

شبیه‌سازی تاثیر رژیم‌های رطوبتی بر رشد و عملکرد ذرت (*Zea mays*) در منطقه کرمانشاه توسط مدل CERES-Maize

فرزاد مندنی^{۱*}، پریسا کرمی^۲، روزین قبادی^۳

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- دانش آموخته گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

* مسؤل مکاتبه: F.mondani@razi.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2021.280069.1091

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹

چکیده

یکی از ابزارهای معتبر جهت مطالعه اثرات مدیریت بر تولیدات کشاورزی استفاده از مدل‌های رشد گیاهان زراعی است. به منظور تعیین اثر سطوح مختلف آبیاری بر رشد و تولید ارقام ذرت دانه‌ای و اعتبار سنجی مدل CERES-Maize، آزمایشی به صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه رازی طی سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ اجرا گردید. فاکتور اصلی سه سطح آبیاری (تأمین ۱۳۰، ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی) و فاکتور فرعی سه رقم ذرت (SC704, Simon, BC678) بود. صفات مورد ارزیابی شامل مراحل نمو فنولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل، عملکرد دانه ذرت و تبخیر و تعرق روزانه بود. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که مقادیر nRMSE ارقام SC704, Simon, BC678 برای روز تا گرده‌افشانی به ترتیب ۲/۸، ۱/۷ و ۱/۹ درصد، برای روز تا رسیدن فیزیولوژیک ۴/۲، ۴ و ۴/۶ درصد، برای وزن خشک کل ۹/۶، ۷/۰ و ۱۳/۴ درصد و برای عملکرد دانه ۱۲/۹، ۵/۲ و ۶/۱ درصد میانگین مقادیر مشاهده شده بود. میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده برای تبخیر و تعرق از ۱۲/۹ تا ۳۵/۵ درصد میانگین مشاهدات بود. با کاهش محتوای آب قابل دسترس گیاه در تیمار کم آبیاری در مقایسه با تیمارهای دیگر آبیاری، میزان تبخیر و تعرق جمعی شبیه‌سازی شده به تدریج از تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده فاصله گرفت، به طوری که در تیمار تنش کمبود آب مدل میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از شرایط مزرعه پیش‌بینی نمود. به‌طور کلی نتایج ارزیابی‌ها مشخص کرد که مدل CERES-Maize قادر است واکنش رشد و عملکرد ارقام ذرت را در شرایط رطوبتی مختلف خاک با دقت مناسبی پیش‌بینی کند و می‌توان از آن برای ارزیابی تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری در مزارع ذرت استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، کم آبیاری، ارزیابی مدل، مراحل نمو، واسنجی مدل

مقدمه

به سرمایه‌گذاری در تحقیق و افزایش تولید در واحد سطح به شدت ضروری می‌باشد (Hearn, 2014). سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT) یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین بسته‌های نرم‌افزاری حاوی مدل‌های شبیه‌ساز گیاهان زراعی است که از اواخر دهه ۱۹۸۰ تاکنون در بیش از ۹۰ کشور دنیا توزیع شده است (Hajishabani et al., 2020; Hogenboom et al., 2003; Jones et al., 2019; Mondani et al., 2018a). این بسته نرم‌افزاری حاصل تلاش گروهی از محققان، به ویژه

در بین گیاهان خانواده غلات ذرت (*Zea mays*) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در دنیا است، به طوری که بعد از گندم و برنج در رتبه سوم از نظر سطح زیر کشت قرار دارد (Ashofteh et al., 2011). در بین غلات ذرت طول دوره رشد نسبتاً کوتاه (Mahmood et al., 2001) و بیشترین پتانسیل تولید (Muthukumar et al., 2005) را دارد. این گیاه به طور گسترده برای خوراک حیوانات و مواد خام از جمله سوخت‌های زیستی استفاده می‌شود (Alexandratos and Bruinsma, 2012). تقاضا برای ذرت تا سال ۲۰۵۰ دو برابر خواهد بود و نیاز

۱. Decision Support System for Agrotechnology Transfer

مشاهده شده (۱۴۹روز) این مقادیر در محدوده نرمال تاریخ برداشت در شمال شرقی چین قرار داشتند.

استان کرمانشاه با ۱۴/۵ درصد از کل سطح برداشت ذرت دانه‌ای معادل ۳۴ هزار هکتار و میزان تولیدی در حدود ۳۰۶ هزار تن بعد از استان خوزستان، دارای بیشترین سطح برداشت ذرت دانه‌ای در کشور است (Anonymous, 2019). با توجه به اهمیت این استان در تولید ذرت و سطح زیر کشت بالای محصول ذرت در این استان، این موضوع گویای این مطلب است که قابلیت افزایش تولید ذرت در سطح استان وجود دارد. از طرفی مدیریت ناکارآمد منابع مورد نیاز برای تولید می‌تواند اثرات منفی شدیدی بر عملکرد ذرت در این منطقه داشته باشد. بنابراین برای مقابله با کاهش عملکرد حاصل از این تغییرات تلاش برای شناسایی و رفع عوامل محدود کننده تولید، قابلیت افزایش تولید ذرت در سطح استان را فراهم می‌سازد. بنابراین، هدف از اجرای این تحقیق ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد برخی از ارقام رایج ذرت دانه‌ای تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری در شرایط آب و هوایی منطقه کرمانشاه بود.

مواد و روش‌ها

ارزیابی دقت (اعتبار سنجی) مدل با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های مزرعه‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل انجام می‌گیرد (Jalilian *et al.*, 2018; Mondani *et al.*, 2015). به منظور اعتبار سنجی مدل CERES-Maize و همچنین تعیین اثر مقادیر متفاوت آب بر رشد، صفات فیزیولوژیک و عملکرد ارقام متداول ذرت دانه‌ای، آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا) انجام شد. منطقه مورد نظر دارای متوسط بارندگی سالیانه ۴۴۴/۷ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد، حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق سالیانه به ترتیب ۴۴/۱ و ۲۷- درجه سانتی‌گراد است. خصوصیات آب و هوایی ماه‌های اجرای آزمایش طی دوره رشد ذرت در منطقه مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

مدل‌سازان دانشگاه فلوریدا، دانشگاه جورجیا، دانشگاه گونف و دانشگاه هاوایی می‌باشد (Hoogenboom *et al.*, 2015). از پر کاربردترین مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری DSSAT، مدل‌های گروه CERES^۱ بوده که قادر به شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد غلات هستند (Hoogenboom *et al.*, 1994). مدل شبیه‌ساز اختصاصی ذرت (CERES-Maize) یکی از مشهورترین مدل‌های این گروه است که در سال ۱۹۸۶ معرفی شده و پس از آن تغییرات کمی در مدل اولیه به وسیله محققان پیشنهاد شده است (Ritchie *et al.*, 1998). این مدل طی دهه‌های اخیر در سرتاسر جهان به طور گسترده‌ای در شرایط آب و هوایی متفاوت به کار گرفته و توانایی آن ثابت شده است (Folberth *et al.*, 2013; Dechmi *et al.*, 2010). در بیشتر آزمایش‌ها مشخص شده است که مدل CERES-Maize قادر است اثرات تنش کمبود رطوبت و مدیریت آبیاری را بر رشد و عملکرد ذرت با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند.

اثر مدیریت‌های آبیاری بر عملکرد دانه ذرت با استفاده از مدل CERES-Maize در اسپانیا بررسی و نشان داده شد که با انجام آبیاری یکنواخت در مقایسه با توزیع غیریکنواخت آب در سطح مزرعه، جذر میانگین مربعات خطای (RMSE^۲) عملکرد دانه از ۶۳۷ به ۳۲۸ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت (Salmeron *et al.*, 2012). در پژوهشی دیگر با هدف بهبود کارایی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت، به برآورد پارامترهای مورد نیاز این مدل در شمال شرقی چین پرداخته شد و بعد از برآورد پارامترهایی نظیر ضرایب ژنتیکی، کارایی مصرف نور، واحد دمایی مورد نیاز تا سبز شدن و فاکتور حاصلخیزی خاک نتایج نشان دهنده تطابق مناسب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده بود (Hai-long *et al.*, 2012). جذر میانگین مربعات خطا و شاخص ویلموت^۳ برای عملکرد دانه به ترتیب ۱۱۷۱ کیلوگرم در هکتار و ۰/۵۸ به دست آمد و برای وزن خشک کل این مقادیر به ترتیب ۱۵۰۲ کیلوگرم در هکتار و ۰/۹۸ گزارش شد. در خصوص نمو فنولوژیک، با وجود اختلاف بین تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده (۱۶۵روز) و تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک

۱. Crop estimation through resource and environment synthesis

۲. Root mean square error

۳. Willmott index

جدول ۱- خصوصیات آب و هوایی ماه‌های اجرای آزمایش طی دوره رشد ذرت

Table 1- Climatic characteristics of the experiment months during the maize growing period

