیابی مدل

نمو فنولوژیک

برای ارزیابی مدل از داده‌های مزرعه‌ای در سال دوم کرمانشاه و ازنا استفاده شد. در شرایط اقلیمی کرمانشاه بیش‌ترین (۸۵ روز) و کم‌ترین (۶۴ روز) طول دوره نمو روز از کاشت تا گلدهی مشاهده شده به ترتیب مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن در هر سه تیمار آبیاری و تاریخ کشت ۲۱ اسفند در هر سه تیمار آبیاری بود. بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گلدهی شبیه‌سازی شده به میزان ۸۶ روز نیز مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن، در هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کمترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۱ اسفند، رقم گچساران و در هر سه تیمار آبیاری به میزان ۶۳ روز بود (شکل ۳). در شرایط مزرعه بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ کشت ۲۷ بهمن به میزان ۱۱۵ روز برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری و کم‌ترین آن مربوط به تاریخ کشت ۹ اسفند برای هر سه رقم و هر سه تیمار آبیاری به میزان ۹۰ روز بود. در شرایط شبیه‌سازی نیز بیش‌ترین طول دوره

نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (۱۱۶ روز) برای رقم گچساران در تیمارهای یکبار و دوبار آبیاری و کمترین آن (۸۷ روز) برای دیگر ارقام و در شرایط تیمار بدون آبیاری بود (شکل ۳).



شکل ۳- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه. A: رقم کیمیا B: رقم بیل‌سوار و C: رقم گچساران

Figure 3 – Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Kermanshah.

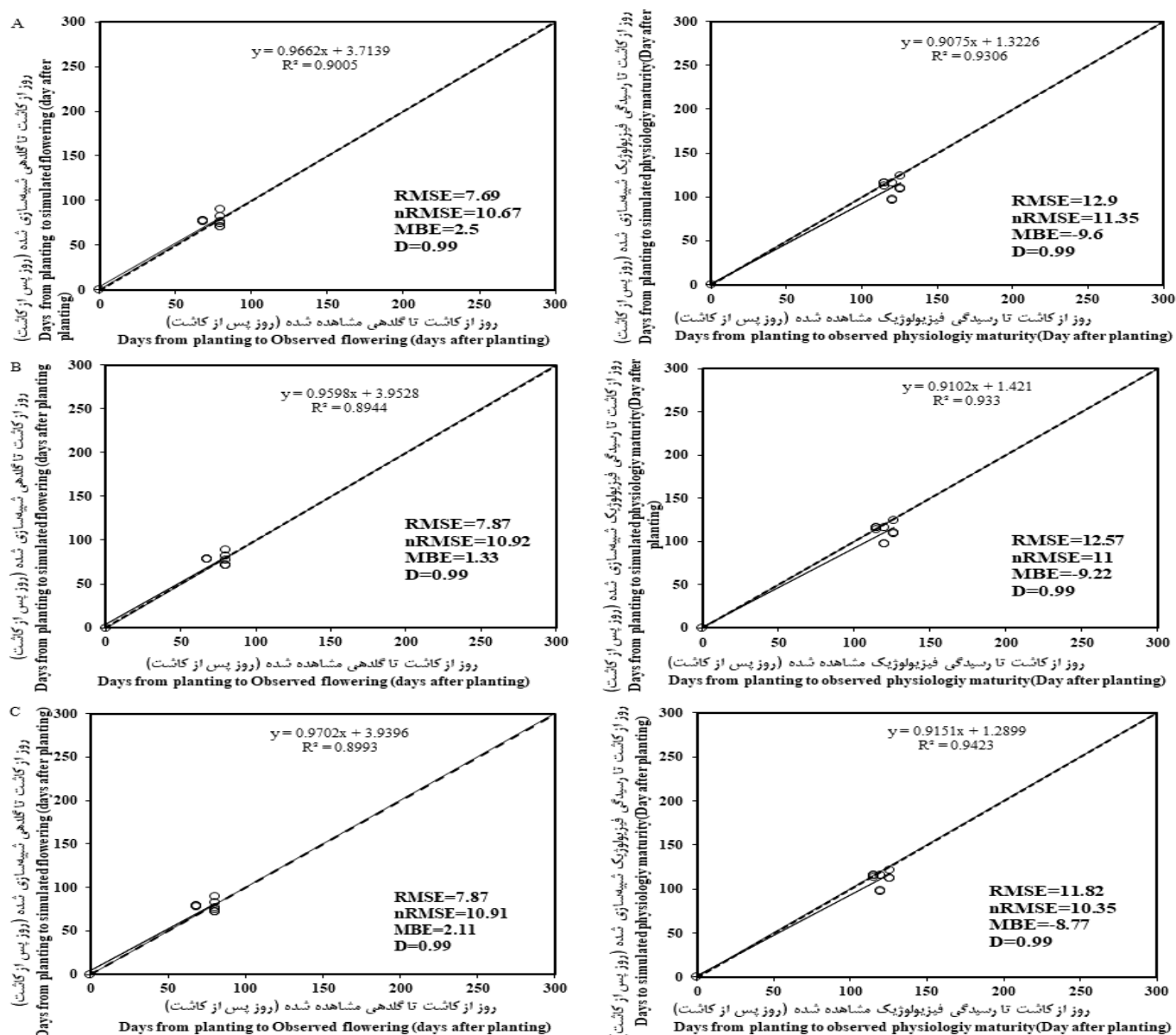
A: Kimiya cultivar, B: Bilihsavar cultivar and C: Gachsaran cultivar.

نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 نشان داد که تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا گلدهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب برابر با ۵/۷، ۳/۳ و ۲/۲ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب ۵/۸، ۳/۳ و ۲/۳ درصد مشاهدات بود (شکل ۳). میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گلدهی تنها در رقم گچساران منفی و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمام ارقام منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای مرحله نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی مراحل نمو ارقام عدس تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه پیش‌بینی کند (شکل ۳).

نتایج همچنین نشان داد که در شرایط اقلیمی ازنا بیش‌ترین و کم‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گلدهی اندازه‌گیری شده برای هر سه رقم مورد مطالعه در تاریخ کاشت‌های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۸۰ و ۶۸ روز مشاهده شد. بیش‌ترین و کم‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا گلدهی شبیه‌سازی شده نیز مربوط به تاریخ کاشت‌های ۶ و ۲۴ اسفند به ترتیب معادل ۹۰ روز و ۷۷ روز برای رقم بیله سوار بود (شکل ۴). در شرایط مزرعه بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ ۶ اسفند برای هر ارقام مورد بررسی به میزان ۱۲۶ روز و کم‌ترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند به میزان ۱۱۵ روز بود. بیش‌ترین طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده نیز مربوط به تاریخ ۶ اسفند به میزان ۱۲۴ روز برای ارقام بیله سوار و کیمیا و کم‌ترین آن مربوط به تاریخ کشت ۲۴ اسفند و رقم بیله سوار معادل ۹۶ روز بود (شکل ۴). جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا گلدهی برای ارقام بیله سوار، کیمیا و گچساران به ترتیب ۷/۷، ۷/۹ و ۷/۹ روز بود و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب ۱۰/۷، ۱۰/۹ و ۱۰/۹ درصد مشاهدات بود (شکل ۴).

میزان جذر میانگین مربعات خطای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام مورد بررسی از ۱۱/۸ تا ۱۲/۹ روز و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۱۰ تا ۱۱ درصد میانگین مشاهدات متغیر بود. میانگین خطای تقریبی نیز برای مرحله نمو روز از کاشت تا گلدهی مثبت و برای مرحله نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک منفی بود. ضریب توافق ویلموت (d) برای صفات روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بیش از ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک ارقام عدس مورد بررسی در شرایط اقلیمی ازنا است. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل توانست بیش از ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند (شکل ۴). برای شبیه‌سازی با کیفیت بالا به داده‌های ورودی با کیفیت (آب و هوا، خاک، مدیریت)، آمارها (سطح زیر کشت، منابع آب و زمین)، روش دقیق مقیاس‌بندی و یک مدل زراعی که دقیق پارامتریابی شده باشد نیاز است. یکی از دلایل دقت بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی مراحل نمو فیزیولوژیک عدس در این مطالعه

را می‌توان دقت در ثبت مراحل فنولوژیکی برای برآورد پارامترها و ارزیابی مدل ذکر کرد. پیش‌بینی نمو فنولوژیک گیاه اهمیت زیادی دارد چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تحت تاثیر زمان وقوع مراحل فنولوژیک است (Soltani et al., 2006).

