



The Estimation of Parameters and Cropsyst Model to Predict the Growth and Yield of Two Wheat Cultivars in Northeast Khuzestan, Iran

Sayed Yaghob Hashemi¹, Jafar Pourreza^{2*}, Abdolah Bahrani², Mehran Mombaini²

¹ PhD Student of Agronomy, Ramhormoz branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran.

² Department of Agriculture, Ramhormoz branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 6 April 2024

Received in revised form 30 June 2024

Accepted 29 July 2024

Published online 15 August 2024

Keywords:

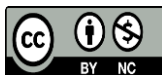
Simulation, Cropsyst Model, Cultivar, Evaluation.

ABSTRACT

To evaluate CropSyst and estimate input parameters to predict the growth and yield of two wheat cultivars in northeast Khuzestan, Iran, an experiment was conducted based on the split plot in a randomized complete block design in three repetitions in a research farm in Ramhormoz. Factors included irrigation regime at two levels (full irrigation and stopping irrigation after flowering), cultivation date (six dates including October 20, November 5, November 20, December 5, December 20, and January 5), and two wheat cultivars (Chamran-2 and Sirvan). Cropsyst for different cultivars was calibrated with high accuracy. In this stage, the plant parameters of this model such as photoperiod and vernalization were determined. The highest amount of total dry matter and yield for Chamran-2 were obtained on the 5th and 20th of November and the lowest amount of total dry matter and yield was obtained on the 20th of October and 5th of January. The highest total dry matter and yield for Sirvan were observed on November 20 and December 5, and the lowest values of these two parameters were observed on October 20 and January 5. In fact, the highest yield and dry matter were observed in both cultivars between November 15 and December 15, whereas other cultivation dates decreased the yield. By stopping irrigation after flowering, the time for full ripening for Chamran-2 and Sirvan cultivars increased from 3 to 5 days, respectively. These changes affected their yield under the tension of humidity. Based on the results, the critical day length, the maximum day length, the number of basic vernalization days, the minimum growth rate in the absence of vernalization, and the saturation point of vernalization for Chamran-2 variety were 14, 8, 0, 0.9, and 24 respectively. The abovementioned parameter values for the Sirvan were 13.8, 7.8, 0, 0.93, and 25 respectively. The results obtained from the simulation of flowering and physiological ripening stages based on RMSE, d, CRM and EF showed that the Cropsyst model simulated the mentioned stages with good accuracy. The results of simulating the dry matter in above-ground parts for different cultivars indicated that CropSyst model could accurately simulate the parameter in various treatments of growth cultivation as well as irrigation from 95 percent to 98 percent. The model's error based on the RMSE statistic for the dry matter in above-ground parts in Chamran-2 and Sirvan was 627 and 351 kg per hectare, respectively.

*corresponding author e-mail: J_pourreza@yahoo.com

Cite this article: Sayed Yaghob Hashemi, Jafar Pourreza, Abdolah Bahrani, Mehran Mombaini. (2024). Estimation Parameters and Evaluation of Cropsyst Model to Predict the Growth and Yield of Two Wheat Cultivars in Northeast Khuzestan, Iran. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*,



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.457647.1078>



برآورد پارامترها و ارزیابی مدل Crop Syst برای پیش‌بینی رشد و عملکرد دو رقم گندم در شمال شرق خوزستان

سید یعقوب هاشمی^{۱*}، جعفر پوررضا^۲، عبدالله بحرانی^۲، مهران ممبینی^۲

^۱دانشجوی دکتری زراعت، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.
^۲گروه کشاورزی، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	به‌منظور برآورد پارامترها و ارزیابی مدل CropSyst برای پیش‌بینی رشد و عملکرد دو رقم گندم در شمال شرق خوزستان
مقاله پژوهشی	آزمایشی به صورت طرح اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان رامهرمز
تاریخ دریافت:	با سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل رژیم آبیاری در دو سطح (آبیاری کامل و قطع آبیاری پس از گل‌دهی)، تاریخ کاشت
تاریخ بازنگری:	(شش تاریخ شامل: ۳۰ مهر، ۱۵ آبان، ۳۰ آبان، ۱۵ آذر، ۳۰ آذر و ۱۵ دی) و دو رقم گندم (چمران ۲ و سیروان) بودند. مدل
تاریخ پذیرش:	CropSyst برای ارقام مختلف با دقت قابل قبولی واسنجی شد. پارامترهای گیاهی این مدل از جمله فاکتورهای فتوسنتز و
تاریخ انتشار:	بهاره‌سازی در این مرحله تعیین شدند. بالاترین مقدار ماده خشک کل و عملکرد برای رقم چمران ۲ در دو تاریخ ۱۵ و ۳۰
کلیدواژه‌ها:	آبان و کمترین مقدار ماده خشک کل و عملکرد در دو تاریخ ۳۰ مهر و ۱۵ دی به‌دست آمد. بیشترین ماده خشک کل و
شبهه‌سازی، مدل	عملکرد برای رقم سیروان در دو تاریخ ۳۰ آبان و ۱۵ آذر و کمترین مقادیر این دو پارامتر در تاریخ‌های ۳۰ مهر و ۱۵ دی
Cropsyst، ارقام، ارزیابی.	مشاهده شد. در هر دو رقم، بیشترین عملکرد و ماده خشک در تاریخ‌های ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر مشاهده شد و سایر
	تاریخ‌های کاشت سبب کاهش عملکرد گردید. با قطع آبیاری پس از گل‌دهی، زمان تا رسیدگی کامل برای رقم چمران ۲ و
	سیروان به ترتیب ۳ و ۵ روز افزایش یافت و این تغییرات بر عملکرد هر دو رقم تحت تنش رطوبتی اثرگذار بود. براساس
	نتایج، طول روز بحرانی، طول روز سقف، تعداد روز بهاره‌سازی پایه، حداقل سرعت نمو در شرایط عدم بهاره‌سازی و نقطه
	اشباع بهاره‌سازی برای رقم چمران ۲ به ترتیب برابر با ۱۴، ۸، صفر، ۰/۹ و ۲۴ و برای رقم سیروان به ترتیب ۱۳/۸، ۷/۸،
	صفر، ۰/۹۳ و ۲۵ بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مراحل گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک براساس آماره‌های RMSE، d،
	EF و CRM، نشان داد که مدل Cropsyst با دقت خوبی مراحل مذکور را برای ارقام مختلف شبیه‌سازی نمود. نتایج شبیه‌سازی
	ماده خشک اندام‌های هوایی برای ارقام مختلف نشان داد که این مدل قادر به شبیه‌سازی ۹۵ تا ۹۸ درصد این پارامتر در
	تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و آبیاری بود. مقدار خطای مدل براساس آماره RMSE برای ماده خشک اندام‌های هوایی در
	رقم‌های چمران ۲ و سیروان به ترتیب ۶۲۷ و ۳۵۱ کیلوگرم در هکتار بود.

نویسنده مسئول: J_pourreza@yahoo.com

استناد: هاشمی، سید یعقوب؛ پوررضا، جعفر؛ بحرانی، عبدالله؛ و ممبینی، مهران (۱۴۰۳). برآورد پارامترها و ارزیابی مدل Crop Syst برای پیش‌بینی رشد و عملکرد دو رقم گندم در شمال شرق خوزستان. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*،

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.457647.1078>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

مقدمه

نیازمندی‌های روزافزون به مدیریت کارآمد سیستم‌های تولید گیاهان زراعی به همراه توجه بیشتر در مسائل مدیریتی، لزوم کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در بخش کشاورزی را بارزتر می‌کند (سامیها و همکاران، ۲۰۱۰). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی، بنا به استفاده‌ی مکرر و روبه‌توسعه آن‌ها و افزایش اهمیت کاربرد این مدل‌ها به‌عنوان بخشی یکپارچه از برنامه‌های مدیریت زراعی بیشتر، از قبل مورد توجه محققان و برنامه‌ریزان قرار گرفته‌اند (نصرالهی و همکاران، ۲۰۲۴). مدل CropsSyst یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی است که به‌عنوان یک ابزار تحلیلی برای مطالعه اثر مدیریت سیستم‌های زراعی روی بهره‌وری و تولیدات زراعی بسط داده شده است (استوکل و نلسون، ۲۰۰۰).