بارندگی Rain (mm)	نور تجمعی خورشید Cumulative sunlight (MJ m ⁻²)	درجه حرارت روزانه Daily Temperature (°C)			ماه Month
		متوسط Average	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	
168.1	457.5	15.1	21.4	9.1	اردیبهشت May
6.1	589.2	23.0	31.7	12.6	خرداد June
-	613.8	30.1	39.6	17.8	تیر July
-	449.5	30.2	40.5	18.0	مرداد August
-	489.6	26.2	36.6	14.6	شهریور September

حدود ۱۸ سانتی‌متر بود، به‌طوریکه تراکم نهایی مزرعه ۷/۵ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد. به منظور ممانعت از نفوذ تیمارهای آبیاری بین کرت‌های اصلی سه متر به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. کاشت بذر ارقام ذرت در ۱۷ اردیبهشت ماه به‌صورت دستی در عمق پنج سانتی‌متری روی پشته انجام شد. در هر کپه سه عدد بذر ضدعفونی شده با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام دو در هزار قرار داده شد. به منظور رسیدن به تراکم مطلوب، در مرحله چهار برگی بوته‌های اضافی تنک شدند. در مرحله پنج برگی مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ با استفاده از علف‌کش نیکوسولفورون (دو لیتر در هکتار) صورت گرفت. به علاوه تا مرحله ده برگی وجین دستی علف‌های هرز انجام شد. تا قبل از مرحله شش برگی، آبیاری مطلوب برای تمام کرت‌ها و تیمارها صورت گرفت. تیمار آبیاری با شروع مرحله شش برگی بر اساس سطوح در نظر گرفته شده اعمال شد (جدول ۳).

قبل از هر آبیاری، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) از سایت ایستگاه هواشناسی هوشمند گروه مهندسی آب دانشکده علوم مهندسی کشاورزی^۱ (در مجاورت مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی) اخذ و پس از ضرب در مقادیر روزانه ضریب گیاهی (Kc)، نیاز آبی ذرت (ETc) در روز مورد نظر محاسبه شد (معادله ۱). اساس محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در این سایت معادله پنمن-مونتیث فائو^۲ است (معادله ۲). در نهایت میزان آب طبق معادله ۳ محاسبه و مقادیر

آزمایش به صورت کرت‌های یک بار خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی سه سطح آبیاری شامل بیش آبیاری (تأمین ۱۳۰ درصد نیاز آبی، IR_{130%})، آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، IR_{100%}) و کم آبیاری (تأمین ۷۰ درصد نیاز آبی، IR_{70%}) و فاکتور فرعی سه رقم ذرت (Simon, BC678 و SC704) بود. رقم SC704، هیبرید سینگل کراس، دیررس، پایداری عملکرد خوب و نیمه حساس به بیماری سیاهک معمولی و منشاء آن آمریکا است. رقم Simon، هیبرید سینگل کراس، نیمه دیررس متحمل به بیماری‌های برگ، تحمل مناسب به تنش‌های شوری و خشکی انتهای فصل، پروتئین بالا و منشاء آن اسپانیا است. رقم BC678، هیبرید سینگل کراس، میان‌رس، بوته‌های قوی و مقاوم به خوابیدگی و منشاء آن کرواسی است. قبل از اجرای آزمایش برای تعیین خصوصیات خاک، نمونه‌برداری تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک تهیه و برای تجزیه فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه آب و خاک ارسال شد (جدول ۲).

به منظور آماده‌سازی زمین، شخم پاییزه و دیسک بهاره انجام شد. بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۲)، فسفر به میزان ۱۷۵ کیلوگرم در هکتار از منبع کود سوپر فسفات تریپل و پتاسیم به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود سولفات پتاسیم به‌صورت پیش‌کاشت استفاده شدند. نیتروژن نیز به میزان ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود اوره در سه نوبت (دو برگی، هفت برگی، ظهور گل‌تاجی) مصرف شد.

طول هر کرت فرعی پنج متر و شامل شش خط کاشت بود. فاصله ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف

1. www.fieldclimate.com
2. FAO Penman-Monteith

در این معادلات، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، ET_C نیاز آبی یا تبخیر و تعرق ذرت (میلی‌متر در روز)، K_C ضریب گیاهی ذرت در روز مورد نظر، R_n تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر متر مربع در روز)، T متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (سانتی‌گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به درجه حرارت در نقطه‌ای که درجه حرارت در آن T باشد (کیلو پاسکال بر سانتی‌گراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر متر مربع در روز) است (Alizadeh and Kamali, 2008).

آب در نظر گرفته شده برای هر کرت در دوره‌های هفت روزه در اختیار گیاهان قرار گرفت. آبیاری توسط لوله پلی‌اتیلن و شیلنگ انجام و حجم آب ورودی به کرت‌ها با کنتور کنترل گردید. به دلیل بسته بودن انتهای جوی‌ها، تلفات رواناب صفر و راندمان آبیاری ۹۰ درصد منظور شد. پس از اطمینان از وقوع رسیدن فیزیولوژیک در تمام کرت‌ها آبیاری متوقف شد.

$$ET_C = ET_0 \times K_C \quad (1)$$

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + [890\gamma / (T + 273)](e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} U_2 \quad (2)$$

$$\text{میزان آب (میلی‌متر در متر مربع در روز)} \quad (3)$$

$$= \frac{\text{مساحت کرت (مربع متر)} \times \text{مجموع نیاز آبی روزانه (میلی‌متر در روز)}}{\text{راندمان آبیاری}}$$

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 2- Physical and chemical properties of experiment soil

ویژگی Property	عمق Depth (cm)	
	0-30	30-60
بافت Texture	رسی - شنی Clay-Silt	رسی - شنی Clay-Silt
رس Clay (%)	24.00	27.20
سیلت Silt (%)	39.00	38.70
شن Sand (%)	37.00	34.10
اسیدیته pH	7.55	7.60
ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (meq.100g)	18.50	-
املاح محلول Soluble salts (ds.cm ⁻¹)	0.60	-
کربن آلی Organic carbon (%)	1.17	1.12
نیتروژن کل Total N (%)	0.17	0.11
فسفر قابل جذب Absorbable P (ppm)	5.20	-
پتاسیم قابل جذب Absorbable K (ppm)	340.00	-
آب خاک در نقطه پژمردگی دائم Soil ware in wilting point (%)	20.50	22.50
آب خاک در حد ظرفیت زراعی Soil ware in field capacity (%)	32.50	35.50
محتوای آب خاک در نقطه اشباع Soil ware in saturation point (%)	49.00	49.50
هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic (cm hr ⁻¹) conductivity	0.41	0.29
وزن مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.42	1.45

جدول ۳- زمان و مقدار آب مصرفی برای سطوح مختلف آبیاری
Table 3- Date and amount of water used for different levels of irrigation

تاریخ Date	روز پس از کاشت Day after sowing	مقدار آب Amount water (mm)		
		IR _{70%}	IR _{100%}	IR _{130%}
97.2.18	1	50	50	50
97.2.25	8	50	50	50
97.3.1	15	50	50	50
97.3.8	22	50	50	50
97.3.15	29	7.60	10.8	14.1
97.3.22	36	12.8	18.3	23.8
97.3.29	43	22.8	32.6	42.4
97.4.5	50	34.4	49.1	63.9
97.4.12	57	30.9	44.1	57.4
97.4.19	64	43.7	62.4	81.1
97.4.26	71	43.8	62.6	81.4
97.5.2	78	44.5	63.6	82.7
97.5.9	85	41.6	59.4	77.3
97.5.16	92	42.3	60.4	78.6
97.5.23	99	41.5	59.3	77.1
97.5.30	106	40.8	58.3	75.8
97.6.6	113	32.6	46.6	60.6
97.6.13	120	26.0	37.1	48.3
مجموع آب مصرفی Total water consumption		621.5	802.3	1064.3

اندازه‌گیری‌ها

در طول فصل رشد، یادداشت برداری تاریخ وقوع مراحل مختلف نمو برای هر یک از کرت‌ها انجام شد. تعداد روز سپری شده از کاشت (اولین آبیاری) تا تاریخ وقوع مرحله مورد نظر (۵۰ درصد بوته‌ها وارد مرحله نمو مدنظر شده باشند) شمارش شد. پس از سبز شدن تا رسیدن فیزیولوژیک، شش مرتبه در مراحل مختلف نمو، از هر کرت سه بوته به طور تصادفی برداشت شد. نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون خشک شد و پس از توزین به عنوان وزن خشک کل منظور شد. سطح برگ نیز با استفاده از نرم‌افزار J Microvision محاسبه گردید (Hajishabani *et al.*, 2020). برای اندازه‌گیری روند تغییرات عملکرد دانه نیز از شروع مرحله تشکیل دانه‌ها تا انتهای دوره رشد چهار مرحله نمونه‌برداری صورت گرفت. به این صورت که ابتدا بلال‌ها از بوته جدا شده و سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون خشک شدند و در انتها دانه‌ها از چوب بلال جدا گردید و توزین شد. در پایان دوره رشد ذرت نیز با مشاهده لایه سیاه در محل اتصال دانه به چوب بلال و اطمینان از