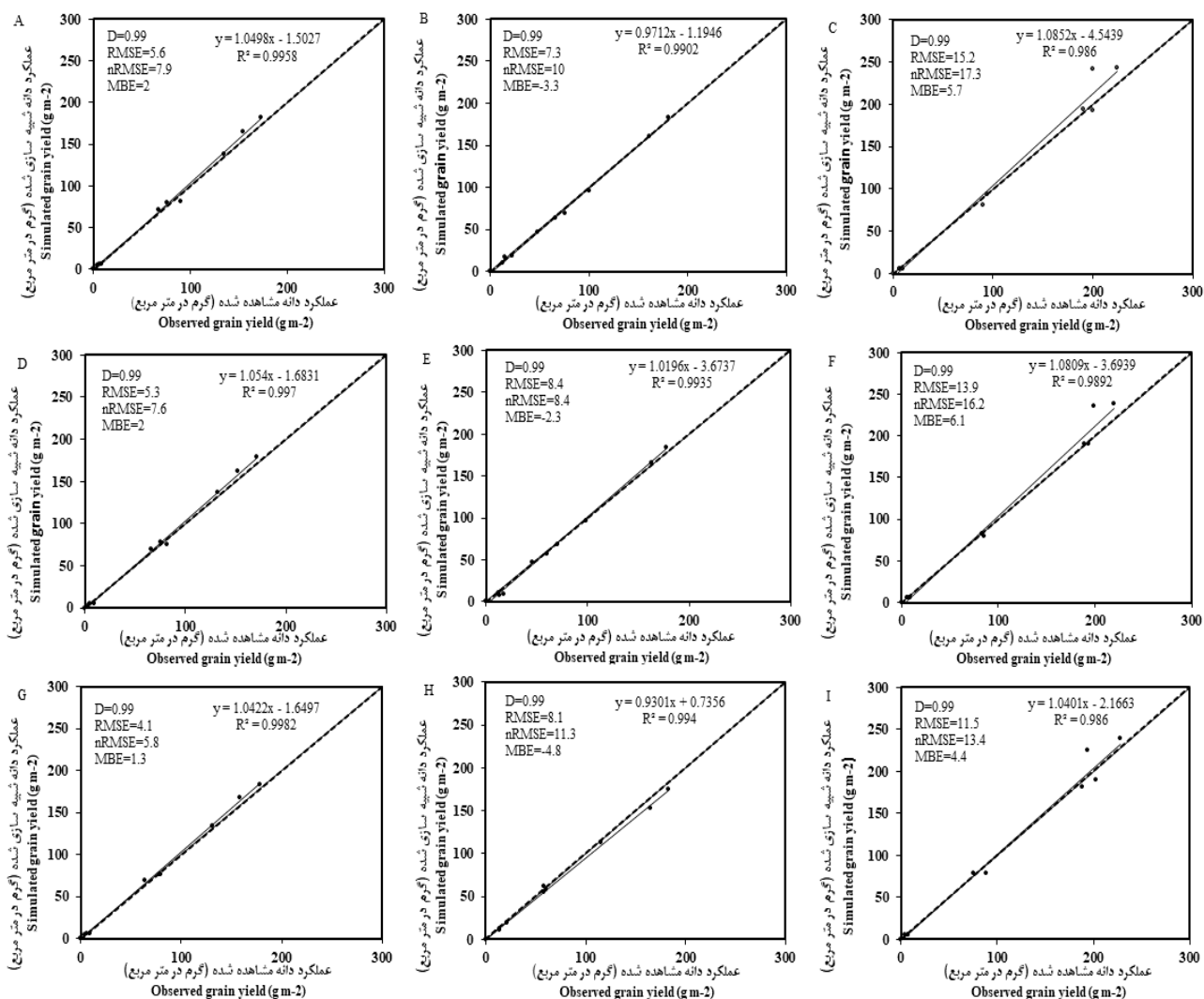


شکل ۴- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در تاریخ کاشت‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی از نا. A: رقم بیله سوار، B: رقم کیمیا و C: رقم گچساران
Figure 4 – Regression analysis between simulated and measured values of phenological stages (days from planting to flowering and days from planting to physiological maturity), as well as the evaluation results of the SSM-iCrop2 model indices under different planting dates and irrigation treatments in the climatic conditions of Azna.
A: Behlshavar cultivar, B: Kimiya cultivar and C: Gachsaran cultivar.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعیین اعتبار مراحل نمو فنولوژیک گیاه با قلا نشان داد که مدل SSM-iCrop2 با دقت زیادی مراحل روز از کاشت تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کرده است به گونه‌ای که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای روز از کاشت تا گلدهی ۳/۸ روز و برای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۱۱/۹ روز بود (Torabi et al., 2019). حاجی‌شعبانی و همکاران (Hajishabani, Mondani and Bagheri, 2020) میزان جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نمو روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک نخود نیز با استفاده از مدل CROPGRO-Chickpea به ترتیب ۲/۹ و ۲/۷ روز گزارش کردند (Hajishabani et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر نسبت مقدار جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک سویا در شرایط آب و هوایی گرگان با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برابر با ۸/۷ روز بدست آمد (Nehbandani and Soltani, 2016). نامبردگان اظهار داشتند مدل SSM-iCrop2 