مدل CropSyst برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از گیاهان زراعی ساخته شده است و به‌همین دلیل کارایی آن توسط محققان مختلف ارزیابی شده است. برای مثال در پژوهش میرآخوری و همکاران (۱۳۸۹)، رشد و عملکرد برنج در شرایط کاربرد کم‌آبیاری و کود نیتروژن با استفاده از مدل CropSyst شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که این مدل توانایی خوبی برای برآورد عملکرد و پارامترهای رشد برنج دارد. ترابی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل CropSyst به بررسی عملکرد واقعی و پتانسیل گندم در گرگان پرداختند. این محققان از داده‌های دهه ۶۰ تا ۸۰ خورشیدی برای ارزیابی این مدل استفاده کردند و در نهایت گزارش کردند که اختلاف عملکرد واقعی و پتانسیل بین بازه‌های ۶/۲-۰/۳ تفاوت داشته است. یزدانی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل CropSyst به تخمین عملکرد گندم رقم الوند تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری پرداختند. نتایج نشان داد که در تیمار تأمین نیاز آبی کامل گیاه خطای مدل CropSyst کمتر بود. در پژوهشی دیگر، عملکرد برنج با استفاده از این مدل گیاهی در شرایط مختلف تأمین آب و کود نیتروژن بررسی گردید. نتایج دو آماره‌ی RMSE و CRM به ترتیب ۹/۳ و ۰/۰۶ به دست آمد (زارعی و همکاران، ۲۰۱۴). شبیه‌سازی رشد ذرت علوفه‌ای با استفاده از مدل CropSyst توسط بوزاما و همکاران (۲۰۱۳) انجام گردید. این محققان گزارش کردند که این مدل قادر به برآورد دقیق پارامترهای رشد ذرت علوفه‌ای را دارد و می‌توان در شرایط مدیریت آب از آن استفاده کرد. سایر پژوهش‌های انجام شده توسط محققانی از جمله مارسال و استوکل (۲۰۱۲) روی گلابی، سوززی و همکاران (۲۰۱۶) روی سبزیجات برگی و آلبولا و همکاران (۲۰۱۷) و عبدالله و مولیاتی (۲۰۱۸) روی سویا نشان می‌دهد که مدل CropSyst توانایی لازم برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان مختلف را دارد. یاداو و واق (۲۰۲۳) از مدل CropSyst برای شبیه‌سازی بادام زمینی در گجرات استفاده کردند. نتایج نشان داد که این مدل گیاهی در زمان باران‌های موسمی، مقدار عملکرد را بیش از مقدار واقعی در مزرعه برآورد کرد. همچنین این محققان گزارش کردند که دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی سه رقم بادام زمینی متفاوت بوده است و یکی از ارقام دقت قابل قبولی داشته است. استوکل و همکاران (۲۰۲۴) از مدل CropSyst برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق در مزرعه ذرت در آمریکا استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که نتایج شبیه‌سازی از این مدل نسبت به سایر شبیه‌سازی‌هایی که در مزرعه انجام شده بود از دقت بهتری برخوردار بود. همچنین تبخیر-تعرق شبیه‌سازی شده در اوایل و اواسط دوره رشد گیاه از دقت بهتری نسبت به اواخر دوره رشد برخوردار بود.

گندم یکی از گیاهان زراعی مهم در ایران محسوب می‌شود و در کلیه استان‌های کشور کشت می‌گردد. این گیاه زراعی در سطح جهانی نیز به‌عنوان گیاهی استراتژیک محسوب می‌شود و به‌همین دلیل خصوصیات رشد آن در مدل‌های گیاهی از جمله CropSyst قرار داده شده است (استوکل و همکاران، ۱۹۹۴). توانایی مدل CropSyst برای شبیه‌سازی عملکرد و رشد گندم در تحقیقات مختلفی از جمله رحیمی خوب و همکاران (۱۳۸۸)، دستمالچی و همکاران (۱۳۸۹)، زارعی و گنج خرم دل

(۱۳۹۶)، یزدانی و همکاران (۱۴۰۲)، تاهانی و همکاران (۲۰۱۵)، سامیها و همکاران (۲۰۱۵) و اودا و همکاران (۲۰۲۱) گزارش شده است. این محققان واکنش مدل CropSyst را در شرایط مختلف زراعی از جمله کاربرد مقادیر مختلف آب آبیاری، کود نیتروژن، تراکم کاشت، نوع سیستم آبیاری و کیفیت آب آبیاری ارزیابی کردند.

در بین تحقیقات انجام شده توسط محققان، ارزیابی همزمان تاریخ کاشت و شرایط آبیاری در انتهای فصل رشد روی ارقام مختلف گندم کمتر مورد توجه بوده است. در الگوی فصلی بارندگی در ایران، قسمت اعظم بارندگی در زمستان اتفاق می افتد و محصولات زراعی پاییزه معمولاً از زمان گلدهی تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک با خشکی و کم آبی مواجه هستند (یزدانی و همکاران، ۱۴۰۲). بدین منظور، راهکارهایی از جمله تغییر تاریخ کاشت یا اعمال آبیاری در انتهای دوره رشد در مزارع کشاورزی کشور انجام می شود. براساس بیان مسأله، مدیریت تغییر تاریخ کاشت یا کاربرد آب آبیاری در انتهای فصل رشد، نیازمند بهره گیری از مدل های گیاهی از جمله CropSyst است. با توجه به اینکه گندم پاییزه بخش اعظمی از زمین های زراعی کشور را در برمی گیرد؛ ارزیابی مدل CropSyst برای شبیه سازی ارقام مختلف گندم می تواند به محققان و مدیران برای برنامه ریزی و شبیه سازی پارامترهای دخیل در مدیریت کاشت گندم پاییزه کمک نماید. با توجه به این مهم، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی مدل CropSyst برای شبیه سازی دو رقم گندم چمران ۲ و سیروان است. همچنین، برای شبیه سازی این دو رقم گندم در سایر مناطق کشور، با استفاده از مدل CropSyst، نیازمند پارامترهای گیاهی این مدل است. به همین دلیل، در این پژوهش به تعیین پارامترهای گیاهی این مدل در مرحله واسنجی پرداخته شد.

مواد و روش ها

مطالعات مزرعه ای

این پژوهش در قالب طرح کرت های دو بار خرد شده بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان رامهرز، با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۵۱ متر از سطح دریا، در دو سال زراعی اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل رژیم آبیاری در دو سطح (آبیاری کامل و قطع آبیاری پس از گل دهی) و تاریخ کاشت در شش سطح (شش تاریخ شامل: ۳۰ مهر، ۱۵ آبان، ۳۰ آبان، ۱۵ آذر، ۳۰ آذر و ۱۵ دی) و دو رقم گندم (چمران ۲ و سیروان) بودند. این ارقام دارای کلاس های رسیدگی متفاوت هستند و برای بررسی گسترده تر، ضرایب و پارامترهای گیاهی، تاریخ های کاشت و رژیم های آبیاری لحاظ گردید.

زمین مورد آزمایش در مهر ماه با چیزل پیلر شخم زده شد، سپس در دو نوبت به صورت عمود بر هم دیسک زده شد. پس از آن، با گونیا نقشه طرح پیاده و کرت بندی انجام گردید. برای اجرای هر تیمار، کرتی شامل شش خط به طول هشت متر با فاصله ردیف ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. براساس تیمار تاریخ کاشت، بذور پس از ضد عفونی با سم قارچ کش لاماردور به نسبت دو در هزار، در فاصله مناسب و در عمق ۴-۳ سانتی متری به صورت دستی کشت شدند. فاصله بین تکرارها ۱/۵ متر و فاصله بین کرت های اصلی یک متر در نظر گرفته شد. براساس تجربیات به دست آمده از آزمایش های قبلی، برای رعایت آبیاری کامل تیمارها، کرت ها بعد از ۶۰ میلی متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A آبیاری شدند. میزان کود توصیه شده بر اساس آزمایش خاک، ۱۲۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۱۶۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار بود که هر دو آنها قبل از کاشت به زمین داده شد. مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره نیز در سه نوبت (کاشت، پنجه زنی و گرده افشانی) و در هر نوبت به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار اعمال گردید. در طول آزمایش، کنترل آفات، بیماری ها و علف های هرز صورت گرفت.

