



## واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize در شرایط آب‌وهوایی گرگان

\*محمدتقی فیض‌بخش<sup>۱</sup>، بهنام کامکار<sup>۲</sup>، حسن مختارپور<sup>۳</sup> و محمداسماعیل اسدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و محقق مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، <sup>۲</sup> دانشیار گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، <sup>۳</sup> استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲۰

### چکیده

**سابقه و هدف:** تاریخ کاشت و آبیاری دو عامل عمده تعیین‌کننده تولید ذرت دانه‌ای هستند و فهم عکس‌العمل گیاه به تاریخ کاشت و آبیاری قبل از کاشت ضروری است و با استفاده از مدل CERES-Maize می‌توان آنها را شبیه‌سازی نمود. این بررسی به‌منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize در شرایط اقلیمی گرگان اجرا شد.

**مواد و روش‌ها:** به‌منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize، دو آزمایش مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان انجام شد. در این آزمایش‌ها از هیبرید دیررس سینگل کراس ۷۰۴ استفاده شد. این هیبرید بهترین رقمی است که در نقاط مختلف کشور و از جمله استان گلستان کشت می‌شود. آزمایش اول به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و به مدت دو سال (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) انجام شد. فاکتورها شامل سه تاریخ کاشت (اول تیر، پانزده تیر و سی تیر) و چهار رژیم آبیاری بر اساس کاهش رطوبت قابل استفاده خاک از کل آب قابل دسترس خاک بود. آزمایش دوم نیز به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار و به مدت دو سال (۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) انجام شد. فاکتور اول شامل سه تاریخ کاشت (پانزده فروردین، سی فروردین و چهارده اردیبهشت) و فاکتور دوم تراکم بوته در دو سطح (۶/۵ و ۸/۵ بوته در مترمربع) بود. از داده‌های تراکم ۶/۵ بوته در مترمربع در این مطالعه استفاده شد. با استفاده از تیمارهای آبیاری مطلوب و بدون تنش در سال ۱۳۹۱ (سه تیمار) و دو تیمار از آزمایش دوم در سال ۱۳۸۶،

\*نویسنده مسئول: feyz\_54@yahoo.com

مدل واسنجی شد. ارزیابی مدل با استفاده از تیمارهای تاریخ کاشت (۱۳۸۷)، تاریخ کاشت و کم آبیاری در سالهای ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ انجام شد.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده افشانی و روز تا رسیدگی) را در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت به خوبی پیش‌بینی می‌کند. جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا گرده افشانی و روز تا رسیدگی به ترتیب برابر ۲/۵ و ۲/۹ روز به دست آمد. بنابراین این مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مزرعه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های بهاره (۱۳۸۷) و تابستانه (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) نیز نشان داد که این مدل عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه را با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. از طرفی هر چند مدل روند کاهش عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک و شاخص سطح برگ را در سطوح مختلف آبیاری به خوبی شبیه‌سازی کرد؛ ولی بر اساس شاخص‌های کارکرد، مدل از دقت لازم برخوردار نیست.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج حاصل از مدل CERES-Maize می‌توان در شبیه‌سازی مراحل رشد ذرت و عملکرد دانه در تاریخ کاشت‌های مختلف در شرایط مطلوب و در شرایط آب و هوایی گرگان بهره برد.

**واژه‌های کلیدی:** تاریخ کاشت، ذرت، کم آبیاری، مدل‌سازی

## مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی از جمله رهیافت‌هایی هستند که با اهداف مختلفی نظیر انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین بهترین گزینه‌های مدیریت زراعی، برآورد پتانسیل تولید مناطق، تعیین خط‌ومشی‌های به‌نژادی ارقام، انتقال فناوری، پهنه‌بندی بوم‌شناختی، پیش‌بینی اثرات دما، تغییر اقلیم و آنالیز خلأ عملکرد ساخته و استفاده شده‌اند (۲۱، ۲۲ و ۳۷). از مهمترین این گروه‌ها می‌توان به گروه<sup>۱</sup> DSAAT،<sup>۲</sup> APSIM،<sup>۳</sup> CROPSyst،<sup>۴</sup> EPIC و<sup>۵</sup> ALMANAC اشاره نمود (۳۷). سیستم حمایت تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT) یکی از معروف‌ترین و پراستفاده‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی در گیاهان زراعی است (۱۳، ۲۰، ۲۴، ۲۷ و ۳۷). این مدل حاصل تلاش گروه قابل توجهی از مدل‌سازان به‌ویژه از دانشگاه فلوریدا، دانشگاه جورجیا، و دانشگاه هاوایی می‌باشد (۳۷). این بسته نرم‌افزاری مجموعه‌ای از برنامه‌های مستقل می‌باشد که با یکدیگر بکار برده می‌شوند (۱۳) و برای ۲۸ محصول زراعی عمده استفاده می‌شود (۲۷).