توانست با دقت بالایی مراحل نمو فنولوژیک را پیش‌بینی کند و با توجه به نقش کلیدی مراحل فنولوژی در مدل‌سازی رشد، عملکرد و پاسخ گیاهان به شرایط محیطی و بهبود پیش‌بینی عملکرد این مدل در اقلیم‌های متفاوت به عنوان یک ابزار مفید برای مدیریت مزرعه محسوب می‌شود.

عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه ارقام عدس در شرایط مزرعه همخوانی بسیار بالایی داشت. در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی تاخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد دانه شد و کاربرد آبیاری تکمیلی تاثیر مثبتی بر عملکرد دانه داشت. در شرایط اقلیمی کرمانشاه میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه در تیمارهای بدون آبیاری از ۴/۱ تا ۵/۶ گرم در متر مربع، یکبار آبیاری تکمیلی از ۷/۳ تا ۸/۴ گرم در متر مربع و دوبار آبیاری تکمیلی از ۱۱/۵ تا ۱۵/۲ گرم در متر مربع مشاهده شد (شکل ۵). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در تیمار بدون آبیاری از ۵/۸ تا ۷/۹ درصد میانگین مشاهدات، تیمار یکبار آبیاری از ۸/۴ تا ۱۱/۳ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دوبار آبیاری از ۱۳/۴ تا ۱۷/۳ درصد میانگین مشاهدات بدست آمد. میانگین خطای تقریبی برای عملکرد دانه تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه مثبت بود، به گونه‌ای که بالاترین و پایین‌ترین میانگین خطای تقریبی به ترتیب در تیمار بدون آبیاری و تیمار دوبار آبیاری تکمیلی مشاهده شد (شکل ۴). ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد دانه ارقام کشت شده حدود ۰/۹۹ بود که نشان دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 در تیمارهای مورد بررسی قادر بود بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند که نشان از دقت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه داشت (شکل ۵).