جدول ۱- مشخصات پارامترهای هواشناسی در طول دوره آزمایش

ماه	متوسط حداکثر درجه حرارت (c)		متوسط حداقل درجه حرارت (c)		متوسط تشعشع روزانه (MJ.m ⁻² .day ⁻¹)		میزان بارندگی (mm)	
	سال ۹۶	سال ۹۷	سال ۹۶	سال ۹۷	سال ۹۶	سال ۹۷	سال ۹۶	سال ۹۷
آبان	۳۲/۳	۳۲/۱	۱۸	۱۸/۲	۱۶/۹۶	۱۷/۲۹	۰/۴	۹۳/۵
آذر	۲۱/۲	۲۱/۱	۱۰/۲	۱۰/۱	۱۳/۸۰	۱۴/۲۸	۲۱/۸	۵۸/۲
دی	۲۱/۴	۲۱/۲	۱۰/۱	۱۰/۲	۱۳/۰۸	۱۳/۷۵	۲۰	۹۴/۲
بهمن	۲۱/۳	۲۱/۴	۱۰/۱	۱۰/۳	۱۴/۳۵	۱۴/۲۵	۲۲/۷	۳۶/۷
اسفند	۲۵/۷	۲۵/۸	۱۲/۷	۱۲/۵	۱۵/۵۰	۱۵/۳۵	۴۵/۸	۲۱/۳
فروردین	۳۰/۹	۳۰/۷	۱۸/۹	۱۸/۶	۱۶/۹۰	۱۷/۲۵	۲۷/۵	۹۸ سال
اردیبهشت	۴۰/۴	۴۰/۵	۲۵/۸	۲۵/۹	۱۹/۰۵	۱۹/۲۰	۲۴/۷	۵/۶

جدول ۲- مشخصات فیزیکی شیمیایی خاک مزرعه

عمق خاک	۳۰-۰ سانتی متری	۶۰-۳۰ سانتی متری
مشخصه	مقدار	مقدار
رس (درصد)	۴۲	۴۰
سیلت (درصد)	۵۵	۵۷
شن (درصد)	۳	۳
کربن آلی (درصد)	۰/۹۸	۰/۹۳
ازت کل (درصد)	۰/۱	۰/۱
فسفر قابل جذب (قسمت در میلیون)	۸	۷
پتاسیم قابل جذب (قسمت در میلیون)	۱۸۰	۱۵۰
اسدیته گل اشباع (PH)	۷/۵	۷/۵
هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	۵/۰۳	۴/۱
درصد مواد خنثی شونده	۲/۶	۳/۲

مدل CropSyst

در مدل CropSyst افزایش سطح برگ در خلال دوره رشد روی شی به صورت مترمربع سطح برگ به ازای هر متر مربع از خاک تعریف می شود. بدین ترتیب، این مدل برای شبیه سازی سطح برگ، آن را به صورت تابعی از بیوماس تجمعی محاسبه می کند (استوکل و همکاران، ۲۰۰۰).

$$GLA_{today} = \frac{(LAERB_{today} \times SLA)}{(LeafStemPart \times SLA + 1)^2} \quad (1)$$

که در این رابطه، $LAERB_{today}$ بیوماس مربوط به گسترش سطح برگ روزانه برحسب کیلوگرم بر مترمربع، $LAERB_{cum}$ بیوماس تجمع یافته در همان روز برحسب کیلوگرم بر مترمربع، SLA سطح ویژه برگ بر حسب مترمربع بر کیلوگرم و

LeafStemPart ضریب تخصیص برگ به ساقه بر حسب مترمربع بر کیلوگرم است. ضریب تخصیص برگ به ساقه نشان می‌دهد که از بیوماس تولیدی در هر روز چقدر باید به تولید برگ سبز و چقدر باید به تولید ساقه اختصاص یابد. بنابراین، مقدار LAI تولید شده در هر روز، نماینده بیوماس تولیدی در آن روز خواهد بود. در CropSyst پتانسیل تولید بیوماس روزانه به صورت زیر محاسبه می‌گردد (استوکل و همکاران، ۲۰۰۰):

$$B_{pt} = \frac{(K_{pt} \times T_p)}{VPD} \quad (2)$$

در این رابطه، B_{pt} پتانسیل تولید بیوماس گیاه است که به تعرق وابسته است، T_p تعرق پتانسیل گیاه زراعی، VPD میانگین کمبود فشار بخار آب اتمسفری در طول روز و K_{pt} ضریب تعرق بیوماس است. در مدل CropSyst، این طور تخمین زده می‌شود که VPD های نزدیک به صفر عامل رشد نامحدود خواهند بود. برای غلبه بر این مشکل، تخمین ثانویه‌ای از تولید بیوماس در شرایط بدون تنش با روش مانیتیت محاسبه می‌گردد (استوکل و همکاران، ۲۰۰۳):

$$BIPAR = e(IPAR) \quad (3)$$

که در آن $BIPAR$ ، ماده خشک تولیدی به ازای PAR (تشعشع فعال فتوسنتزی) دریافت شده است. e کارایی استفاده از تشعشع و $IPAR$ مقدار روزانه PAR دریافت شده توسط گیاه زراعی است. در مدل CropSyst، شبیه‌سازی عملکرد به بیوماس تجمعی کل در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک و شاخص برداشت بستگی دارد (استوکل و همکاران، ۲۰۰۳):

$$Y = B_{pm} \times HI \quad (4)$$

که در آن Y عملکرد بر حسب کیلوگرم در متر مربع و B_{pm} ماده خشک کل در رسیدگی فیزیولوژیک و بر حسب کیلوگرم در مترمربع است. شاخص برداشت (HI) با استفاده از یک شاخص برداشت در شرایط غیرتنش که بر اساس شدت تنش (آب و نیتروژن) و حساسیت گیاه به تنش در خلال مرحله گل‌دهی و پر شدن دانه تعدیل می‌شود، تخمین زده می‌شود. برای گیاهان حساس به فتوپریود، طول روز (ساعت) بر زمان وقوع مراحل فنولوژیکی تاثیر خواهد داشت و این تاثیر توسط CropSyst هم برای گیاهان روز بلند و هم برای گیاهان روز کوتاه در نظر گرفته می‌شود. فاکتور فتوپریود (f_{photo}) در مدل CropSyst بدین منظور در نظر گرفته می‌شود (استوکل و نلسون، ۲۰۰۰).

$$f_{photo} = \frac{\text{daylength} - \text{daylength}_{if}}{\text{daylength}_{ins} - \text{daylength}_{if}} \quad (5)$$

در این رابطه، f_{photo} فاکتور فتوپریود است و از نظر عددی دامنه آن از صفر تا یک است. هرچه فاکتور فتوپریود به یک نزدیک‌تر باشد، سرعت نمو نسبی (از سبز شدن تا گل‌دهی) نیز بیشتر خواهد بود. daylength طول روز بر حسب ساعت است که مدل CropSyst آن را براساس عرض جغرافیایی محل مطالعه محاسبه می‌کند. daylength_{if} طول روز بحرانی است که در مقادیر بیشتر از آن، سرعت نمو حداکثر است. daylength_{ins} طول روز سقف است و بیانگر طول روزی است که در مقادیر کمتر از آن، سرعت نمو متوقف می‌شود.

برخی از گیاهان از جمله گندم، برای ورود به فاز زایشی به سرما نیاز دارند که در مدل CropSyst به وسیله ضریبی به نام فاکتور بهاره‌سازی (f_{ver}) توصیف و اعمال می‌شود (استوکل و نلسون، ۲۰۰۰).

$$f_{ver} = f_{ver \min} + \frac{[(1 - f_{ver \min}) \times (VD_{sum} - VD_{start})]}{[(VD_{sat} - VD_{start})]} \quad (6)$$

که در این رابطه، f_{ver} فاکتور بهاره‌سازی است که از نظر عددی دامنه آن از صفر تا یک است. هرچه فاکتور بهاره‌سازی به یک نزدیکتر باشد، سرعت نمو نسبی (از جوانه زنی تا ورود به فاز زایشی) نیز بیشتر خواهد بود. $f_{ver\ min}$ حداقل فاکتور بهاره‌سازی است که مقدار آن از نظر عددی بین صفر تا یک است. در حقیقت $f_{ver\ min}$ حداقل سرعت نمو در شرایط عدم بهاره‌سازی است. VD_{start} تعداد روز بهاره‌سازی پایه است که در مقادیر کمتر از آن سرعت نمو حداقل است. VD_{sat} تعداد روزهایی است که گیاه باید تحت بهاره‌سازی قرار گیرد تا نیاز آن مرتفع گردد. این موضوع اصطلاحاً نقطه اشباع بهاره‌سازی گویند. در پایان این دوره سرعت نمو نسبی حداکثر و برابر یک بر روز خواهد بود. VD_{sum} تعداد روزهایی است که گیاه در معرض سرمای مطلوب برای بهاره‌سازی قرار می‌گیرد. در حقیقت جمع تعداد روزهایی است که گیاه سرمادهی مطلوب را تجربه می‌نماید. مدل CropSyst، پارامتر VD_{sum} را به کمک داده‌های دمایی محاسبه می‌کند. این مدل، روزهایی را به حساب می‌آورد که از نظر دمایی در دامنه دمایی مطلوب برای بهاره‌سازی باشند.