برای تعیین ضریب گیاهی و استفاده از آن برای تبدیل تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تبخیر و تعرق ذرت، بر اساس روش پیشنهادی فانو، منحنی تغییرات ضریب گیاهی در طول دوره رشد ذرت رسم شد تا در هر مرحله از رشد، ضریبی متناسب با همان مرحله اعمال شود. در این روش کل دوره رشد به چهار بخش تقسیم می‌شود. مرحله ابتدایی، از زمان کاشت تا زمانی که گیاه ۱۰ درصد سطح زمین را بپوشاند. مرحله رشد و توسعه، از پایان مرحله ابتدایی تا زمانی که گیاه به حداکثر رشد خود برسد و ۷۰ تا ۸۰ درصد سطح زمین را بپوشاند. مرحله میانی، از پایان مرحله رشد و توسعه تا زمانی که در حال تکامل است. مرحله نهایی از پایان مرحله میانی تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک است (Bafkar *et al.*, 2006). در این مطالعه طول مرحله ابتدایی رشد، مرحله رشد و توسعه، مرحله میانی و مرحله نهایی به ترتیب ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۳۰ روز در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی که توسط نرم‌افزار AGWAT (Alizadeh and Kamali, 2008) استخراج شد، برای کل مرحله ابتدایی رشد، کل مرحله میانی و روز آخر مرحله نهایی به ترتیب معادل ۰/۲، ۱/۲۵ و ۰/۶ منظور شد.

واسنجی مدل

واسنجی مدل CERES-Maize با تعیین ضرایب ژنتیکی رقم مورد نظر برای منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. ضرایب ژنتیکی مورد نیاز این مدل شامل P₁ (درجه روز رشد از ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس دمای پایه هشت درجه سانتی‌گراد)، P₂ (میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب)، P₅ (درجه روز رشد از ابریشم‌دهی تا رسیدن فیزیولوژیک)، G₂ (تعداد دانه تولید شده در بوته تحت شرایط مطلوب رشد)، G₃ (سرعت پر شدن دانه در مرحله پر شدن خطی تحت شرایط مطلوب رشد) و PHINT (درجه روز رشد بین ظهور نوک دو برگ متوالی (فیلوکرون)) می‌باشد (Hoogenboom et al., 1994). برای تخمین این ضرایب از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی بسته نرم‌افزاری DSSAT (GENCALC) استفاده می‌شود. برای تنظیم بهترین ضرایب ژنتیکی آنالیز حساسیت به روش سعی و خطا به طور مکرر تا زمان حصول تطابق مطلوب، ادامه می‌یابد. ضرایب نهایی در فایل ارقام گیاهی وارد و برای شبیه‌سازی استفاده خواهد شد. در این مطالعه برای ساخت فایل ارقام گیاهی از نتایج آزمایشی دیگر که به منظور برآورد ضرایب ژنتیکی ارقام متداول ذرت دانه‌ای در استان کرمانشاه برای مدل CERES-Maize اجرا شده بود، استفاده شد (Mondani, 2018b). در پایان نیز به منظور مقایسه داده‌های جمع‌آوری شده از مزرعه با داده‌های شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار، فایل‌های A² و T³ آماده شدند. فایل A شامل اطلاعات زمان وقوع گرده‌افشانی، زمان وقوع رسیدن فیزیولوژیک، حداکثر شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه در زمان برداشت بود. فایل T نیز داده‌ای روند تغییرات شاخص سطح برگ، وزن خشک کل، عملکرد دانه و تبخیر و تعرق تجمعی طی دوره رشد را شامل شد.

تعیین اعتبار مدل

مدل با دریافت ورودی‌ها، محاسبات را از زمان کاشت تا رسیدن فیزیولوژیک با گام زمانی روزانه انجام داد. با اجرای مدل زمان وقوع مراحل فنولوژی، تجمع و تسهیم ماده خشک، رشد

وقوع رسیدگی فیزیولوژیک، آبیاری متوقف شد. پس از کاهش رطوبت دانه‌ها با حذف دو خط کناری و دو بوته از ابتدا و انتهای هر کرت، بوته‌های دو متر مربع از دو خط میانی هر کرت که برای برداشت نهایی در نظر گرفته شده بود، برداشت شد.

مدل CERES-Maize

به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های مورد ارزیابی گیاه ذرت و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی، مدل CERES-Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT v4.6 استفاده شد (Hoogenboom et al., 2015). برای شبیه‌سازی توسط این مدل ابتدا لازم است که داده‌های مورد نیاز در قالب فایل‌های خاصی سازمان‌دهی و به عنوان ورودی‌ها به مدل معرفی شوند. اطلاعات مدیریت زراعی که شامل گونه گیاهی، تاریخ کاشت، روش کاشت، عمق کاشت، فاصله ردیف‌های کاشت، تراکم بوته در واحد سطح، تاریخ، نوع، مقدار و روش کاربرد نیتروژن، روش آبیاری، راندمان آبیاری، تاریخ آبیاری و مقدار آب مصرفی در هر مرحله از آبیاری بود، توسط زیر مدل XBUILD به مدل ارائه می‌شود. اطلاعات هواشناسی که شامل داده‌های روزانه مربوط به شدت تشعشع خورشید (مگاژول بر متر مربع)، بیشترین و کمترین درجه حرارت (سانتی‌گراد) و مقدار بارش (میلی‌متر) بود، برای سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ از ایستگاه هواشناسی هوشمند گروه مهندسی آب دانشکده علوم مهندسی کشاورزی استخراج شد و توسط زیر مدل WeatherMan برای مدل تعریف می‌شود.

برای ساخت فایل خاکشناسی رنگ خاک، وضعیت زهکشی، وضعیت رواناب، درصد هر یک از ذرات رس، سیلت و شن، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته، درصد کربن آلی، محتوای نیتروژن، خصوصیات نگهداری آب در خاک (محتوای آب خاک در نقطه پژمردگی دائم، ظرفیت زراعی، اشباع)، هدایت هیدرولیکی اشباع و وزن مخصوص ظاهری به عنوان اطلاعات ضروری به زیر مدل SBuild ارائه شدند (جدول ۲). یکی از مهمترین ورودی‌های مدل در فایل مدیریت زراعی اطلاعات مربوط به ارقام مورد بررسی می‌باشد که قبل از اجرای مدل و فرایند تعیین اعتبار می‌بایست ابتدا در قالب فرایند واسنجی برای مدل تهیه و به آن معرفی شوند. در بسته نرم‌افزاری DSSAT اطلاعات مربوط به ارقام مورد بررسی تحت عنوان ضرایب ژنتیکی شناخته می‌شوند.

1. Genetic calculation
2. Harvest data
3. Time-series data

آماري و رسم نمودارها از ابزارهاي GBuild^۲ و Easy Grapher موجود در بسته نرم‌افزاري DSSAT استفاده شد.

نتایج و بحث

مراحل نمو فنولوژیک

نتایج اعتبارسنجی نشان داد که صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری میانگین مرحله نمو فنولوژیک شبیه‌سازی شده روز از کاشت تا گرده‌افشانی برای ارقام SC704، Simon و BC678 به ترتیب ۷۸، ۷۴ و ۷۴ روز پس از کاشت بود، در حالی که میانگین مراحل نمو فنولوژیک مشاهده شده به ترتیب ۷۶، ۷۴ و ۷۳ روز بود که نشان‌دهنده اختلاف بسیار ناچیزی بود (جدول ۴). علاوه بر این صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری میانگین مرحله نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده برای ارقام SC704، Simon و BC678 به ترتیب ۱۲۵، ۱۲۴ و ۱۲۴ روز پس از کاشت بود، در حالی که میانگین مرحله نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده به ترتیب حدود ۱۲۱، ۱۲۰ و ۱۱۹ روز بود. اختلاف بین میانگین مرحله نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای ارقام مورد بررسی به ترتیب حدود ۴، ۴ و ۵ روز بود (جدول ۴).