CERES- Maize<sup>۶</sup> در سال ۱۹۸۶ معرفی شد (۳۲) و پس از آن تغییرات کمی در مدل اولیه به وسیله محققان پیشنهاد شد. از زمان معرفی CERES-Maize این نرم‌افزار به‌طور گسترده در شرایط مختلف محیطی برای آزمون فرضیات مختلف مدیریت زراعی (مثل تاریخ کاشت) و یا خصوصیات ارقام (طول رشد گیاه) بر روی تولید بیوماس و عملکرد دانه مورد ارزیابی قرار گرفت (۱۱). در مدل CERES-Maize فاکتورهای آب و هوایی، آلبیدوی خاک، ضریب تبخیر خاک، ضریب زهکشی، ضخامت لایه‌های خاک، خصوصیات آب خاک، فاکتورهای گسترش وزن ریشه و فاکتورهای رشد محصول و ضرایب ژنتیکی داده‌های ورودی هستند (۳۲) و مهمترین خروجی‌های CERES- Maize پیش‌بینی فنولوژی، شاخص سطح برگ، بیوماس و عملکرد دانه است. ساسن‌درام (۲۰۰۵) در ارزیابی مدل‌های CERES- Maize و RZWQM<sup>۷</sup> در Akron آمریکا تحت شرایط آبیاری مشاهده نمود که هر دو مدل کاهش عملکرد را با تأخیر در کاشت شبیه‌سازی نمودند، اما CERES- Maize پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به RZWQM داشت (۳۴).

1. Decision Support System for Agrotechnology Transfer
2. Agricultural Production System Simulator
3. Cropping System
4. Erosion- Productivity Impact Calculator
5. Agricultural Land Management Alternatives with Numerical Assessment Criteria
6. Crop Environment Resource Synthesis
7. Root Zone Water Quality Model

دوگان و همکاران (۲۰۰۷) نتایج شبیه‌سازی DSSAT را با داده‌های مزرعه در کانزاس بررسی نمودند و یادآور شدند که مدل CERES- Maize ممکن است برای شبیه‌سازی مکانی و زمانی کافی باشد، اما نمی‌تواند عملکرد را در شرایط کم‌آبایی و مکان‌های ویژه به خوبی شبیه‌سازی کند (۸). سولر و همکاران (۲۰۰۷) به ارزیابی مدل CERES- Maize برای شبیه‌سازی، توسعه و عملکرد ذرت در پیش‌بینی میزان تولید در کشت دوم در برزیل مورد ارزیابی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مدل CERES- Maize می‌تواند فنولوژی و عملکرد ذرت را برای چهار هیبرید مورد مطالعه به خوبی شبیه‌سازی کند (۳۶).

قیصری و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که مدل CERES-Maize می‌تواند مراحل مهم فنولوژیک و عملکرد ذرت را در شرایط آب‌وهوایی خوزستان با دقت بالایی شبیه‌سازی کند و بر اساس شاخص توافق<sup>۱</sup> (d) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) کارکرد مدل برای شبیه‌سازی زمان گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک بسیار خوب بود. همچنین شبیه‌سازی عملکرد دانه طبق شاخص RMSE نرمال، خوب و بر اساس شاخص توافق قابل قبول ارزیابی شد. این تحقیق نشان داد که مدل CERES- Maize قادر است مقدار ماده خشک را در تمام سطوح آبیاری مختلف (دو سطح کم آبیاری، یک سطح آبیاری کامل و یک سطح بیش آبیاری) با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند و دقت مدل در شبیه‌سازی سطح برگ کمتر از دقت مدل در شبیه‌سازی ماده خشک است. همچنین این مدل مقدار ماده خشک را در تمام سطوح آبیاری با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند و دقت مدل در شبیه‌سازی سطح برگ از دقت مدل در شبیه‌سازی ماده خشک کمتر است (۱۳).