ارزیابی مدل

در مدل CropSyst، پارامترهای مختلف گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان وجود دارد که در مرحله واسنجی می‌بایست تعیین شود. دو پارامتر فاکتور فتوپریود و بهاره‌سازی به صورت مجزا برای دو رقم گندم در این پژوهش واسنجی گردید. سایر پارامترها، پس از محاسبه این دو فاکتور تعیین شدند. به منظور واسنجی، از داده‌های پراشت شده در سال نخست استفاده شد. همچنین داده‌های گزارش شده توسط طلاوی (۱۳۹۶) و بررسی‌های پورر ضا (۱۳۸۸) و پورر ضا (۱۳۹۱) در خصوص مدل‌سازی تولید و زوال برگ و پیش‌بینی توزیع ماده خشک بین اندام‌های مختلف ارقام گندم برای مرحله واسنجی مدل CropSyst مورد استفاده قرار گرفت. علت این کار، اهمیت مرحله واسنجی در این مدل و تعیین پارامترهای گیاهی هر دو رقم چمران ۲ و سیروان برای مطالعات سایر محققان در آینده بود. با توجه به اینکه در این پژوهش، در مرحله واسنجی علاوه بر استفاده از داده‌های پژوهش، از داده‌های سایر تحقیقات نیز استفاده شد، ارزیابی در این مرحله براساس آماره‌ی میانگین تفاوت (ME) و نتایج تولید ماده خشک و شاخص سطح برگ انجام گردید (رابطه ۸). بدین ترتیب، تا زمانی که اختلاف نتایج شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به کمترین حد خود رسید، تغییر پارامترهای ورودی مدل CropSyst ادامه یافت. این کار به افزایش دقت و سرعت مرحله واسنجی کمک کرد. سپس داده‌های برداشت شده در سال دوم، برای صحت‌سنجی مدل CropSyst استفاده گردید. در این مرحله، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص توافق (d)، ضریب جرم باقیمانده (CRM)، کارایی مدل (EF) و ضریب تبیین (R^2) برای ارزیابی نهایی مدل CropSyst استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۹) تا (۱۳) نشان داده شده است.

$$ME = O_i - P_i \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| - |O_i|)^2} \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \sum_{i=1}^n O_i} \quad (11)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (12)$$

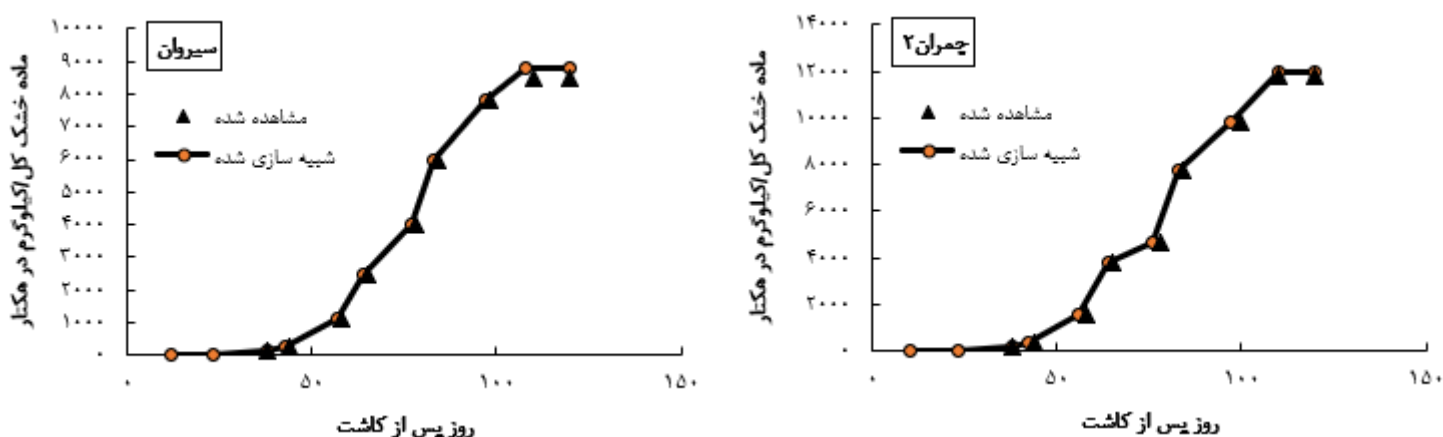
$$R^2 = \frac{(\sum_i^n (Pi - \bar{P})(Oi - \bar{O}))^2}{\sum_i^n (Pi - \bar{P})^2 \sum_i^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (13)$$

نتایج و بحث

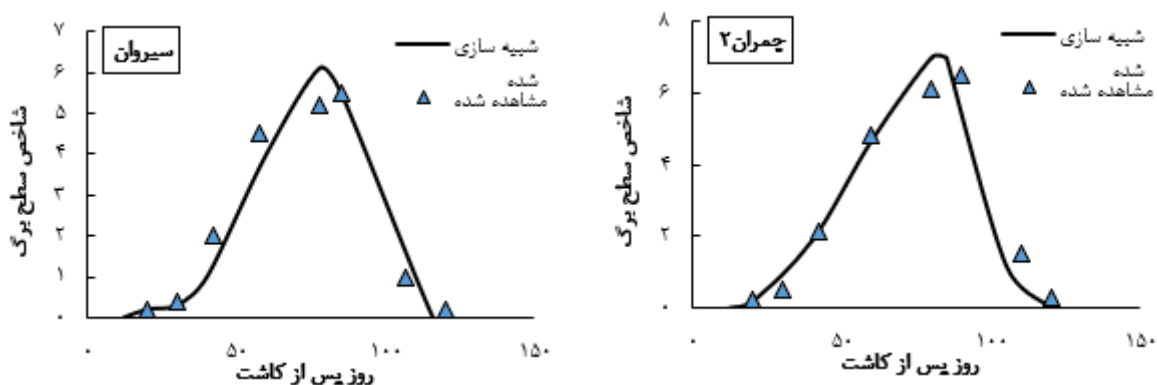
مقدار ماده خشک به دست آمده در مزرعه برای دو رقم چمران ۲ و سیروان به ترتیب ۱۴/۸ و ۱۴/۹ تن در هکتار و عملکرد این دو رقم به ترتیب ۵/۶ و ۴/۸ تن در هکتار بود. تحقیقات سایر محققان از جمله علوی فاضل و رنجبر (۱۴۰۱) در شرایط مشابه تحقیق حاضر نیز نشان داده است که عملکرد رقم چمران ۲ بهتر از سیروان است. نتایج واسنجی مدل CropSyst برای دو رقم گندم مورد مطالعه در جدول (۳) نشان داده شده است. در مرحله واسنجی تنها از آماره ME استفاده گردید تا نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به یکدیگر نزدیک شود. مقادیر اختلاف ماده خشک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای رقم چمران ۲ حدود ۹۱ کیلوگرم بر هکتار و برای رقم سیروان حدود ۲۳۶ کیلوگرم در هکتار بود. در واقع، مدل CropSyst برای شبیه‌سازی ماده خشک هر دو رقم دچار خطای بیش‌برآوردی شد. این نتایج در شکل (۱) نیز قابل مشاهده است. روند شبیه‌سازی ماده خشک در هر دو رقم تا حدود ۱۰۰ روز پس از کاشت مشابه بود، ولی پس از آن، کاهش اختلاف ماده خشک کل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در رقم سیروان بیشتر شد. این عامل می‌تواند به دلیل افزایش اختلاف در شاخص سطح برگ در این رقم نیز باشد (شکل ۲). با این وجود، تفاوت عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در رقم سیروان حدود ۶۴ درصد کمتر از چمران ۲ بود. احتمالاً، بالا بودن شاخص برداشت در رقم سیروان سبب کاهش این اختلاف شده است (جدول ۴). در واقع، گرچه ماده خشک کل در رقم سیروان کمتر از چمران ۲ بود؛ لیکن شاخص برداشت بالاتری نسبت به چمران ۲ داشت. این عامل می‌تواند در نزدیکی نتایج مدل CropSyst به عملکرد در مزرعه کمک کرده باشد. نتایج روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی در شرایط مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نزدیک به یکدیگر بود و به همین دلیل می‌توان به دقت مدل CropSyst اعتماد کرد.