صرف‌نظر از تیمارهای آبیاری و ارقام مورد بررسی میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا گرده‌افشانی از ۱/۲۹ تا ۲/۱۶ روز، میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۱/۷۴ تا ۲/۸۴ درصد مشاهدات و شاخص توافق ویلموت نیز از ۰/۳۱ تا ۰/۴۲ بود (جدول ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک از ۲/۴۵ تا ۵/۱۰ روز، میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۴/۰۰ تا ۴/۵۷ درصد مشاهدات و شاخص توافق ویلموت نیز از ۰/۴۰ تا ۰/۵۰ بود (جدول ۴). به طور کلی نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر است با دقت قابل قبولی مراحل نمو فنولوژیک ذرت را شبیه‌سازی کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان داد با توجه به این که زمان وقوع گرده‌افشانی شبیه‌سازی شده در تمام سطوح آبیاری یکسان بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تاریخ پیش‌بینی شده توسط مدل با شرایط بدون تنش کم آبی انطباق بیشتری داشت. با این حال میزان خطا در شبیه‌سازی روز از

ریشه، ساقه، برگ، دانه و ... تحت تأثیر مقادیر مختلف آب شبیه‌سازی شد. در نهایت به منظور اعتبار سنجی، داده‌های جمع‌آوری شده در آزمایش مزرعه‌ای با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل به کمک معیارهای آماری مقایسه شدند. سنجش دقت مدل با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب تبیین (R²) و پراکندگی نقاط اطراف خط یک به یک انجام شد. جذر میانگین مربعات خطا، متوسط پراکندگی اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد (معادله ۴). این شاخص، ابزار مناسبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی در یک مجموعه داده است اما برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، اختلاف نسبی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد (معادله ۵). مقدار آن بین صفر تا ۱۰۰ درصد متغیر است. اعداد بین صفر تا ۱۰ درصد نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب و متوسط است و مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد بیان‌گر عدم تطابق بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است (ساج، ۱۹۹۳). مزیت این شاخص نسبت به جذر میانگین مربعات خطا، بدون واحد بودن آن و فراهم ساختن امکان مقایسه داده‌هایی با واحدهای متفاوت است.

$$nRMSE = RMSE \times \frac{100}{O} \quad (۵)$$

شاخص توافق ویلموت، نشان‌دهنده میزان انطباق بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است (معادله ۶). این شاخص در محدوده صفر و یک قرار دارد. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده تطابق بیشتر است. مقدار بیشتر از ۰/۹ بیان‌گر تطابق عالی، بین ۰/۸ تا ۰/۹ تطابق خوب، بین ۰/۷ تا ۰/۸ تطابق قابل قبول و کمتر از ۰/۷ تطابق ضعیف است (Willmott, 1982).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۶)$$

در این معادلات O_i مقادیر واقعی، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر واقعی، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. به منظور محاسبه شاخص‌های

شبیه‌سازی نیز مشابه با شرایط مزرعه در ابتدای فصل رشد روند افزایش شاخص سطح برگ به کندی صورت گرفت و با گذشت زمان روند خطی پیدا کرد و در زمان گلدهی شاخص سطح برگ به حداکثر مقدار خود رسید، سپس به دلیل سایه‌اندازی و ریزش برگ‌ها به دلیل پیری روند نزولی در پیش گرفت. هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی شده میانگین شاخص سطح برگ ارقام ذرت تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت، به گونه‌ای که با افزایش آب مصرفی میانگین شاخص سطح برگ افزایش یافت. بیشترین میانگین شاخص سطح برگ مشاهده شده (۳/۳۴) و شبیه‌سازی شده (۳/۲۱) مربوط به تیمار ۱۳۰ درصد تأمین نیاز آبی و رقم SC704 و کمترین آن‌ها در تیمار ۷۰ درصد تأمین نیاز آبی و رقم BC678 به ترتیب معادل، ۱/۷۴ و ۲ بود (جدول ۵).

کاشت تا گرده‌افشانی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در محدوده مشاهدات سایر محققان قرار داشت (Anothai *et al.*, 2013; De Jonge *et al.*, 2011). در تحقیقی دیگر گزارش شد که شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نمی‌گیرد (Hoogenboom *et al.*, 2010). در مطالعه دیگر نیز با وجود تفاوت بین تیمارهای مختلف آبیاری از نظر زمان وقوع گرده‌افشانی و رسیدن فیزیولوژیک، مدل CERES-Maize زمان وقوع گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک را در تمام شرایط آبی به ترتیب، ۵۶ و ۱۰۰ روز بعد از کاشت شبیه‌سازی کرد (Mubeen *et al.*, 2013).

شاخص سطح برگ

روند تغییرات شاخص سطح برگ مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دارای انطباق نسبتاً خوبی بود (شکل ۱). در شرایط

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل برای روند شاخص سطح برگ
Table 5- Results of model validation for the trend of leaf area index

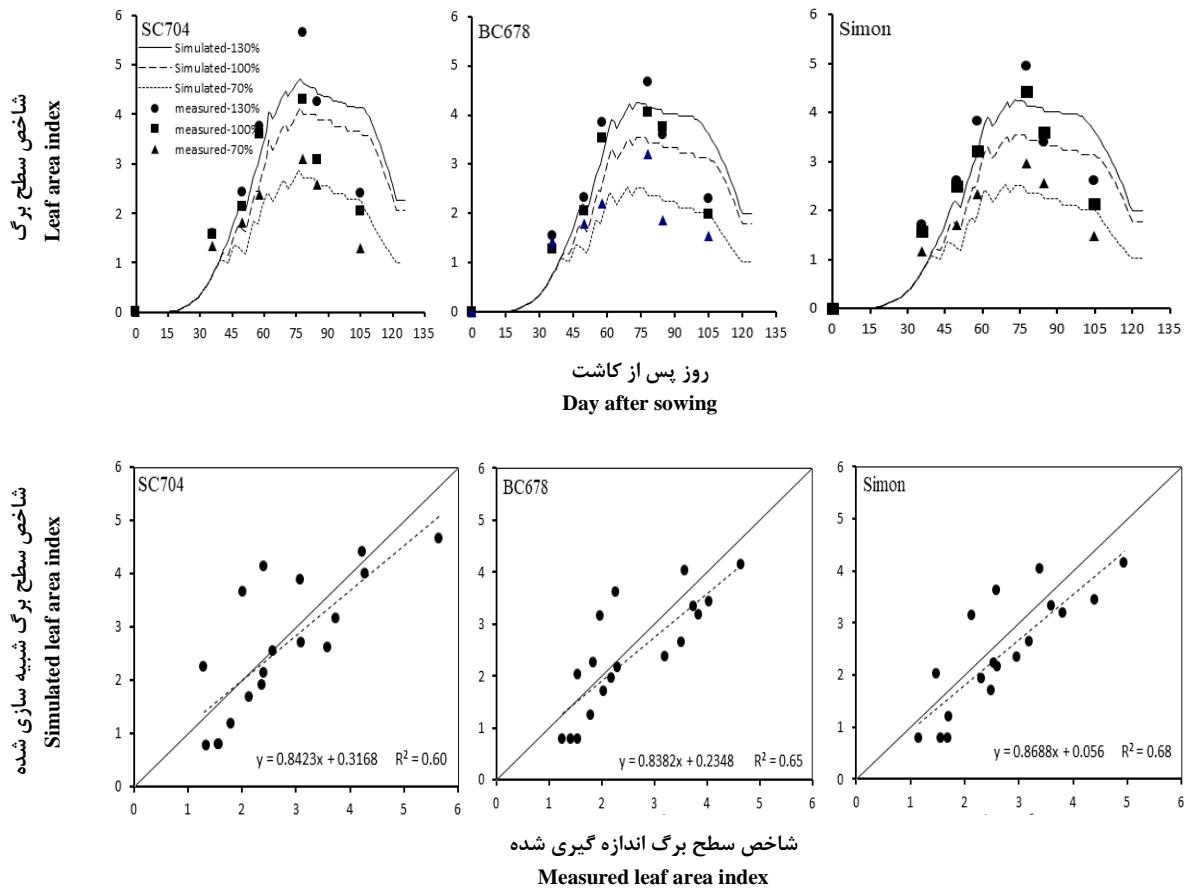
ارقام Cultivars	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	میانگین شاخص سطح برگ Leaf area index average			شاخص‌های آماری Statistical indicators		
		شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	RMSE	nRMSE	d
SC704	IR130%	3.21	3.34	0.13	0.921	27.57	0.88
	IR100%	2.77	2.78	0.01	0.926	33.31	0.80
	IR70%	1.89	2.08	0.19	0.583	28.03	0.80
Simon	IR130%	2.98	3.18	0.20	0.768	24.15	0.87
	IR100%	2.50	2.91	0.41	0.781	26.84	0.83
	IR70%	1.74	2.03	0.29	0.480	23.64	.84
BC678	IR130%	2.98	3.04	0.06	0.739	24.31	0.89
	IR100%	2.50	2.77	0.27	0.715	25.81	0.87
	IR70%	1.74	2.00	0.26	0.512	28.60	0.73

تغییرات شاخص سطح برگ ارقام ذرت در تیمارهای مختلف آبیاری بود (جدول ۵). علاوه بر این مقایسه حداکثر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از خط یک به یک نیز نشان داد که با افزایش شدت کم آبی، پراکندگی نقاط اطراف خط یک به یک بیشتر شد (شکل ۱).