مختارپور (۲۰۱۱) در مطالعه رشد و عملکرد ذرت در تاریخ کاشت‌های متفاوت و تراکم‌های مختلف بوته در استان گلستان نشان داد که مدل CERES- Maize، صفات روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ و وزن دانه را به خوبی پیش‌بینی می‌نماید، ولی در تاریخ کاشت‌های دیرتر (تابستانه) نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یافته‌های مزرعه‌ای متفاوت بود. وی پیشنهاد نمود لازم است تغییراتی در معادلات رشد روزانه محصول برای صفات تعداد دانه در متر مربع و شاخص سطح برگ صورت گیرد (۲۷).

کوارینگ و لگات (۲۰۰۸) گزارش نمودند که CERES- Maize برای پیش‌بینی عملکرد مفید است و مطالعات آنها نشان داد که اگر داده‌های قابل اطمینان از شرایط آب‌وهوایی در دسترس باشد این مدل

1. Agreement Index
2. Root mean square error

برای پیش‌بینی عملکرد قبل از برداشت مورد استفاده قرار گیرد (۳۱). پاندا و همکاران (۲۰۰۴) اظهار نمودند که مدل CERES- Maize به خوبی اثرات آبیاری را شبیه‌سازی می‌کند (۳۰). گرسک و اوکانت (۲۰۱۰) نشان دادند که مدل CERES- Maize عملکرد ذرت را تحت شرایط آبیاری با تیوپ‌های بالشتی به خوبی شبیه‌سازی می‌کند (۱۲).

اخیراً کمبود آب کشاورزان را مجبور به کاربرد مدیریت کم‌آبیاری نموده است. اما ارتباط مستقیمی بین اثر کم‌آبیاری و تاریخ کاشت وجود دارد. بنابراین ضرورت دارد اثر متقابل تاریخ کاشت ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری با استفاده از مدل‌های گیاهی در استان بررسی شود. این مطالعه با هدف بررسی کارایی و دقت شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت (هیبرید SC.704) در تاریخ کاشت‌های متفاوت ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری با استفاده از مدل گیاهی CERES- Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT انجام شد.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور واسنجی و ارزیابی CERES-Maize جهت شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت (هیبرید SC.704) از داده‌های دو آزمایش استفاده شد. این آزمایش‌ها در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان واقع در ۵ کیلومتری شمال گرگان با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی، با ارتفاع ۵ متر از سطح دریا به اجرا درآمد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش اول به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در تابستان ۱۳۹۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از: تاریخ کاشت در سه سطح (اول، پانزدهم و سی‌ام تیرماه) و تیمارهای آبیاری در چهار سطح (آبیاری مطلوب، زمانی که رطوبت خاک به میزان ۴۰ درصد از آب قابل استفاده ( $MAD=/.40$ ) کاهش یافت، آبیاری زمانی که رطوبت خاک به میزان ۶۰ درصد از آب قابل استفاده ( $MAD=/.60$ ) کاهش یافت، آبیاری زمانی که رطوبت خاک به میزان ۸۰ درصد از آب قابل استفاده ( $MAD=/.80$ ) کاهش یافت و قطع کامل آبیاری بعد از مرحله سه برگگی تا رسیدگی فیزیولوژیکی).

تراکم بوته مورد نظر برای کشت ۶۵ هزار بوته در هکتار در نظر گرفته شد که با در نظر گرفتن فاصله ثابت ردیف ۷۵ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۲۰/۵ سانتی‌متر حاصل شد. تعداد خطوط کاشت برای هر تیمار ۴ و طول خطوط کاشت ۱۰ متر در نظر گرفته شد. جهت کاهش اثرات سایه و نفوذ آب

به کرت‌های مجاور در بین تیمارها دو متر حاشیه در نظر گرفته شد. مقدار کود مصرفی در همه تیمارها یکسان بوده و بر اساس آزمون خاک مقدار ۱۳۸ کیلوگرم فسفر از منبع فسفات آمونیوم، ۱۹۲ کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره و فسفات آمونیوم و ۶۰ کیلوگرم کود پتاسیم از منبع فسفات پتاسیم استفاده شد. یک سوم از کود اوره در زمان کاشت و دو سوم باقیمانده در مرحله ۸-۶ برگی و همزمان با آبیاری به خاک اضافه گردید. مبارزه بر علیه علف‌های هرز به شکل دستی انجام شد.