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل برای عملکرد دانه و ماده خشک کل دو رقم گندم

رقم	ماده خشک کل مشاهده‌ای (کیلوگرم بر هکتار)	ماده خشک کل شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر هکتار)	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد دانه مشاهده‌ای (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر هکتار)	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)
چمران ۲	۱۴۸۹۱	۱۴۹۸۲	۹۱	۵۶۲۵	۵۹۸۷	۳۶۲
سیروان	۱۱۲۴۸	۱۱۴۸۴	۲۳۶	۴۸۱۲	۴۶۸۵	۱۲۷
رقم	روز تا گلدهی مشاهده‌ای	روز تا گلدهی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)	روز تا رسیدگی مشاهده‌ای	روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)
چمران ۲	۹۵	۹۳	-۲	۱۳۴	۱۳۲	-۲
سیروان	۸۷	۸۶	-۱	۱۲۸	۱۳۰	۲



شکل ۱- مقایسه ماده خشک کل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ارقام مورد مطالعه در مرحله واسنجی



شکل ۲- مقایسه شاخص سطح برگ مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ارقام مورد مطالعه در مرحله واسنجی

نتایج مقادیر پارامترهای ورودی مدل CropSyst برای هر دو رقم تحت مطالعه در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. در ابتدای این جدول، مقادیر برآورد شده برای فاکتور فتوسنتز و بهاره‌سازی برای هر دو رقم گندم تعیین گردیده است. دو نوع واکنش کمی و کیفی نسبت به بهاره‌سازی در مدل CropSyst وجود دارد. در واکنش کیفی تا زمانی که نیاز بهاره‌سازی به حد معینی نرسد (روز بهاره‌سازی پایه) حداقل سرعت نمو صفر خواهد بود و برای آغاز سرعت نسبی نمو نیاز به مقادیر بهاره‌سازی پایه است. در واکنش کمی، عدم بهاره‌سازی تنها سرعت نمو را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، در حالت عدم بهاره‌سازی، سرعت حداقل نمو در نظر گرفته می‌شود. در ارقام با واکنش کمی، روز بهاره‌سازی پایه صفر خواهد بود. چنانچه گیاهان تعداد روزهای بیشتری تحت سرمادهی باشند و نیاز به بهاره‌سازی بیشتر در آن‌ها تامین شود، سرعت نمو نسبی نیز بیشتر شده تا جایی که سرعت نمو نسبی برابر با یک بر روز خواهد شد. این سرعت نقطه اشباع بهاره‌سازی (VDSat) است (میردوردوست، ۱۳۸۶). با توجه به اینکه نتایج به دست آمده در مرحله واسنجی، نشان دهنده عدم حساسیت مدل CropSyst به بهاره‌سازی بود، لذا بهاره‌سازی ارقام مورد مطالعه در این تحقیق از نوع کمی در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای ورودی مدل CropSyst برای هر دو رقم گندم نیز طی مرحله واسنجی تعیین و برای مرحله صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ورودی مدل CropSyst برای ارقام مورد مطالعه

سیروان	چمران ۲	واحد	پارامتر
۱۳/۸	۱۴	ساعت	طول روز بحرانی
۷/۸	۸	ساعت	طول روز سقف
۰	۰	روز	تعداد روز بهاره‌سازی پایه
۰/۹۳	۰/۹۰	-	حداقل سرعت نمو در شرایط عدم بهاره‌سازی
۲۵	۲۴	روز	نقطه اشباع بهاره‌سازی
۲/۹	۲/۴	-	ضریب تخصیص ساقه به برگ
۱۴	۱۳/۸	-	طول روز بحرانی
۸	۷/۸	-	طول روز سقف
۵	۵	(کیلوپاسکال در کیلوگرم بر مترمربع)	ضریب تعرق
۸۷۶	۷۷۱	(درجه روز رشد)	دوام برگ
۲/۹	۲/۸	(گرم بر مگاژول)	کارایی استفاده از تشعشع
۰/۳۸	۰/۳۶	-	شاخص برداشت
۰/۶۵	۰/۶۵	-	ضریب خاموشی
۲۸	۲۷	(مترمربع بر کیلوگرم)	سطح ویژه برگ
۱۱۰	۱۰۸	-	درجه روز تا سبز شدن
۹۲۵	۹۱۴	-	درجه روز تا حداکثر شاخص سطح برگ
۹۲۵	۹۱۴	-	درجه روز تا گلدهی
۱۰۸۱	۱۰۵۴	-	درجه روز تا شروع پرشدن دانه
۱۸۱۱	۱۷۶۴	-	درجه روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

مقایسه تاریخ رسیدگی و گلدهی در مرحله صحت‌سنجی برای رقم چمران ۲ در جدول (۵) نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، تغییر تاریخ کاشت و قطع آبیاری در مرحله گلدهی اثری بر دقت مدل CropSyst برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی و روز تا گلدهی نداشت. براساس آماره RMSE، اختلاف روز تا رسیدگی و گلدهی برای کلیه تیمارها در رقم چمران ۲ به ترتیب ۳/۴ و ۳/۸ روز بود. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات سایر محققان از جمله یزدانی و همکاران (۱۴۰۲) این مقادیر قابل قبول است. بررسی کارایی مدل براساس دو آماره d و EF نشان داد که مدل CropSyst توانایی لازم برای شبیه‌سازی پارامترهای روز تا رسیدگی و گلدهی در رقم چمران ۲ را داشت. مقدار خطای شبیه‌سازی مدل CropSyst براساس آماره CRM به صفر نزدیک بود. بنابراین، این مدل خطای کمی برای شبیه‌سازی پارامترهای روز تا رسیدگی و گلدهی داشت لیکن برآورد مقادیر پارامترهای مذکور توسط مدل CropSyst بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای بود. نتایج به‌دست‌آمده برای رقم سیروان نیز در جدول (۶) نشان داده شده است. براساس نتایج، مدل CropSyst در برآورد پارامترهای روز تا رسیدگی و گلدهی در رقم سیروان دارای خطای بیشتری نسبت به رقم چمران ۲ بود. همچنین، کارایی مدل CropSyst برای برآورد پارامترهای روز تا رسیدگی و گلدهی در رقم چمران ۲ بیشتر از رقم سیروان بود. با این وجود، مقادیر آماره‌های RMSE و CRM نشان داد که می‌توان به نتایج این مدل برای رقم سیروان نیز اعتماد کرد. در شبیه‌سازی پارامترهای رشد رقم سیروان، نتایج مدل برای

تاریخ های کاشت مختلف و همچنین دو تیمار آبیاری بسیار نزدیک بود. بنابراین، تغییری در دقت مدل CropSyst تحت تیمارهای مختلف مشاهده نشد.

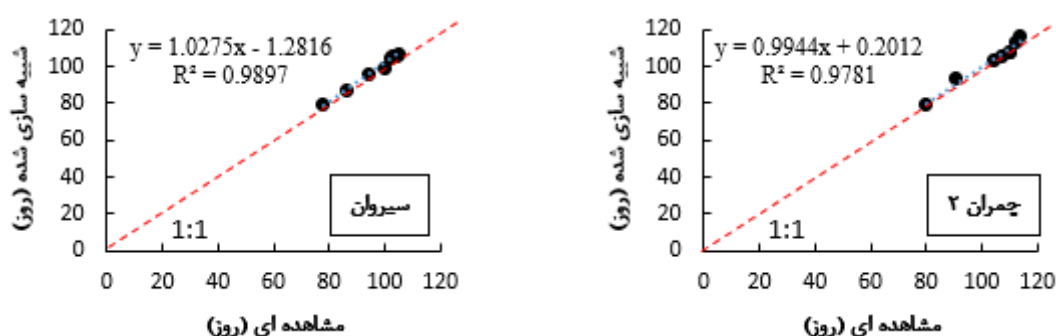
جدول ۵- مقایسه تاریخ رسیدگی و گلدهی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی (رقم چمران ۲)

توضیحات	تیمار	روز تا رسیدگی مشاهده شده	روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)	روز تا گل-دهی مشاهده شده	روز تا گل-دهی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)
تاریخ کاشت	۳۰ مهر	۱۴۵	۱۴۶	۱	۱۱۴	۱۱۶	۲
	۱۵ آبان	۱۴۰	۱۴۲	۲	۱۱۲	۱۱۳	۱
	۳۰ آبان	۱۳۸	۱۴۱	۳	۱۱۰	۱۰۸	-۲
	۱۵ آذر	۱۲۰	۱۱۹	-۱	۱۰۴	۱۰۳	-۱
	۳۰ آذر	۱۱۴	۱۱۳	-۱	۹۱	۹۳	۲
	۱۵ دی	۱۱۱	۱۱۴	۳	۸۰	۷۹	-۱
آبیاری	آبیاری کامل	۱۳۹	۱۳۸	-۱	۱۱۰	۱۰۸	-۲
	قطع آبیاری پس از گلدهی	۱۴۲	۱۴۳	۱	۱۰۷	۱۰۵	-۲
RMSE				۳/۴۲		۳/۸	
D				۰/۹۷		۰/۹۸	
CRM				۰/۰۱۲		۰/۰۳۲	
EF				۰/۹۶		۰/۷۸	
۱۰ درصد میانگین مشاهدات				۱۱/۷۵		۸/۹	