در تیمارهای مختلف آبیاری میزان جذر میانگین خطای شاخص سطح برگ ارقام مورد بررسی از ۰/۴۸ تا ۰/۹۳ متغیر بود، همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز برای ارقام از ۲۳/۶ تا ۲۸/۶ درصد میانگین مشاهدات بود (جدول ۵). ضریب توافق ویلموت نیز از ۰/۷۳ تا ۰/۸۸ بود که حاکی از دقت خوب مدل در پیش‌بینی روند

جدول ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای مراحل نمو
 Table 4- Comparison of observed and simulated values for development stages

ارقام Cultivars	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	روز از کاشت تا نگرده‌افشانی Day from sowing to anthesis				شاخص‌های آماری Statistical indicators			روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک Day from sowing to physiological				شاخص‌های آماری Statistical indicators		
		شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	d	RMSE (%)	nRMSE (%)	d	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	RMSE	nRMSE (%)	d	
SC704	IR130%	78	75	3				126	124	2					
	IR100%	78	76	2				126	121	5					
	IR70%	78	77	1				124	117	7					
	Mean	78	76	2	2.16	2.84	3	125	120.7	4.3	5.10	4.21	5.0/		
Simon	IR130%	74	73	1				124	122	2					
	IR100%	74	74	0				124	120	4					
	IR70%	74	76	2				124	117	7					
	Mean	74	74.3	0.3	1.29	1.74	3	124	119.7	4.3	4.80	4.00	4.0/		
BC678	IR130%	74	72	2				124	121	3					
	IR100%	74	73	1				124	120	4					
	IR70%	74	75	1				124	116	8					
	Mean	74	73.3	0.7	1.41	1.94	4	124	119	5	2.45	4.57	4.0/		



شکل ۱- تغییرات شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد و مقایسه این مقادیر با استفاده از خط یک به یک
 Figure 1- Changes in measured and simulated leaf area index during growth period and comparison of these values using 1:1 line

وزن خشک کل

صرف‌نظر از تیمارهای اعمال شده، در ابتدای مراحل رشد وزن خشک کل شبیه‌سازی شده مشابه با شرایط مزرعه به علت کوچک بودن بوته‌ها از روند رشد کندی برخوردار بود، سپس با گذشت زمان و بزرگ شدن بوته‌ها وزن خشک کل افزایش و در انتهای رشد به حداکثر مقدار رسید (شکل ۲). در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی شده با افزایش میزان آب آبیاری وزن خشک کل ذرت افزایش یافت، به طوری که بیشترین وزن خشک کل اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمار ۱۳۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه به دست آمد، که به ترتیب برای رقم SC704، ۱۸۰۰۸ و ۱۷۶۳۰ کیلوگرم در هکتار، رقم Simon، ۱۷۸۸۹ و ۱۷۳۱۶ کیلوگرم در هکتار و رقم BC678، ۱۴۹۸۲ و ۱۹۰۱۴ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۲). در تمام تیمارهای مورد بررسی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق مناسبی وجود داشت به‌طوری‌که میزان جذر میانگین

میزان ضریب همبستگی برای ارقام SC704، Simon و BC678 به ترتیب ۰/۶۰، ۰/۶۸ و ۰/۶۵ درصد بود که نشان دهنده دقت ضعیف مدل در شبیه‌سازی تغییرات شاخص سطح برگ ذرت بود. به طور کلی نتایج این بررسی نشان داد که مدل CERES-Maize مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد. همچنین با افزایش تنش کم آبی دقت مدل در پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ کاهش یافت. محققین دیگر نیز گزارش کردند که مدل CERES-Maize حداکثر شاخص سطح برگ را در شرایط مطلوب و کم آبیاری کمتر از مقادیر واقعی تخمین زد (Mubeen et al., 2011; De Jonge et al., 2013). با این حال در تحقیقی دیگر مشخص شد که مدل CERES-Maize با دقت قابل قبولی این شاخص سطح برگ را پیش‌بینی کرد، ولی مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر به مشاهده شده بود (Castrignano et al., 1998).

آب دچار مشکل می‌شود. از طرفی مدل‌های شبیه‌ساز موجود در بسته نرم‌افزاری DSSAT از روش‌های ساده شده و تجربی جهت محاسبه محتوای آب خاک روزانه استفاده می‌کنند. این ساده‌سازی‌ها به خصوص در شرایط کم‌آبی، قابلیت تحلیل فرایندهای مرتبط به روابط آب و خاک مدل را کاهش می‌دهد (Suleiman and Ritchie, 2004).

عملکرد دانه

طبق نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize از شروع مرحله گلدهی عملکرد دانه ارقام ذرت صرف‌نظر از اعمال تیمارهای مورد نظر به سرعت افزایش یافت و در اواخر دوره رشد (مرحله رسیدگی فیزیولوژیک) به حداکثر خود رسید (شکل ۳). با افزایش مقدار آب آبیاری میزان عملکرد دانه ارقام افزایش یافت و مدل توانست روند تغییرات عملکرد دانه را در سطوح مختلف آب شبیه‌سازی کند که با نتایج مشاهده شده در مزرعه مطابقت داشت. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در تیمار ۱۳۰ درصد تأمین نیاز آبی به دست آمد که به ترتیب برای رقم SC704، ۷۲۱۷ و ۶۶۳۰ کیلوگرم در هکتار، رقم Simon، ۸۶۱۷ و ۸۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و رقم BC678، ۶۴۶۹ و ۶۵۴۴ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۶).

نتایج این بررسی همچنین نشان داد که بین نتایج به دست آمده و شبیه‌سازی شده اختلاف بسیار کمی وجود داشت، به طوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برای ارقام مورد بررسی از ۳۳۱/۹ تا ۷۵۸/۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۶). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز از ۵/۲۴ تا ۱۲/۹۰ درصد میانگین مشاهدات بود. همچنین ضریب توافق ویلموت برای عملکرد دانه ارقام بیشتر از ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود (جدول ۶). نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تغییرات عملکرد دانه ارقام ذرت را در شرایط کاربرد مقادیر مختلف آب با دقت بسیار بالایی شبیه‌سازی کند (شکل ۳). در تحقیقی دیگر گزارش شد که مدل با کارایی بالایی روند عملکرد دانه را شبیه‌سازی می‌کند (Panda et al., 2004).

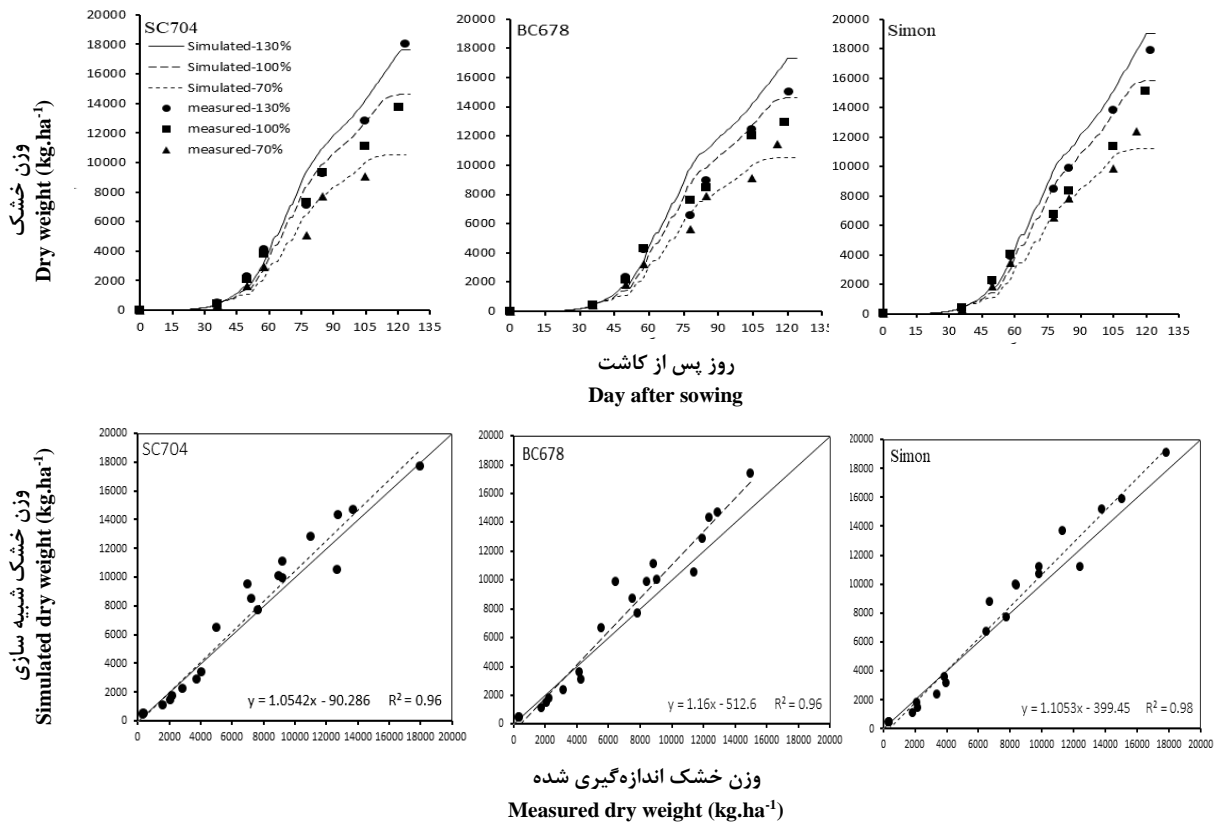
مربعات خطای وزن خشک کل برای ارقام مورد بررسی از ۱۰۵۸/۶ تا ۱۷۵۹/۱ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز از ۶/۹۹ تا ۱۳/۴۱ درصد میانگین مشاهدات بود (جدول ۶). ضریب توافق ویلموت نیز برای وزن خشک کل ارقام مورد ارزیابی تا بیش از ۰/۹۶ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی وزن خشک کل در تیمارهای مختلف است (جدول ۶).