همچنین قبل از اجرای آزمایش ۶ پروفیل به عمق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متر در نقاط مختلف مزرعه حفر گردید و نمونه‌برداری انجام شد. این نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه جهت تعیین میزان کود مصرفی و تعیین ویژگی‌های خاک در رابطه با مقدار آب در نقطه پژمردگی دایم، مقدار آب در ظرفیت زراعی، مقدار آب خاک در نقطه اشباع و وزن مخصوص ظاهری خاک مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بیشترین وزن مخصوص ظاهری به میزان ۱/۴۴ در لایه ۰-۱۵ سانتی‌متر قرار داشت و وزن مخصوص ظاهری در سه لایه دیگر برابر ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. همچنین میزان تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و در لایه‌های مختلف خاک بین ۲۷/۷ تا ۲۷ درصد و برای نقطه پژمردگی دایم بین ۱/۱۳ تا ۹/۸ درصد بود (جدول ۱).

جهت تعیین میزان آب مصرفی ۲۴ ساعت پس از هر آبیاری، میزان رطوبت از طریق نمونه‌برداری با استفاده از اوگر در عمق توسعه ریشه تعیین گردید. نمونه‌های برداشت شده از لایه‌های مختلف خاک (و در عمق توسعه ریشه) پس از انتقال به آزمایشگاه، در آون در درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند و میزان رطوبت در هر لایه از خاک به طور جداگانه ثبت گردید و بلافاصله پس از رسیدن به ضریب‌های رطوبتی تعیین شده آبیاری انجام شد. میزان آب آبیاری بر اساس درصد کاهش آب قابل استفاده (ضریب‌های رطوبتی از قبل تعریف شده) در لایه‌های مختلف و در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی (FC) انجام شد. آبیاری به صورت قطره‌ای نواری با استفاده از نوارهای تیپ انجام شد. جنس نوارهای آبیاری، پلی‌اتیلن به قطر ۲۰ میلی‌متر و فاصله نازل‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود. میزان آب داده شده به هر کرت با کنتور با دقت ۰/۱ لیتر در هکتار اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

حجم آب مصرفی در تیمارهای آبیاری براساس معادله (۱) محاسبه شد (۲، ۳۵).

$$VW = (FC - PWP) \times BD \times A \times D / Ea \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن VW: حجم آب آبیاری (مترمکعب)، FC درصد وزنی رطوبت خاک در حالت ظرفیت زراعی، PWP درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم، BD وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (گرم بر سانتی مترمکعب)، A مساحت کرت (مترمربع)، D عمق ریشه (متر) و Ea راندمان آبیاری است. میزان بارندگی در سال ۱۳۹۱ بیشتر از سال ۱۳۹۲ بود و باعث شد تا آب مصرفی کاهش یابد و از طرفی با توجه به نیاز آبی بالای ذرت در طول مراحل کاشت، بارندگی نتوانست نیاز آبی ذرت را تأمین کند و در هر دو سال اجرای آزمایش اختلاف زیادی بین تیمارهای آبیاری مشاهده گردید (جدول ۲).

آزمایش دوم: این آزمایش نیز به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا و به مدت دو سال در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان (۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) توسط مختارپور اجرا شد. تیمارها شامل ۳ تاریخ کاشت (۱۵ فروردین، ۳۰ فروردین، ۱۴ اردیبهشت) و دو تراکم بوته (۶/۵ و ۸/۵ بوته در مترمربع) بود. هر تیمار در ۴ خط به طول ۱۲ متر با فاصله ۷۵ سانتی متر کشت گردید. تراکم‌های مورد نظر با توجه به ثابت بودن فاصله خطوط بر روی ردیف‌های کشت اعمال گردیدند. سایر مراقبتهای زراعی مانند کاشت، داشت و برداشت همانند آزمایش اول انجام شد. از داده‌های تراکم بوته ۶/۵ بوته در مترمربع در این مطالعه استفاده شد.

در پایان و در هر دو آزمایش، برداشت از دو خط وسط به طول ۶ متر با حذف حاشیه انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS (SAS Institute Inc, ۱۹۸۶) استفاده شد و میانگین‌ها به روش LSD در سطح ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفتند (۳۷).

**توصیف مدل CERES- Maize:** مدل CERES- Maize به اطلاعات ورودی مربوط به هوا، خاک، مدیریت زراعی و رقم زراعی نیاز دارد. قبل از اجرای مدل، این ورودی‌ها در اختیار مدل قرار می‌گیرند (۳۲). الف) اطلاعات هواشناسی: داده‌های روزانه مربوط به دمای حداقل و حداکثر، تشعشع خورشیدی و مقدار بارندگی (اطلاعات هواشناسی جهت ارزیابی مدل) از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی واقع در فرودگاه گرگان به فاصله ۲ کیلومتر از محل اجرای آزمایش تهیه گردید.