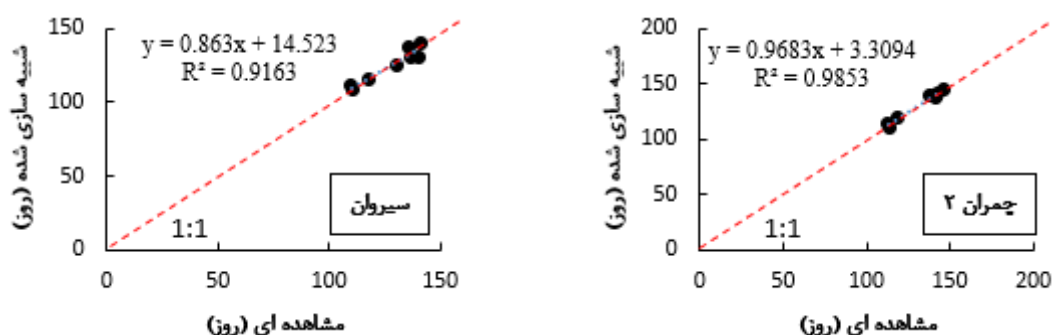
جدول ۶- مقایسه تاریخ رسیدگی و گلدهی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی (رقم سیروان)

سال زراعی	تاریخ	روز تا رسیدگی مشاهده شده	روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)	روز تا گل-دهی مشاهده شده	روز تا گل-دهی شبیه‌سازی شده	تفاوت (روز)
تاریخ کاشت	۳۰ مهر	۱۴۰	۱۳۱	-۹	۱۰۷	۱۰۵	-۲
	۱۵ آبان	۱۳۷	۱۳۰	-۷	۱۰۴	۱۰۲	-۲
	۳۰ آبان	۱۳۰	۱۲۵	-۵	۹۹	۱۰۰	۱
	۱۵ آذر	۱۱۸	۱۱۵	-۳	۹۶	۹۴	-۲
	۳۰ آذر	۱۱۱	۱۰۹	-۲	۸۷	۸۶	-۱
	۱۵ دی	۱۱۰	۱۱۲	۲	۷۹	۷۸	-۱
آبیاری	آبیاری کامل	۱۳۶	۱۳۷	۱	۱۰۵	۱۰۳	-۲
	قطع آبیاری پس از گلدهی	۱۴۱	۱۴۰	-۱	۱۰۶	۱۰۴	-۲
RMSE				۶/۹		۳/۴۵	
D				۰/۹۶		۰/۹۸	
CRM				۰/۰۳۶		۰/۰۴۵	
EF				۰/۸۴		۰/۷۶	

همبستگی مقادیر روز تا گلدهی برای دو رقم چمران ۲ و سیروان در شکل (۱) نشان داده شده است. مقدار آماره R^2 برای هر دو رقم نزدیک به یک بود. به همین دلیل، مدل CropSyst توانایی مطلوبی برای شبیه سازی تغییرات این پارامتر در تیمارهای مختلف داشت. نتایج به دست آمده برای روز تا رسیدگی نیز در شکل (۲) مشاهده می شود. مقادیر آماره برای این پارامتر نیز نزدیک به یک بود. با توجه به کلیه نتایج به دست آمده در مرحله صحت سنجی، می توان به نتایج این مدل برای شبیه سازی روز تا گلدهی و رسیدگی اعتماد کرد.



شکل ۱- همبستگی مقادیر روز تا گلدهی مشاهده‌ای و شبیه سازی شده برای دو رقم چمران ۲ و سیروان



شکل ۲- همبستگی مقادیر روز تا رسیدگی مشاهده‌ای و شبیه سازی شده برای دو رقم چمران ۲ و سیروان

در جدول (۷)، نتایج به دست آمده از شبیه سازی ماده خشک کل و عملکرد دانه برای رقم چمران ۲ نشان داده شده است. بیشترین مقدار ماده خشک کل و عملکرد در این رقم در دو تاریخ ۱۵ و ۳۰ آبان به دست آمد. در نتیجه، این دو تاریخ به دلیل فراهم شدن شرایط دمایی و تابش مناسب در دوره‌های رویشی و زایشی، سبب تأثیر مطلوب بر عملکرد و انتقال مجدد ماده خشک گندم شده‌اند. به همین دلیل نسبت به سایر تاریخ‌های کاشت از عملکرد و ماده خشک بالاتری برخوردار بودند. از طرف دیگر، کمترین ماده خشک کل و عملکرد در دو تاریخ ۳۰ مهر و ۱۵ دی به دست آمد که علت آن فراهم نشدن شرایط مطلوب برای رقم چمران ۲ و مواجه شدن با گرمای انتهای فصل بود. این نتایج با مشاهدات رنجبر و علوی فاضل (۱۴۰۱) در منطقه مورد مطالعه مطابقت داشت. توولد و همکاران (۲۰۰۷) نیز با بررسی اثر تنش گرمای پس از گرده افشانی با گزارش کردند که کاهش عملکرد دانه به دلیل تنش گرمایی انتهای فصل است که مطابق نتایج به دست آمده در این پژوهش است. بیشترین اختلاف بین نتایج ماده خشک کل مشاهده‌ای و شبیه سازی شده در تاریخ‌های ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر و کمترین اختلاف در تاریخ‌های ۳۰ مهر، ۳۰ آذر و ۱۵ دی مشاهده شد. علت آن، پایین بودن ماده خشک کل در مزرعه در این بازه زمانی بود.

روند منظمی بین اختلاف عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای مشاهده نشد، ولی کمترین اختلاف در تاریخ ۱۵ آبان به دست آمد. تاریخ‌های کاشت ۳۰ آبان و ۱۵ دی دارای بیشترین اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بودند. در شرایط آبیاری کامل، اختلاف ماده خشک کل و عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، به ترتیب ۱۹/۵ و ۴۵/۰ درصد کمتر از زمانی بود که آبیاری در مرحله گلدهی قطع شد. بنابراین، دقت مدل CropSyst برای برآورد ماده خشک کل و عملکرد دانه در رقم چمران ۲ در شرایط آبیاری کامل بیشتر از زمان کاهش مصرف آب در انتهای دوره رشد است. مقدار آماره CRM نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل CropSyst بود، ولی با توجه به نتایج دو آماره RMSE و CRM، این مدل دارای خطای قابل قبولی برای شبیه‌سازی ماده خشک کل و عملکرد دانه در رقم چمران ۲ بود. کارایی مدل CropSyst نیز براساس دو آماره EF و d مطلوب بود.

نتایج شبیه‌سازی ماده خشک کل و عملکرد دانه رقم سیروان در جدول (۸) نشان داده شده است. بیشترین ماده خشک کل و عملکرد برای این رقم در دو تاریخ ۳۰ آبان و ۱۵ آذر به دست آمد. در نتیجه، تأخیر در کاشت رقم سیروان سبب افزایش عملکرد آن نسبت به رقم چمران ۲ گردید. رقم سیروان در تاریخ‌های ۳۰ مهر و ۱۵ دی کمترین ماده خشک و عملکرد را داشت که این نتایج مشابه رقم چمران ۲ بود. در واقع، در هر دو رقم، بیشترین عملکرد و ماده خشک در تاریخ‌های ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر مشاهده شد و سایر تاریخ‌های کاشت سبب کاهش عملکرد گردید. آماره‌های CRM و RMSE نشان داد که خطای این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای رقم سیروان کمتر از رقم چمران ۲ بود. بیشترین اختلاف شبیه‌سازی ماده خشک کل برای رقم سیروان در تاریخ‌های ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر مشاهده شد که این نتایج مشابه رقم چمران ۲ بود. کمترین و بیشترین عملکرد دانه در رقم سیروان نیز به ترتیب در تاریخ‌های ۱۵ آبان و ۱۵ دی به دست آمد. گرچه همانند رقم چمران ۲، روند منظمی بین تغییرات دقت شبیه‌سازی در تاریخ‌های کاشت مختلف مشاهده نشد. با قطع آبیاری پس از گلدهی، زمان تا رسیدگی کامل برای رقم چمران ۲ و سیروان به ترتیب ۳ و ۵ روز افزایش یافت (جدول ۵ و ۶). این تغییرات بر عملکرد هر دو رقم تحت تنش رطوبتی اثرگذار بود. به همین دلیل، خطای شبیه‌سازی در تنش رطوبتی نیز افزایش یافت. افزایش دقت شبیه‌سازی ماده خشک کل و عملکرد دانه رقم سیروان در آبیاری کامل نسبت به قطع آبیاری در زمان گلدهی به ترتیب ۱۶/۳ و ۴۵/۰ درصد بود.