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۸ درصد از تغییرات وزن خشک کل مشاهده شده ارقام ذرت را شبیه‌سازی کند (شکل ۲). نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که دقت مدل در پیش‌بینی روند تغییرات وزن خشک کل با افزایش تنش کمبود رطوبت تا حدودی کاهش یافت. نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که دقت مدل CERES-Maize برای پیش‌بینی وزن خشک کل با افزایش شدت کم‌آبی کاهش یافت (Anothai et al., 2013). علاوه بر این در ارزیابی توانایی مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی حداکثر وزن خشک کل در سطوح مختلف آبیاری گزارش شد که بهترین کارکرد مدل از آبیاری مطلوب به دست آمد و با افزایش شدت کم‌آبی دقت مدل کاهش یافت، به طوری که جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در شرایط مطلوب ۱۴/۶۵ درصد و در شرایط تنش شدید کم‌آبی ۲۰/۰۶ درصد میانگین مشاهدات بود (Feyzbakhsh et al., 2016).

شبیه‌سازی تولید ماده خشک بخش مرکزی مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهان زراعی است که تحت تأثیر شبیه‌سازی نمو فیزیولوژیک و تغییرات سطح برگ قرار می‌گیرد. از طرفی شبیه‌سازی توزیع ماده خشک، عملکرد دانه را مشخص می‌کند. در مدل‌های گروه CERES تولید ماده خشک در شرایط پتانسیل از طریق ضرب کارایی مصرف نور در تشعشع جذب شده محاسبه می‌شود. پس از اعمال تأثیر محدودیت آب و نیتروژن، تولید در شرایط واقعی محاسبه خواهد شد (Ritchie et al., 1998). به عقیده محققین دیگر یکی از دلایل کاهش دقت شبیه‌سازی مدل در شرایط کم‌آبی، تنوع موجود در خاک است (Feyzbakhsh et al., 2016). بافت و سایر ویژگی‌های خاک، پراکندگی متنوعی دارد و چون مدل این شرایط را یکنواخت در نظر می‌گیرد در تخمین دقیق میزان و عمق

جدول ۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای وزن خشک کل و عملکرد دانه
Table 6- Comparison of measured and simulated values for total dry weight and grain yield

ارقام Cultivars	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	وزن خشک کل Total dry weight (kg ha ⁻¹)			شاخص‌های آماری Statistical indicators			عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)			شاخص‌های آماری Statistical indicators		
		شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	RMSE	nRMSE (%)	d	شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	RMSE	nRMSE (%)	d
SC704	IR130%	17630	18008	378				6630	7217	-587			
	IR100%	14654	13720	925				5173	6213	-1040			
	IR70%	10484	12739	2255				3648	4194	-546			
	Mean	14253	14822	569	142.1	9.6	0.92	5150	5857	-724	758.1	12.9	0.92
Simon	IR130%	19014	17889	1125				8250	8617	-367			
	IR100%	15836	15087	749				6735	6785	-50			
	IR70%	11178	12417	1239				4704	5205	-501			
	Mean	15343	15131	212	105.6	7.0	0.96	6563	6869	-306	359.7	5.2	0.98
BC678	IR130%	17316	14982	2334				6544	6469	75			
	IR100%	14640	12930	1710				5348	5841	-493			
	IR70%	10493	11448	955				3748	4034	-286			
	Mean	14150	13120	1030	175.1	13.4	0.84	5213	5448	-235	331.9	6.1	0.98



شکل ۲- تغییرات وزن خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد و مقایسه این مقادیر با استفاده از خط یک به یک
 Figure 2- Changes in measured and simulated total dry weight during growth period and comparison of these values using 1:1 line

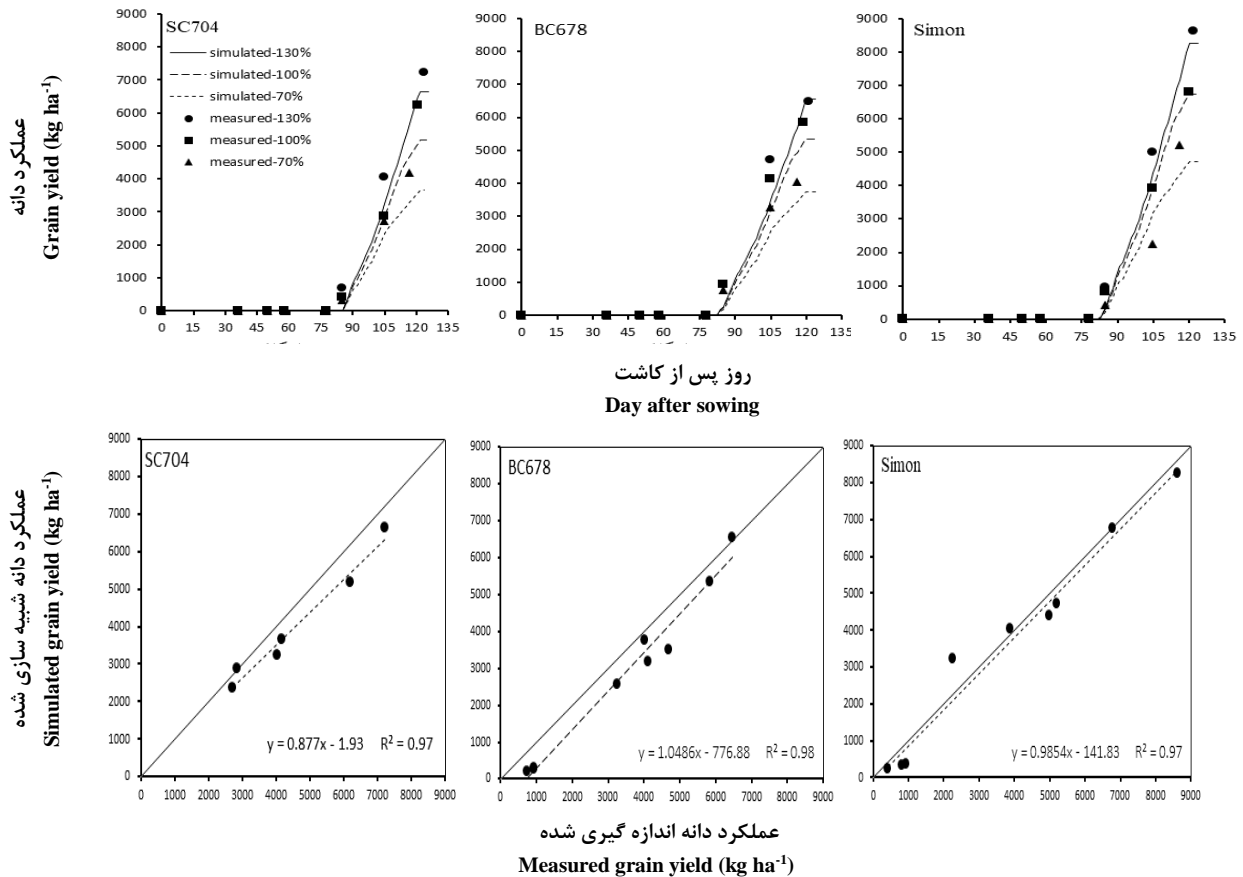
تیمارهای آبیاری میزان جذر میانگین مربعات خطای تبخیر و تعرق تجمعی ارقام از ۴۱/۸۹ تا ۴۵/۴۰، میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده از ۱۲/۹۸ تا ۳۵/۴۸ درصد میانگین مشاهدات و ضریب توافق ویلموت از ۰/۹۰ تا ۰/۹۹ بود که در مجموع نشان‌دهنده دقت بالای مدل CERES-Maize در پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق در سطوح مختلف آبیاری بود (جدول ۷). علاوه بر این، نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل قادر بود تا بیش از ۹۸ درصد تغییرات را پیش‌بینی کند (شکل ۴). نتایج این بررسی همچنین نشان داد که با کاهش محتوای آب قابل دسترس گیاه در تیمار کم آبیاری در مقایسه با تیمار بیش آبیاری میزان تبخیر و تعرق تجمعی شبیه‌سازی شده به تدریج از تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده فاصله گرفت، به طوری که در شرایط تنش کمبود آب مدل میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از شرایط مزرعه

تبخیر و تعرق

صرف‌نظر از اعمال تیمارهای مورد بررسی میزان تبخیر و تعرق تجمعی دارای روند تقریباً مشابه‌ای بود (شکل ۴). هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی شده در ابتدای فصل رشد میزان تبخیر و تعرق تجمعی متناسب با میزان شاخص سطح برگ و وزن خشک کل گیاه ناچیز بود ولی در ادامه با توسعه اندام‌های هوایی و همچنین تغییرات شرایط آب و هوایی به صورت خطی تا انتهای دوره رشد افزایش یافت. میزان تبخیر و تعرق تجمعی در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی‌ها تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت، به طوری که با افزایش میزان آب آبیاری میزان تبخیر و تعرق تجمعی نیز افزایش یافت (شکل ۴). بیشترین میزان میانگین تبخیر و تعرق در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی برای رقم SC704 به ترتیب، ۳۲۲/۷ و ۲۸۶/۱ میلی‌متر، برای رقم Simon به ترتیب، ۳۲۱ و ۲۸۴/۵ میلی‌متر و برای رقم BC678 به ترتیب، ۳۲۱/۱ و ۲۷۴/۸ میلی‌متر مربوط به شرایط تأمین ۱۳۰ درصد نیاز آبی بود (جدول ۷). صرف‌نظر از

است (Dokoohaki *et al.*, 2012). به عقیده آن‌ها چون محاسبه رطوبت لایه‌های بالایی خاک مشخصاً تحت تأثیر تبخیر از سطح خاک است، بنابراین منشاء این مشکل احتمالاً در تخمین نادرست میزان تبخیر و تعرق و یا روش نادرست جداسازی تبخیر و تعرق از یکدیگر است.