ب) اطلاعات خاکشناسی: بافت خاک، ساختمان خاک، تعداد و عمق هر یک از لایه‌ها، وزن مخصوص ظاهری، عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری، نقطه پژمردگی، عمق نفوذ ریشه، میزان هدایت الکتریکی و pH هر لایه (این اطلاعات قبل و حین اجرای آزمایش ثبت گردید).

ج) مدیریت زراعی: نوع رقم و تیپ رشدی آن، تاریخ کاشت، عمق کاشت، فاصله خطوط، تراکم کاشت، تاریخ‌های آبیاری و مقدار آب آبیاری.  
 د) رقم زراعی: شامل پارامترهای ژنتیکی مخصوص رقم (جدول ۲).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در لایه‌های مختلف.

Table 1. Physical and chemical characteristic in different soil depths.

Soil characteristics ویژگی‌های خاک	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)			
	0-15	15-30	30-60	60-90
اسیدیته (pH)	7.2	7.3	7.3	7.3
درصد کاتیون‌های قابل تبادل (دسی‌زیمنس بر متر) CEC (dS m <sup>-1</sup> )	1.35	1.27	1.42	1.41
کربن آلی (%) Organic carbon (%)	1.5	1.1	0.6	0.4
نیترژن کل (%) Total nitrogen (%)	0.15	0.11	0.06	0.03
فسفر قابل دسترس (قسمت در میلیون) Available Phosphorus (ppm)	8.6	4.8	2	1.01
پتاسیم قابل دسترس (قسمت در میلیون) Available potassium (ppm)	333	220	108	70
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	1.44	1.41	1.4	1.4
<b>بافت خاک</b>				
Soil texture				
رس (%) Clay %	28	30	34	33
سیلت (%) Silt %	54	52	52	52
شن (%) Sand %	18	18	14	15
<b>محتوای آب خاک</b>				
Water content				
نقطه اشباع (% حجمی) Saturation point (%) (θ <sub>m</sub> )	49.9	52.2	51.9	60
ظرفیت زراعی (% حجمی) Field capacity (%) (θ <sub>m</sub> )	27.7	27	6.27	7.27
نقطه پژمردگی دائم (% حجمی) Wilting point (%) (θ <sub>m</sub> )	13.1	12.3	9.8	9.8



جدول ۲- آمار هواشناسی ایستگاه هواشناسی گرگان در طول فصل رشد.

Table 2. Meteorological data of agricultural research station of Gorgan during cropping season.

سال Year	ماه Month	حداقل دما (درجه سانتی‌گراد) Minimum temperature (°C)	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد) Maximum temperature (°C)	بارندگی (میلی‌متر) Rainfall (mm)
۱۳۸۶ (2007)	فروردین (April)	8.5	16.6	53.9
	اردیبهشت (May)	12.4	23.7	33
	خرداد (June)	18.6	33.8	17.6
	تیر (July)	22	31.5	3.9
	مرداد (August)	22.5	35.3	20
۱۳۸۷ (2008)	فروردین (April)	10.4	23.6	6.5
	اردیبهشت (May)	13.2	24.7	18
	خرداد (June)	17.9	30.5	13.6
	تیر (July)	22.2	32.5	7.6
	مرداد (August)	23.6	35.2	0.05
۱۳۹۱ (2012)	تیر (July)	22.8	31.6	136.9
	مرداد (August)	22.9	35	0
	شهریور (September)	19.6	32.7	37.5
	مهر (October)	13.9	29.2	94.5
	آبان (November)	8.9	23.5	34.1
۱۳۹۲ (2013)	تیر (July)	23.2	33.9	0.2
	مرداد (August)	22	32.2	25.1
	شهریور (September)	29.1	33.3	0
	مهر (October)	16.2	28.2	67.9
	آبان (November)	9.8	20.8	31.5
میانگین بلندمدت Mean of long-term	فروردین (April)	11.3	23.5	60.3
	اردیبهشت (May)	13.9	26.6	47.2
	خرداد (June)	18.5	29.9	35.7
	تیر (July)	23.6	34.3	52.1
	مرداد (August)	24.6	35.8	43.3
	شهریور (September)	20	30.4	49.3
	مهر (October)	14.6	26.9	133.7
آبان (November)	7.4	15.9	67.6	

نشریه تولید گیاهان زراعی، جلد هشتم (۴)، ۱۳۹۴

جدول ۳- میزان آب مصرفی و بارندگی (میلی متر) در طول فصل رشد ذرت دانه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲.  
Table 3. Applied water and rainfall (mm) during maize cropping season in 2012 and 2013.