جدول ۷- مقایسه ماده خشک کل و عملکرد دانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی (رقم چمران ۲)

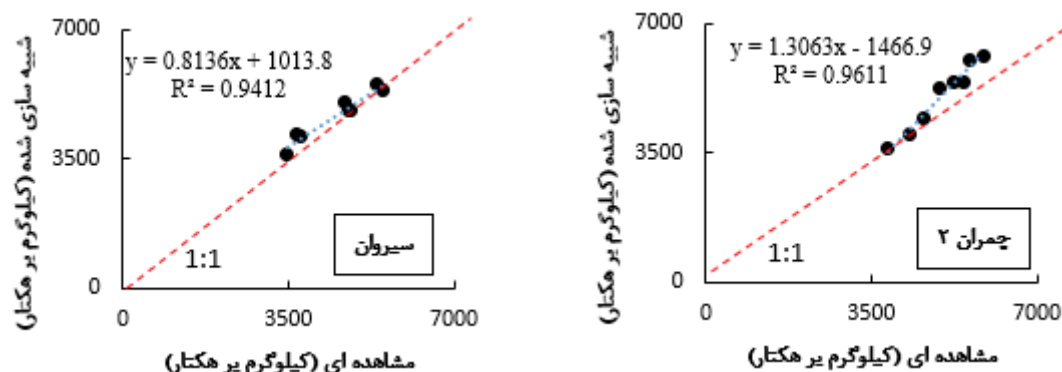
سال زراعی	تاریخ	ماده خشک کل مشاهده شده	ماده خشک کل شبیه‌سازی شده	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد مشاهده شده	عملکرد شبیه‌سازی شده	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)
تاریخ کاشت	۳۰ مهر	۱۰۷۵۰	۱۱۱۹۵	۴۴۵	۳۸۵۰	۳۶۴۰	-۲۱۰
	۱۵ آبان	۱۴۰۱۲	۱۵۲۲۲	۱۲۱۰	۵۴۶۰	۵۴۲۰	-۴۰
	۳۰ آبان	۱۴۱۱۰	۱۵۲۲۵	۱۱۴۵	۵۸۵۰	۶۰۹۰	۲۴۰
	۱۵ آذر	۱۳۱۷۰	۱۴۱۵۰	۹۸۰	۵۲۲۰	۵۴۳۵	۲۱۵
	۳۰ آذر	۱۱۴۲۹	۱۱۴۴۱	-۱۲	۴۶۱۰	۴۴۴۰	-۱۷۰
	۱۵ دی	۱۱۰۱۲	۱۰۵۹۷	-۴۱۵	۴۳۲۰	۴۰۱۱	-۳۰۹
آبیاری	آبیاری کامل	۱۴۰۹۰	۱۵۰۱۲	۹۲۲	۴۹۵۰	۵۲۵۰	۳۰۰
	قطع آبیاری پس از گلدهی	۱۴۰۲۰	۱۵۱۲۱	۱۱۰۲	۵۵۶۰	۵۹۹۵	۴۳۵
RMSE				۶۲۷			۳۱۲

۰/۹۸	۰/۹۳	d
۰/۰۳۱	۰/۰۰۸	CRM
۰/۶۸	۰/۵۹	EF
۴۹۱	۱۲۶۲	۱۰ درصد میانگین مشاهدات

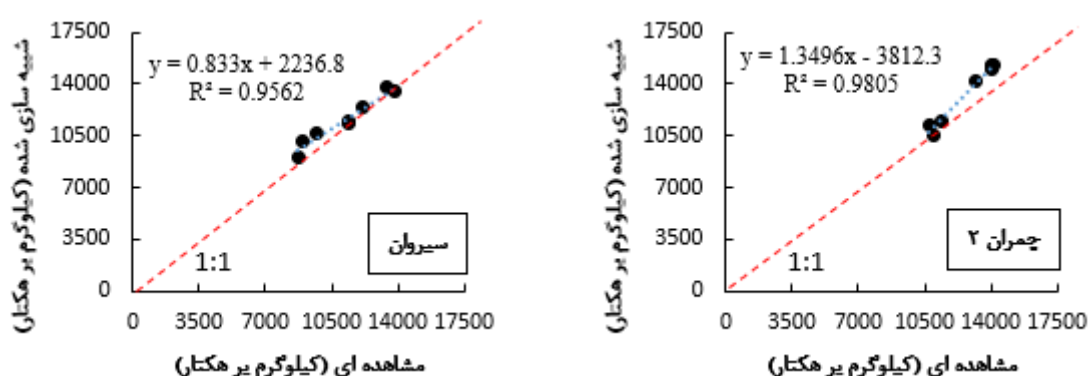
جدول ۸- مقایسه ماده خشک کل و عملکرد دانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی (رقم سیروان)

سال زراعی	تاریخ	ماده خشک کل مشاهده شده	ماده خشک کل شبیه سازی شده	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد دانه مشاهده شده	عملکرد دانه شبیه سازی شده	تفاوت (کیلوگرم بر هکتار)
تاریخ کاشت	۳۰ مهر	۸۹۵۰	۱۰۱۰۰	۱۱۵	۳۶۵۰	۴۱۶۷	۵۱۷
	۱۵ آبان	۱۲۱۰۱	۱۲۴۲۱	۳۲۰	۴۷۰۵	۵۲۳۰	۵۲۵
	۳۰ آبان	۱۳۴۱۰	۱۳۸۳۵	۴۲۵	۵۳۵۰	۵۵۰۲	۱۵۲
	۱۵ آذر	۱۳۸۵۰	۱۳۵۱۰	-۳۴۰	۵۵۰۰	۵۳۶۰	-۱۴۰
	۳۰ آذر	۹۷۵۰	۱۰۶۲۰	۸۷۰	۳۷۵۰	۴۱۱۰	۳۶۰
	۱۵ دی	۸۷۲۸	۹۰۸۱	۳۵۳	۳۴۶۱	۳۶۱۱	۱۵۰
آبیاری	آبیاری کامل	۱۱۳۴۵	۱۱۵۱۷	۱۷۲	۴۷۶۴	۴۸۲۹	۶۵
	قطع آبیاری پس از گلدهی	۱۱۴۱۲	۱۱۳۹۸	-۱۴	۴۸۲۳	۴۷۹۵	-۲۵
RMSE			۳۵۱			۲۴۵	
d			۰/۹۷			۰/۹۴	
CRM			۰/۰۲۴			۰/۰۲۵	
EF			۰/۹۵			۰/۸۲	
۱۰ درصد میانگین مشاهدات			۱۱۰۶			۳۹۵	

همبستگی مقادیر عملکرد دانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ارقام چمران ۲ و سیروان در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر آماره R^2 برای این رقم بالاتر از ۰/۹ به دست آمد. نتایج همبستگی ماده خشک کل برای این دو رقم در شکل (۴) نیز مشابه عملکرد دانه بود. به همین دلیل، مدل CropSyst توانایی زیادی برای پیش‌بینی تغییرات این دو پارامتر در مزرعه داشت. بالاتر بودن ماده خشک کل و عملکرد دانه نسبت به خط ۱:۱ نشان دهنده بیش‌برآوردی این مدل است که بر اساس نتایج جداول (۷) و (۸) نیز تایید گردید. همچنین، نتایج شکل‌های (۳) و (۴) نشان داد که بیشترین خطای شبیه‌سازی برای رقم چمران ۲ زمانی به دست می‌آید که مقادیر عملکرد و ماده خشک ۲ به ترتیب از ۴۰۰۰ و ۱۳۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار بیشتر شود. درحالی‌که افزایش خطای مدل CropSyst برای رقم سیروان در مقادیر کمتر از ۴۰۰۰ و ۱۳۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار مشاهده گردید. لذا این موضوع برای شبیه‌سازی این دو رقم می‌باید در نظر گرفته شود.



شکل ۳- همبستگی مقادیر عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای دو رقم چمران ۲ و سیروان



شکل ۴- همبستگی مقادیر ماده خشک کل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای دو رقم چمران ۲ و سیروان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پارامترهای گیاهی مدل CropSyst برای دو رقم چمران ۲ و سیروان تحت تاریخ‌های کاشت مختلف و مدیریت آبیاری در انتهای فصل رشد تعیین گردید. بدین منظور ابتدا واسنجی این مدل براساس داده‌های سال اول آزمایش و مطالعات سایر محققان در سال‌های اخیر انجام شد. نتایج نشان داد که می‌توان به دقت و کارایی این مدل اعتماد کرد. پارامترهای گیاهی مدل CropSyst از جمله فاکتورهای فتوسنتز و بهاره‌سازی در این مرحله برای دو رقم چمران ۲ و سیروان به دست آمدند. نتایج صحت‌سنجی این مدل براساس داده‌های سال دوم انجام گردید و نتایج نشان داد که خطای مدل CropSyst برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی و گل‌دهی در رقم چمران ۲ به ترتیب ۳/۴ و ۳/۸ روز و برای رقم سیروان به ترتیب ۶/۹ و ۳/۴ روز به دست آمد. خطای این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی ماده خشک و عملکرد رقم چمران ۲ به ترتیب ۶۳۷ و ۳۱۲ کیلوگرم در هکتار و برای رقم سیروان به ترتیب ۳۵۱ و ۲۴۵ کیلوگرم بر هکتار بود. بنابراین، شبیه‌سازی رشد برای رقم چمران ۲ دقت بیشتری داشت ولی ماده خشک و عملکرد نهایی برای رقم سیروان از دقت بیشتری برخوردار بود. مدل CropSyst قادر بود بیش از ۹۴ درصد تغییرات ایجادشده در زمان‌های گلدهی و رسیدگی کامل، عملکرد دانه و ماده خشک کل را برای هر دو رقم مورد مطالعه پیش‌بینی کند. همچنین، میزان خطای این مدل براساس آماره CRM برای هر دو رقم کمتر از یک درصد بود. براساس کلیه نتایج، پیشنهاد می‌شود که از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی ارقام مختلف گندم برای شرایط مورد اشاره در این پژوهش در سایر مناطق کشور استفاده گردد.