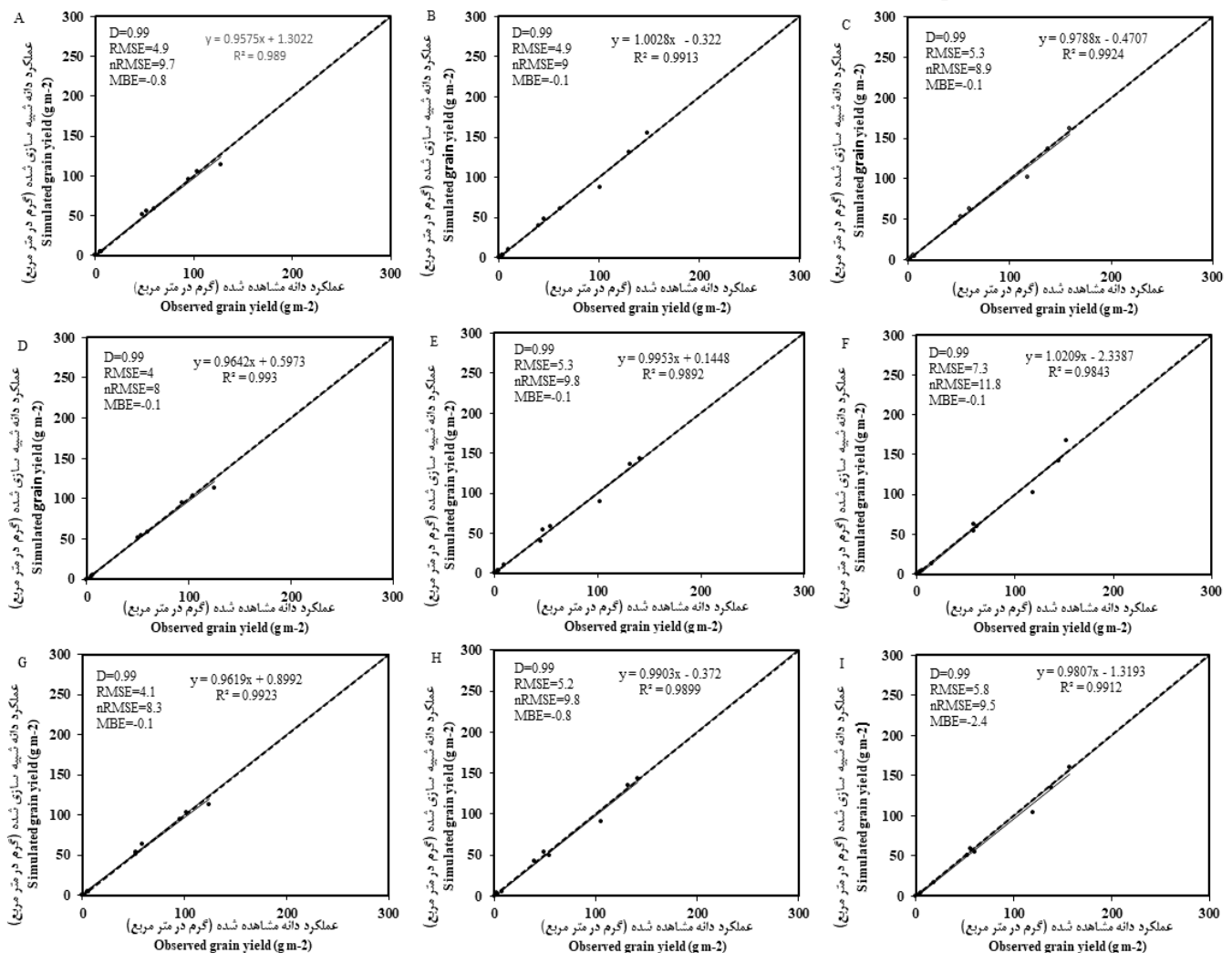


شکل ۵- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی کرمانشاه. A, B و C: رقم بیله سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گجساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف.

Figure 5- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Kermanshah climatic conditions. A, B and C: Belehsavar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates.

تحت شرایط اقلیمی ازنا میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه ارقام مختلف عدس در شرایط تیمارهای آزمایش از ۴/۰ تا ۷/۳ گرم در متر مربع متغیر بود (شکل ۶). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در تیمارهای بدون آبیاری از ۸/۰ تا ۹/۷ درصد میانگین مشاهدات، یکبار آبیاری تکمیلی از ۹/۰ تا ۹/۸ درصد میانگین مشاهدات و تیمار دوبار آبیاری تکمیلی از ۸/۹ تا ۱۱/۸ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین خطای تقریبی در تیمار بدون آبیاری و تیمار یکبار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۰/۸- و در تیمار دوبار آبیاری تکمیلی بین ۰/۱- تا ۲/۴ مشاهده شد (شکل ۶). ضریب توافق ویلموت (d)

برای عملکرد دانه ارقام کشت شده تحت شرایط اقلیمی ازنا حدود ۹۹٪ بود که نشان دهنده توانایی بسیار بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 قادر بود بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند که نشان از قدرت بسیار بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تاریخ کشت‌ها و تیمارهای آبیاری مورد بررسی داشت (شکل ۶).



شکل ۶- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده عملکرد دانه عدس و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل SSM iCrop2 در شرایط اقلیمی ازنا. A, B و C: رقم بیله سوار در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. D, E و F: رقم کیمیا در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف. G, H و I: رقم گچساران در شرایط تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت‌های مختلف.