سال (Year)	۱۳۹۱ (2012)		۱۳۹۲ (2013)	
تیمار (Treatment)	میزان آب مصرفی (میلی متر) Applied water (mm)	بارندگی (میلی متر) Rainfall (mm)	میزان آب مصرفی (میلی متر) Applied water (mm)	بارندگی (میلی متر) Rainfall (mm)
اول تیر × MAD= ۴۰٪ (22 June × 40%)	453.3	174	723	25.3
اول تیر × MAD= ۶۰٪ (22 June × 60%)	383.3	174	640	25.3
اول تیر × MAD= ۸۰٪ (22 June × 80%)	283.3	174	354.3	25.3
اول تیر × بدون آبیاری (22 June × No irrigation)	88	174	72.6	25.3
پانزدهم تیر × MAD= ۴۰٪ (6 July × MAD= 40%)	377	179	489	79.2
پانزدهم تیر × MAD= ۶۰٪ (6 July × MAD= 60%)	313.3	179	379.6	79.2
پانزدهم تیر × MAD= ۸۰٪ (6 July × MAD= 80%)	225	179	241	79.2
پانزدهم تیر × تنش کامل آبیاری (6 July × No irrigation)	76	179	81	79.2
سی تیر × MAD= ۴۰٪ (21 July × MAD= 40%)	290.3	136.5	409	97
سی تیر × MAD= ۶۰٪ (21 July × MAD= 60%)	225	136.5	263	97
سی تیر × MAD= ۸۰٪ (21 July × MAD= 80%)	133.3	136.5	182.6	97
سی تیر × تنش کامل آبیاری (21 July × No irrigation)	21	136.5	75	97

هر میلی متر آب معادل یک لیتر است

Each millimeter of water is equal to one liter.

واسنجی مدل: مدل با داده‌های جمع‌آوری شده (شامل روز تارسیدگی، روز تا برداشت، عملکرد ماده خشک، حداکثر شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و اجزای عملکرد) از تیمار آبیاری مطلوب و بدون تنش در سه تاریخ کشت (سال ۱۳۹۱) و دو تیمار از آزمایش دوم (پانزدهم و سی فروردین ۱۳۸۶)، واسنجی شد. پس از تعیین مقادیر اولیه ضرایب ژنتیکی در مزرعه، برای تنظیم بهترین ضرایب ژنتیکی آنالیز حساسیت به‌طور تکراری و بر اساس روش هوگنبوم و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد (۳۸).

در مرحله اول چرخه رشد گیاه شامل روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کالیبره شد. مقدار P2 برابر ۰/۲ قرار داده شد (در این تحقیق ضریب حساسیت به طول روز (P2) اندازه‌گیری نشد، اما بر اساس یافته‌های تولنار و هانتز (۱۹۸۳) مقدار آن ۰/۲ در نظر گرفته شد (۳۹)) و به‌طور متوالی P1 تغییر داده شد تا مقدار روز تا گرده‌افشانی با توجه به PHINT تنظیم شد و مقدار روز تا گرده‌افشانی شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده شده با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال<sup>۲</sup> (NRMSE) بررسی شد و این کار تا وقتی ادامه یافت که بهترین مقادیر حاصل شد. سپس مقدار P5 با توجه به روز تا رسیدگی فیزیولوژیک تنظیم شد. در مرحله بعدی مدل برای تجمع ماده خشک کالیبره شد. شاخص سطح برگ (LAI) و فاکتور حاصلخیزی خاک (SLPF) از فایل خاک و کارایی مصرف نور<sup>۳</sup> (RUE) بر روی تجمع ماده خشک تأثیر دارند. برای کالیبره کردن ماده خشک ابتدا مقدار PHINT با توجه به مقدار P1 به‌طور متوالی تغییر داده شد و سپس SLPF کالیبره شد.