References

- پوررضا، ج. (۱۳۸۸). مدل سازی تولید و زوال برگ در ارقام مختلف گندم. *فصلنامه به زراعی کشاورزی*. دوره: ۱۹، شماره: ۲
- پوررضا، ج. (۱۳۹۱). پیش بینی توزیع ماده خشک بین اندام های مختلف در ارقام مختلف گندم. پایان نامه دکتری. *دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز*.
- ترابی، ب.، سلطانی، ا.، گالشی، س.، زینلی، ا. (۱۳۹۹). آنالیز خلا عملکرد: کمی کردن خلا بین عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل گندم در گرگان، تولید گیاهان زراعی، ۱۳ (۱): ۱-۲۴.
- دستمالچی، ع. (۱۳۸۹). برآورد پارامترهای مدل Cropsyst-Wheat برای ارقام استان گلستان. یازدهمین کنگره زراعت و اصلاح نباتات ایران. دانشگاه شهید بهشتی. *پژوهشکده علوم محیطی*.
- رحیمی خوب، ع.، منتظر و م، محسنی. (۱۳۸۸). ارزیابی مدل گیاهی CropSyst در شبیه سازی اثر توامان آب و نیتروژن بر عملکرد و بهره وری آب گندم. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*. دوره ۳، شماره ۱۲۵: ۱-۱۱۳.
- رنجبر، م.، علوی فاضل، م. (۱۴۰۱). ارزیابی اثر تاریخ کشت بر عملکرد و انتقال مجدد ماده خشک ارقام گندم. *دو فصلنامه علوم به زراعی گیاهی*، ۱۲ (۲): ۱۷۰-۱۵۹.
- زارعی، ف. ن.، گنج خرم دل. (۱۳۹۶). شبیه سازی عملکرد گندم تحت مدیریت های مختلف آبیاری توسط مدل CropSyst در منطقه زرقان فارس. *فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب*. سال هشتم، شماره بیست و نهم.
- سلطانی، ا.، م. قلی پور و آ، حاجی زاده. (۱۳۸۴). SBEET: یک مدل ساده برای شبیه سازی رشد و عملکرد چغندر قند. *مجله علوم و صنایع کشاورزی*. شماره ۳۸، ۲۰-۳۳.
- طلاوری، ف. (۱۳۹۶). برآورد پارامتر و ارزیابی مدل wofost برای ارقام گندم در شرق استان خوزستان. پایان نامه کارشناسی ارشد. *دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامهرمز*.
- میراخوری، م. ب.، میر شکاری. ا.، امیری. ف.، پاک نژاد و م. یارنیا. (۱۳۹۵). شبیه سازی بهره وری آب در برنج تحت مدیریت کم آبیاری و نیتروژن با استفاده از مدل گیاهی CropSyst. *نشریه پژوهش های زراعی ایران*. جلد ۱۴، شماره ۴: ۷۱۱-۷۲۲.
- یزدانی، ر.، رزمخواه، ه.، فرارویی، ع.، رستمی راوری، ا. (۱۴۰۲). ارزیابی مدل CropSyst در تخمین عملکرد گندم رقم اولند تحت مدیریت های مختلف آبیاری. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲ (۱): ۹۴-۱۱۲.
- یزدانی، ر.، رزمخواه، ه.، فرارویی، ع.، رستمی راوری، ا. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل CropSyst در تخمین عملکرد گندم رقم الوند تحت مدیریت های مختلف آبیاری، *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲ (۱): ۹۴-۱۱۲.
- Achir, J., Iorshase, A., Esiefarienrhe, B.M. 2018. A Hybrid WOFOST and Cropsyst Model for the Prediction of Crop Yield. *IJCATR*. Volume 8–Issue 01, 04-12, 2018, ISSN:-2319–8656.
- Ambrona, D., Leary, C. G. H. O., O’Leary, G. J., O’Connell, G. J., Connor, M. G. 2001. Application of CropSyst to a new location and crops: advantages and limitation. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems, Florence, Italy*, 16/18 JULY, pp. 127/128.
- Bouazzama, B., Mailhol, J. C., Xanthoulis, D., Bouaziz, A., Ruelle, P., Belhouchette, H. 2013. Silage Maize Growth Simulation Using Pilote And Cropsyst Model. *Irrig. And Drain*. 62: 84–96
- Jara, J., Stockle, C.O, 1999. Simulation of water uptake in maize, using different levels of process detail. *Agron.J*. 91, 256-265.
- Marsal, J., Stockle, C.O. 2012. Use of CropSyst as a decision support system for scheduling regulated deficit irrigation in a pear orchard. *Irrig Sci*. 30:139–147

- Muli, M., Onwonga, R., Karuku, G., Kathumo, V., Nandukule. M. 2015. Simulating Soil Moisture under Different Tillage Practices, Cropping Systems and Organic Fertilizers Using CropSyst Model, in Matuu Division, Kenya. *Journal of Agricultural Science*; Vol. 7, No. 2; 2015 ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760
- Ouda, S., Noreldin, T., Alacon, J. J., Ragab, R., Caruso, G., Sekara, A., Abdelhamid, M. T. 2021. Response of Spring Wheat (*Triticum aestivum*) to Deficit Irrigation Management under the Semi-Arid Environment of Egypt: Field and Modeling Study, *Agriculture*, 11: 90.
- Pala, M., Stockle, C.O., Harris. H.C. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum durum*) growth under differential water and nitrogen in a Mediterranean type of environment using CropSyst. *Agric. Syst.* 51:147-163.
- Pannkuk, C. D., Stockle, C.O., Papendick, R.I. 1998. Evaluating CropSyst simulation rescheduling was similar in both growing seasons for tions of wheat management in a wheat-fallow region of the US pacific north-only 'Giza 126'. Thus, based on the comparative results west. *Agricultural System* 57 (2), 121-133
- Samaha, A., OUDA, N., Tahany, H.M., Oussama, T. A., Magdi. 2015. CropSyst model for wheat irrigation water management with fresh and poor quality water. *Journal of Water and Land Development*
- Samaha, O., Khalil, F., EL Afandi, G. 2010. Using CropSyst model to predict barley under climate change condition in Egypt. *Afr J Plant Sci Biotechnol.* 4 (1): 1-5.
- Sinclair, T.R., Seligman N.G. 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agron. J.* 88:698-704.
- Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J., Zeinali, E. 2006. Modeling chicpea growth and development: phonological development. *Field Crops Res.* 99: 1-13.
- Stockle, C. O., Liu, M., Kadam, S. A., Evett, S. R., Merek, G., Colaizzi, P.D. 2024. Comparison of Crop Model-Data Fusion and Satellite-Based Energy Balance Methods for On-Farm Estimation of Crop Evapotranspiration. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4685789>.
- Stockle, C.O., Nelson, R. 2000. CropSyst User's manual (Version) 0.3. Biological Systems Engineering Dept. Washington State University, Pullman, WA.
- Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Stockle, C.O., Martin, S., Campbell, G.S. 1994. CropSyst, a cropping systems model: *water/nitrogen budgets and crop yield*. *Agric. Syst.* 64: 335-359.
- Suárez-Rey, E.M., Romero-Gómez, M., Giménez, C., Thompson, R.B., Gallardo, M. 2016. Use of EU-Rotate_N and CropSyst models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. Contents lists available at ScienceDirect, *Agricultural Systems*.
- Tahany, N., Samiha, O., Oussama, M., Magdi, T.B. 2015. CropSyst model for wheat under deficit irrigation using sprinkler and drip irrigation in sandy soil. *Journal of Water and Land Development*.
- Tewelde, H., Fernandez, C.J., Erickson, C.A. 2007. Wheat cultivars adapted to postheading high temperature stress. *Crop Science*, 192: 111-120.
- Umair, M., Shen, Y., Qi, Y., Zhang, Y., Ahmad, A., Pei, H., Liu, M. 2017. Evaluation of the CropSyst Model during Wheat-Maize Rotations on the North China Plain for Identifying Soil Evaporation Losses. *Frontiers in Ecology and Evolution*.
- Yadav, S.T., Wagh, N. R. 2023. Groundnut modeling for yield using CropSyst model under middle Gujarat * S.T. YADAV AND N. R. WAGH. *Journal of Crop and Weed*, 19 (1): 43-47.