Figure 6- Regression analysis between simulated and measured values of lentil grain yield and the results of SSM iCrop2 model evaluation indices in Azna climatic conditions. A, B and C: Behlsavar cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. D, E and F: Kimiya cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates. G, H and I: Gachsaran cultivar under different irrigation treatment conditions and sowing dates.

بطور کلی نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 در شرایط تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی نشان داد که این مدل قادر است با دقت بالای تغییرات عملکرد دانه ارقام مورد بررسی عدس را برای شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا شبیه‌سازی کند. با این وجود مدل SSM-iCrop2 در تیمار دوبار آبیاری تکمیلی مقدار عملکرد دانه ارقام بیله‌سوار و کیمیا را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه بیشتر از شرایط مزرعه پیش‌بینی نمود. ولی در شرایط اقلیمی ازنا برآیند شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده نشان از نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه در تیمارهای آزمایش داشت به طور قطع مدل‌های شبیه‌سازی ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های طبیعی می‌باشند اما این بدان معنی نیست که این مدل‌ها دقیقاً رفتار سیستم‌های طبیعی را پیش‌بینی کنند و در نهایت ملاک برای قابل قبول بودن دقت مدل شاخص‌های آماری می‌باشد که در زمان ارزیابی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. علی‌رغم اینکه در برخی از تیمارها، این مدل عملکرد دانه را بیش‌تر یا کم‌تر از شرایط مزرعه شبیه‌سازی کرده است اما نتایج تمام شاخص‌های آماری تایید کننده دقت قابل قبول این مدل می‌باشد. ارزیابی موفقیت آمیز یک مدل شبیه‌سازی محصول به تخمین صحیح عملکرد و شاخص سطح برگ بستگی دارد (Amiri et al., 2016). با توجه به آن که صحت و دقت پارامترهای مشاهده شده نقش مهمی در ارزیابی عملکرد مدل دارد می‌توان دقت بالای نتایج این مطالعه را تا حد زیادی به دقت داده‌های مشاهده شده مرتبط دانست. نتایج مطالعات دیگر نیز نشان داد که مدل SSM-iCrop2 نه تنها می‌تواند مراحل نمو فنولوژیک از جمله گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک را با دقت بالا شبیه‌سازی کند، بلکه عملکرد دانه را نیز تحت شرایط مختلف اقلیمی، خاکی و مدیریتی با قابلیت قابل توجهی پیش‌بینی می‌کند (Ghanem et al., 2015). مقدار RMSE برای عملکرد دانه نخود توسط مدل SSM-Chickpea ۲۶ گرم در مترمربع گزارش شده است (Soltani and Sinclair, 2011). همچنین از مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد نخود (Hajarpour et al., 2013)، سویا (Akbari & Soltani, 2017) و باقلا (Torabi et al., 2020) استفاده شده است. در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شده است که مدل SSM-Legumes عملکرد دانه گیاه لوبیا در جنوب غربی فرانسه را با RMSE برابر با ۴۱ گرم در متر مربع برآورد کرد (Marrou et al., 2014). مقدار جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه لوبیا چشم بلبلی توسط مدل DSSAT به ترتیب ۹۲ و ۱۲/۶ درصد گزارش شده است (Baradaran-Hazaveh, Babazadeh, Amiri & Ebrahimi, 2022). همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد دانه نخود توسط مدل CROPGRO-chickpea بین ۱۰/۳ تا ۱۶/۶ درصد میانگین مشاهدات گزارش شده است (Hajishabani et al., 2020).

نتیجه گیری

در این مطالعه پارامترهای مربوط به فنولوژی و عملکرد دانه ارقام عدس با استفاده از مدل SSM-iCrop2 با دقت بالایی برآورد شد. مدل توانست رشد و عملکرد عدس را با وجود تاریخ کاشت و آبیاری متفاوت، با تعداد پارامترهای کم و در دسترس با موفقیت شبیه‌سازی کند. نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop2 که با استفاده از شاخص‌های آماری انجام گرفت، نشان داد که این مدل می‌تواند زمان رسیدگی و عملکرد دانه عدس را در تاریخ‌های مختلف کاشت در شرایط اقلیمی کرمانشاه و ازنا با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. بنابراین با توجه به این نتایج ارزیابی‌ها می‌توان از مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و

عملکرد عدس بهره برد. این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد عدس در آب و هوای مناطق مختلف و تحت شرایط مدیریتی متفاوت استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت کادر محترم مزرعه آموزش و تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی برای انجام این پژوهش تقدیر می‌گردد.