در گام بعدی مدل برای عملکرد و اجزای عملکرد کالیبره شد. سرعت پرشدن دانه در مرحله رشد خطی دانه در شرایط مطلوب (میلی‌گرم در روز) جهت به‌دست آوردن بهترین مقدار کالیبره شد. تعداد دانه در هر بلال و تعداد دانه در واحد سطح از طریق تنظیم حداکثر پتانسیل تعداد دانه در هر بوته (G2) کالیبره شد. در این مرحله نیز مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با استفاده از شاخص‌های آماری (RMSE،  $R^2$  و NRMSE) بررسی شدند. ضرایب ژنتیکی محاسبه شده در جدول ۴ آورده شده است. همچنین نتایج واسنجی بر اساس ضرایب ژنتیکی به‌دست آمده در جدول ۵ آورده شده است. نتایج واسنجی نشان داد که CERES-Maize روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی را با دقت بالایی

1. Coefficient of Determination
2. Normalized root mean square error
3. Radiation Use efficiency

شبیه‌سازی می‌کند و اختلافی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود نداشت. همچنین مدل توانست سایر صفات مورد بررسی را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند. RMSE برای عملکرد دانه کمتر از ۱۰ درصد عملکرد مشاهده شده (۸۲۷۸ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۵). ماتی (۲۰۰۴) نیز عملکرد دانه را در مرحله واسنجی مدل در محدوده ۵-۱۰ درصد گزارش نمود (۲۵).

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای مدل CERES-Maize و توضیح هر کدام.

Table 4. Calculated genetic coefficients for CERES-Maize model and definition of them.

ضریب Coefficient t	تعریف Definition	واحد Units	ضرایب ژنتیکی محاسبه شده Calculated genetic coefficients
P1	دوره دمایی بر حسب درجه- روز (دمای پایه ۸ درجه سانتی‌گراد) از زمان ظهور گیاهچه تا پایان فاز جوانی که در این مدت گیاه به تغییرات طول روز حساس نیست. Thermal time ( $T_{base} 8^{\circ}C$ ) from seedling emergence to end of juvenile phase which the plant is not responsive to photoperiod)	درجه سانتی‌گراد بالای ۸ درجه سانتی‌گراد above $8^{\circ}C$	248
P2	تأخیر در نمو بر حسب روز به ازای هر ساعت افزایش در فتوپریود بیش از ۱۲/۵ ساعت (سرعت نمو حداکثر در طول روز ۱۲/۵ ساعت). Delay in development (days) for each hour that day length is above 12.5 hours (0 -1). If day length is less than 12.5 hours, development occurs at maximum rate.	طول روز Days $hr^{-1}$	0.2
P5	درجه روز رشد از ظهور گل ابریشم تا رسیدگی فیزیولوژیکی Degree days from silking to physiological maturity	بر حسب درجه روز (با دمای پایه بالاتر از ۸ درجه سانتی‌گراد) $T_{base} = 8^{\circ}C$	744
G2	حداکثر تعداد دانه در هر بوته Maximum possible number of kernels per plant	بر حسب بوته Number $plant^{-1}$	990
G3	سرعت رشد دانه در مرحله خطی پر شدن دانه در شرایط بهینه Kernel growth rate during linear grain filling stage under optimal conditions	میلی‌گرم بر روز $mg\ kernel^{-1}day^{-1}$	11
PHINT	زمان حرارتی لازم بین ظهور نوک دو برگ متوالی Phyllochron interval. The thermal time between requirement successive leaf tips appearance	درجه‌روز Degree days (per leaf tip)	44

جدول ۵- نتایج واسنجی مدل CERES-Maize در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان.

Table 5. Results of calibration of CERES-Maize model in agricultural research station of Gorgan.

صفت Trait	میانگین Mean		شاخص‌های آماری Statistical indices			
	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	تعداد مشاهدات (n)	جذر میانگین مربعات نرمال (NRMSE)
روز تا گرده‌افشانی (Days to Anthesis)	59	59	0.98	1.4	5	2.4
روز تا رسیدگی (Day to maturity)	102	102	0.94	2.8	5	2.8
عملکرد ماده خشک (کیلوگرم در هکتار) (Dry matter yield, Kg.ha <sup>-1</sup> )	17544	16793	0.68	1281	5	2.7
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) (Seed yield, Kg.ha <sup>-1</sup> )	8279	8578	0.73	789.6	5	9.5
شاخص سطح برگ (Leaf area index)	4.4	4.4	0.02	0.46	5	10.3