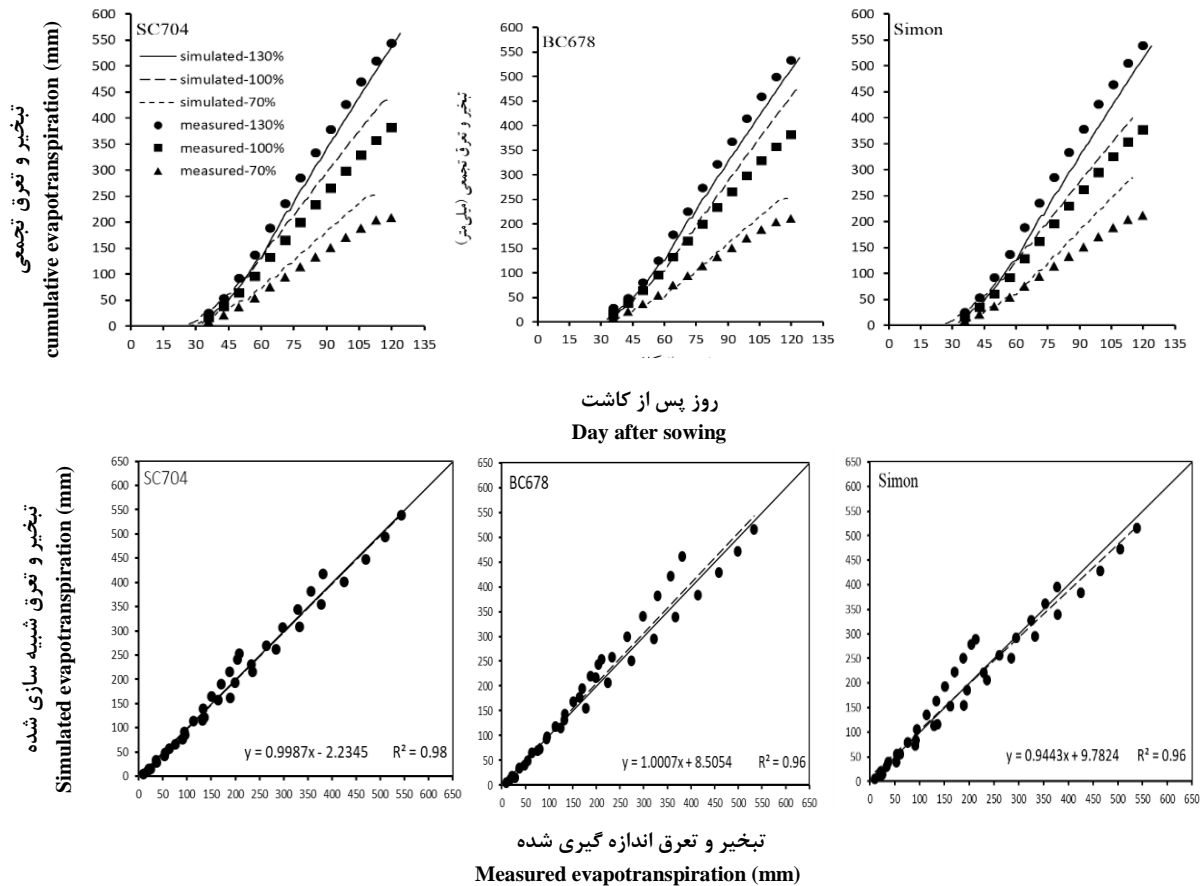
پیش‌بینی نمود (شکل ۴). محققین دیگر نیز بیان نمودند که عدم توجه به دمای برگ و مقاومت روزنه‌ای در شرایط کم آبی از دلایل کاهش دقت مدل در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق است (De Jonge *et al.*, 2011). نتایج مطالعه دیگر نشان داده شد که مدل CERES-Maize به ویژه در شرایط کم آبی، در تخمین محتوای رطوبت لایه‌های بالایی خاک با مشکل رو به رو



شکل ۳- تغییرات عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد و مقایسه این مقادیر با استفاده از خط یک به یک
Figure 3- Changes in measured and simulated grain yield during growth period and comparison of these values using 1:1 line
جدول ۷- نتایج ارزیابی مدل برای روند تغییرات تبخیر و تعرق تجمعی

Table 7- Results of model validation for the trend of cumulative evapotranspiration

ارقام Cultivars	رژیم های آبیاری Irrigation regimes	تبخیر و تعرق Evapotranspiration (mm)			شاخص‌های آماری Statistical indicators		
		شبیه‌سازی شده Simulated	مشاهده شده Observed	تفاوت Difference	RMSE	nRMSE	d
		SC704	IR 130%	286.1	322.7	36.6	41.9
	IR 100%	263.1	225.9	37.2	42.9	19.0	0.97
	IR 70%	163.7	127.6	36.1	42.1	32.9	0.93
Simon	IR 130%	284.5	321.0	36.5	41.8	13.1	0.98
	IR 100%	242.5	209.3	33.2	42.2	20.1	0.97
	IR 70%	167.3	128.0	39.3	45.4	35.5	0.92
BC678	IR 130%	274.8	321.1	37.3	42.4	13.6	0.98
	IR 100%	263.9	225.9	38.0	43.9	19.4	0.97
	IR 70%	167.4	128.3	39.1	45.1	35.2	0.92



شکل ۴- تغییرات تبخیر و تعرق تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد و مقایسه این مقادیر با استفاده از خط یک به یک
 Figure 4- Changes in measured and simulated cumulative evapotranspiration during growth period and comparison of these values using 1:1 line

تأمین ۱۳۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی مناسب (بین ۱۲/۹ تا ۲۰/۱ درصد) و در شرایط تأمین ۷۰ درصد نیاز آبی ضعیف (بین ۳۲/۹ تا ۳۵/۵ درصد) بود. مشابه با شرایط مزرعه، در شرایط شبیه‌سازی نیز با افزایش شدت کم آبی مقادیر شاخص سطح برگ، تبخیر و تعرق، وزن خشک و عملکرد دانه ارقام مورد بررسی کاهش یافت. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و مقایسه آن با شیب خط یک به یک نیز نشان داد که مدل توانست بیش از ۹۶ درصد از تغییرات وزن خشک کل، عملکرد دانه و تبخیر و تعرق ارقام ذرت را پیش‌بینی کند. در مجموع نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که مدل CERES-Maize پس از واسنجی، ابزار توانمندی برای پیش‌بینی زمان وقوع مراحل فنولوژی، شبیه‌سازی مقادیر سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری برای شرایط آب و هوایی کرمانشاه است. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از مدل CERES-Maize به عنوان ابزاری راه‌گشا جهت پشتیبانی تحقیقات علمی و تسهیل تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت زراعی قابل توصیه باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ارزیابی مدل CERES-Maize نشان داد که مدل قادر است با دقت قابل قبولی مراحل نمو فنولوژیک ذرت را شبیه‌سازی کند. در آزمایش مزرعه‌ای، با افزایش مقدار آب آبیاری شاخص سطح برگ، وزن خشک کل، عملکرد دانه و تبخیر و تعرق تجمعی ارقام افزایش یافت و مدل توانست روند تغییرات این صفات را در سطوح مختلف آب مطابق با نتایج مشاهده شده در مزرعه شبیه‌سازی کند. با این حال با افزایش تنش کم آبی دقت مدل در پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ و تبخیر و تعرق کاهش یافت. مقادیر nRMSE ارقام SC704، Simon، BC678 برای روز از کاشت تا گرده‌افشانی به ترتیب ۲/۸، ۱/۷ و ۱/۹ درصد، برای روز از کاشت تا رسیدن فیزیولوژیک ۴/۲، ۴ و ۴/۶ درصد، برای وزن خشک کل ۹/۶، ۷/۰ و ۱۳/۴ درصد و برای عملکرد دانه ۱۲/۹، ۵/۲ و ۶/۱ درصد میانگین مقادیر مشاهده شده بود. طبق شاخص nRMSE قدرت مدل برای شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ متوسط بود (بین ۲۴/۱ تا ۳۳/۳ درصد). در مورد صفت تبخیر و تعرق تجمعی قدرت شبیه‌سازی مدل در شرایط