References

- Akbari, S., & Soltani, E. (2017). Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of crops improvement*, 19: 751–764. (in Persian with English abstract). https://jci.ut.ac.ir/article_60477_73143ebdf8babd8121c12f6a047c0fb4.pdf.
- Amiri, S. R., Deihimfard, R., & Soltani, A. (2016). A single supplementary irrigation can boost chickpea grain yield and water use efficiency in arid and semiarid conditions: a modeling study. *Agronomy Journal*, 108(6), 2406–2416. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0087>.
- Baradaran-Hazaveh, F., Babazadeh, H., Amiri, E., & Ebrahimi, H. (2020). Evaluation of DSSAT Model in Estimating Cowpea Water Productivity and Yield at Different Levels of Applied Water. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*. 35 (4): 323–336. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.355847.890>.
- Erskine, W., Sarker, A., & Kumar, S. (2011). Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security*, 3, 127–139. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0124-5>.
- Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., & Korner, C. (2008). Plant growth modelling and application: the increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany*, 101(8), 1053–1063. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>.
- Ghanem, M.E., Marrou, H., Biradar, C., & Sinclair, T.R. (2015). Production potential of lentil (*Lens culinaris Medik.*) in East Africa. *Agricultural Systems*, 137: 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.005>.
- Hajarpour, A., Soltani, A., Zeinali, E., & Sayyedi, F. (2013). Simulating the impact of climate change on production of Chickpea in rainfed and irrigated condition of Kermanshah. *Journal of Plant Production*, 20 (2).235- 252. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1392.20.2.12.7>.
- Hajishabani, H., Mondani, F., & Bagheri, A. (2020). Simulation Effects of Sowing Date on Growth and Yield of Rainfed Chickpea (*Cicer arietinum* L.) by CROPGRO- CHICKPEA MODEL. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(2). 197–212. (in Persian with English abstract). [10.22067/gsc.v18i2.82684](https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.82684).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.006>.
- Ministry of Agriculture of Iran. (2023). Retrieved from <https://www.maj.ir/>.
- Mohhamadi, S., Zeinali, E., Soltami, & Torabi, B. (2022). Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran. *Iranian Journal of Pulses Research*, 13 (1), 37- 54. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v13i1.2103-1004>.
- Mukherjee, B., Kumar Naskar, M., Nath, R., Atta, K., Visha Kumari, V., Banerjee, P., Alamri, S., Patra, K., Laing, A., Skalicky, A., & Hossain, A. (2023). Growth, nodulation, yield, nitrogen uptake, and economics of lentil as influenced by sowing time, tillage, and management practices. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7: 1151111. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1151111>.

- Nehbandani, A., & Soltani, A. (2015). Simulate the Effect of Climate Change on Development, Irrigation Requirements and Soybean Yield in Gorgan. *Journal of water and soil*, 30 (1), 77-87. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.37529>.
- Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., & Dadras, A. (2020). Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. *Oilseeds & fats Crop and Lipids*, 27, 58. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020057>.
- Odoro-Yeboah, C., Sulaiman, R., Uebersax, M. A., & Dolan, K. D. (2023). A review of lentil (*Lens culinaris* Medik) value chain: Postharvest handling, processing, and processed products. *Legume Science*, 5(2), e171. <https://doi.org/10.1002/leg3.171>.
- Sehgal, A., Sita, K., Rehman, A., Farooq, M., Kumar, S., Yadav, R., Nayyar, H., Singh, S., & Siddique, K.H. (2021). Lentil. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, 408-428. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00013-X>.
- Sinclair, T.R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. model development. *Field Crop Research*, 15 (2), 125-141. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(86\)90082-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1).
- 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. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2013.1266>.
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021>.
- Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of SSM iCrop Model for prediction of growth and development of faba bean in climatic conditions of Gorgan. *Journal of Crops Improvement*, 22(4), 531-542. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.273742.2148>.
- Walley, F. L., Clayton, G. W., Miller, P. R., Carr, P. M., & Lafond, G. (2007). Nitrogen economy of pulse crop production in the northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 99, 1710-1718. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0314s>.
- Water Requirements, C. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2).
- Wite, D. Validation of Discrete Event Simulation Models Using Linear Constrains. 27, 2.