References

- Alexandratos, N. and Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards. The revision. ESA working paper. Rome: FAO.
- Alizadeh, A. and Kamali, G.A. 2008. Water requirement of plants in Iran. Imam Reza University (AS) Press (In Persian).
- Anonymous. 2019. Agricultural statistics for crops. Ministry of Agriculture of Iran. www.maj.ir
- Bafkar, A., Qamarnia, H. and Taheritizro, A. 2006. Principles of general irrigation. Razi University Press (In Persian).
- Anothai, C.M.T., Soler, A., Green, A., Trout, T.J. and Hoogenboom, G. 2013. Evaluation of two evapotranspiration approaches simulated with the CSM-CERES-Maize model under different irrigation strategies and the impact on maize growth, development and soil moisture content for semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 176: 64-76.
- Ashofteh Beiragi, M., Ebrahimi, M., Mostafavi, K., Golbashy, M. and Khavari Khorasani, S. 2011. A study of morphological basis of corn (*Zea mays* L.) yield under drought stress condition using correlation and path coefficient analysis. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 2(2): 32-37.
- Castrignano, A., Katerji, N., Karam, F., Mastrorilli, M. and Hamdy, A. 1998. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecological Modeling*, 111: 107-120.
- Dechmi, F., Playan, E., Faci, J.M. and Caverro, J. 2010. Simulation of sprinkler irrigation water uniformity impact on corn yield. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 143-151.
- De Jonge, K.C., Andales, A.A., Ascough, J.C. and Hansen, N.C. 2011. Modeling of full and limited irrigation scenarios for corn in a semiarid environment. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54(2): 481-492.
- Dokoohaki, H., Gheysari, M. and Karimi Jafari, M. 2012. Applying the DSSAT model to determine the yield response factor under different growth stage. Third National Conference on Comprehensive Water Resources Management. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. (In Persian).
- Feyzbakhsh, M., Kamkar, B., Mokhtarpour, H. and Asadi, M.S. 2016. Calibration and evaluation of the CERES-Maize model in Gorgan climatic conditions. *Journal of Crop Production*, 8: 25-49. (In Persian).
- Folberth, C., Yang, H., Gaiser, T., Abbaspour, K.C. and Schulin, R. 2013. Modeling maize yield responses to improvement in nutrient, water and cultivar inputs in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Systems*, 119: 22-34.
- Hai-long, L., Jing-yi, Y., Ping, H., You-lu, B., Ji-yun, J., Drury, C., Ye-ping, Z., Xue-ming, Y., Wen-jung, L., Jia-gui, X., Jing-min, Y. and Hoogenboom, G. 2012. Optimizing parameters of CSM-CERES-Maize model to improve simulation performance of maize growth and nitrogen uptake in northeast China. *Journal of Interactive Agriculture*, 11(11): 1898-1913.
- Hajishabani, H., Mondani, F. and 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: 197-212. (In Persian).
- Hearn, S. 2014. 12th Asian Maize Conference and Expert Consultation on Maize for Food, Feed, Nutrition and Environmental Security. Bangkok, Thailand; 30 October–1 November, 2014.
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Shelia, V., Wilkens, P.W., Singh, U., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I., Moreno, L.P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L.A., Tsuji, G.Y. and Jones, J.W. 2019. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: p.173-216 (K.J. Boote, editor). *Advances in crop modeling for a sustainable agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom.

- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V. and Tsuji, G.Y.** 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (www.DSSAT.net). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A. and Tsuji, G.Y.** 2010. Decision support system for agrotechnology transfer version 4.5. Volume 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI. 60 p.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Batchelor, W.D., Bowen, W.T., Hunt, L.A., Pickering, N.B., Singh, U., Godwin, D.C., Baer, B., Boote, K.J., Ritchie, J.T. and White, J.W.** 1994. Crop models. In: Tsuji G.Y. Uehara G. Balas S. (Eds.) DSSAT Version3.5. University of Hawaii Honolulu Hawaii. 1: 95-244.
- Jalilian, A., Mondani, F., Khoramivafa, M. and Bagheri, A.R.** 2018. Evaluation of CliPest model in simulation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) competition in Kermanshah. *Journal of Agroecology*, 10: 248-266. (In Persian).
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T.** 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.
- Mahmood, T.M., Maqsood, M., Awan, T.H. and Sarwar, R.** 2001. Effect of nitrogen different levels of nitrogen and intra-row plant spacing on yield and yield components of maize. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 38(1-2): 48-49.
- Mondani, F., Gholami, B., Bagheri, A.R. and Mohammadi, G.R.** 2018a. Simulation of changes in soil and plant nitrogen by CERES-wheat model. *Journal of Water and Soil*, 32: 691-707. (In Persian).
- Mondani, F.** 2018b. Simulation of nitrogen fertilizer effect on maize (*Zea mays*) production by CERES-Maize model under Kermanshah climate condition. *Journal of Water and Soil*, 31: 1665-1676. (In Persian).
- Mondani, F., Nasiri Mahalati, M. and Koghaki, A.** 2015. Modeling of sunn pest (*Eurygaster integriceps* Put.) damage on winter wheat (*Triticum aestivum*) growth and yield under climate change condition. *Plant Production Technology*, 6: 61-75. (In Persian).
- Mubeen, M., Ahmad, A., Wajid, A., Khaliq, T. and Bakhsh, A.** 2013. Evaluating CCSM-CERES-Maize model for irrigation scheduling in semi-arid conditions of Punjab, Pakistan. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15(1): 1-10.
- Muthukumar, V.B., Velayudham, K. and Thavaprakash, N.** 2005. Growth and yield of baby corn (*Zea mays* L.) as influenced by plant growth regulators and different time of nitrogen application. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 1(4): 303-307.
- Panda, R.K., Behera, S.K. and Kashyap, P.S.** 2004. Effective management of irrigation water for maize under stressed condition. *Agricultural Water Management*, 66: 181-203.
- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C. and Bowen, W.T.** 1998. Cereal growth, development, and yield, in: G. Y. Tsuji, et al. (Eds.). Understanding options for agricultural production, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, The Netherlands. 79-98.
- Salmeron, M., Urrego, Y.F., Isla, R. and Caverro, J.** 2012. Effect of non-uniform sprinkler irrigation and plant density on simulated maize yield. *Agricultural Water Management*, 113: 1-9.
- Savage, M.J.** 1993. Statistical aspects of model validation. Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.
- Suleiman, A.A. and Ritchie, J.T.** 2004. Modifications to the DSSAT vertical drainage model for more accurate soil water dynamics estimation. *Soil Science*, 169(1): 745-757.
- Willmott, C.J.** 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.

Simulation of moisture regimes effect on maize (*Zea mays*) growth and yield in Kermanshah region by CERES-Maize model

Farzad Mondani^{1*}, Parisa Karami², Rozhin Ghobadi³

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

²MSc Student in Agroecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

³Graduated in Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

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

Received: 8 April 2021

Accepted: 11 May 2021

DOI: 10.22034/CSRAR.2021.280069.1091

Abstract

One of the reliable approaches to study the effects of management on agricultural production is using crop growth models. In order to determine the effect of different levels of irrigation on the growth and productivity of grainy maize cultivars and validation of the CERES-Maize model, an experiment was conducted as split plot at the experimental field of Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran, during 2017-2018. Main-factor was three irrigation regimes (IR) included supplying 130, 100, 70% water requirement (IR_{130%}, IR_{100%} and IR_{70%} respectively), and sub-factor included three maize cultivars (SC704, Simon and BC678). The evaluated traits were development stages, leaf area index, total dry weight, grain yield and daily evapotranspiration. Model validation results showed that nRMSE values of SC704, Simon and BC678 for days to anthesis were 2.8, 1.7 and 1.9%, for days to physiological maturity were 4.2, 4 and 4.6%, for total dry weight were 9.6, 7.0 and 13.4% and for grain yield were 12.9, 5.2 and 6.1% observations, respectively. The nRMSE for daily evapotranspiration was 12.9 to 23.5% observations. By reducing the water content available in the IR_{70%} treatment compared to other irrigation treatments, the simulated cumulative evapotranspiration gradually moved away from the measured evapotranspiration, so that in the water deficit stress treatment, the model simulated the amount of evapotranspiration more than farm conditions. Overall, the results of validation showed that the CERES-Maize model was able to predict response the growth and yield of maize cultivars under different soil moisture conditions with appropriate accuracy, therefore, it can be used to evaluate the impact of different irrigation regimes in the maize fields.

Keywords: Deficit irrigation, Development stages, Evapotranspiration, Model calibration, Model validation