ارزیابی مدل: در ابتدا ارزیابی عمومی مدل با تیمارهایی که در مرحله واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفته بودند انجام شد (شکل ۱) و در ادامه جهت تعیین نقاط قوت و ضعف مدل ارزیابی در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت انجام شد. برای ارزیابی مدل تاریخ‌های گرده‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک و حداکثر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با مدل با داده‌های مشاهده شده در مزرعه مقایسه شدند. برای مقایسه این دو داده از شاخص‌های آماری مختلف از جمله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و میزان انحراف نتایج پیش‌بینی از خط ۱:۱ استفاده شد (۲۳).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - o_i)^2}{N}} \times 100 \quad \text{معادله ۱}$$

$$Normalized\ RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{M_p} \quad \text{معادله ۲}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{معادله ۳}$$

در این روابط  $O_i$ ،  $P_i$  و  $\bar{O}$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده، مشاهده شده و میانگین مشاهدات برای متغیرهای مورد مطالعه و  $N$  تعداد مشاهدات است. NRMSE بر حسب درصد بیان می‌شود و بیانگر درصد اختلاف نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و مشاهده شده است. اگر NRMSE به دست آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی بسیار عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد شبیه‌سازی خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد شبیه‌سازی نسبتاً خوب و در صورتی که این شاخص آماری بزرگتر از ۳۰ درصد باشد شبیه‌سازی ضعیف است (۱۹).

### نتایج و بحث

روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی: نتایج حاصل از ارزیابی مدل در مراحل گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ در شرایط آب‌وهوایی گرگان نشان داد که مدل با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی نموده است (شکل ۱)، به طوری که RMSE،  $R^2$  و NRMSE به عنوان شاخص‌های کارکرد مدل برای روز تا گرده‌افشانی به ترتیب برابر ۲/۵ روز، ۴/۴۴ و ۰/۸۳ درصد و برای روز تا رسیدگی فیزیولوژیک برابر ۲/۹ روز، ۲/۹ و ۰/۸۸ درصد بود (شکل ۱). همچنین ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های متفاوت و در رژیم‌های آبیاری متنوع در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد که با تأخیر در کاشت و افزایش تنش آبی میزان دقت مدل برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی قدری کاهش می‌یابد و بیشترین جذر میانگین مربعات خطا برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی از تاریخ کاشت سی‌ام تیرماه به ترتیب به میزان ۳/۰۴ و ۵/۳۱ روز به دست آمد (جدول ۶). همچنین بیشترین جذر میانگین مربعات خطا در تیمار تنش کامل برای روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی به ترتیب به میزان ۴/۲۲ و ۴/۹۶ روز به دست آمد (جدول ۶). نتایج نشان داد که با کاهش میزان آب آبیاری روز تا گرده‌افشانی افزایش، ولی روز تا رسیدگی کاهش یافت و مدل CERES-Maize نتوانست تأثیر کاهش میزان آب آبیاری را به درستی شبیه‌سازی نماید. با این حال میزان خطا در پیش‌بینی روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی در محدوده مشاهدات سایر محققان (۱۴، ۱۸، ۲۶) قرار دارد. هوگنوم و همکاران (۲۰۰۳) بیان داشتند که شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نمی‌گیرد (۱۶).

علاوه بر نقش مهم مراحل نموی در مدیریت مزرعه، تعیین زمان دقیق این مراحل برای شبیه‌سازی رشد اندام‌های گیاهی و در نهایت عملکرد دانه نیز دارای اهمیت است. چون میزان تسهیم مواد فتوسنتزی بین اندام‌های رویشی و زایشی گیاه (ضرایب تخصیص) متناسب با مراحل نموی گیاه انجام می‌گیرد (۳، ۳۷). همچنین ممکن است پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها به پیش‌بینی نمو فنولوژیک وابسته باشد. از این رو پیش‌بینی دقیق مراحل فنولوژی دارای اهمیت زیادی است (۳۷).

**عملکرد ماده خشک:** نتایج ارزیابی عمومی مدل تحت تأثیر تاریخ کاشت‌های متفاوت و رژیم‌های آبیاری در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد که دقت مدل در حد قابل قبولی قرار دارد، به طوری که مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و  $NRMSE$  به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل برای عملکرد ماده خشک برابر ۱۲۰۹ کیلوگرم در هکتار، ۰/۸۴ و ۲۱/۹ درصد به‌دست آمد (شکل ۱).

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در تاریخ کاشت‌های بهاره در سال ۱۳۸۷ نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۸ درصد میانگین عملکرد ماده خشک (۲۰۶۵۷ کیلوگرم در هکتار) بود. همچنین  $NRMSE$  بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برابر ۱۶/۵ درصد بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی عملکرد ماده خشک است (جدول ۶).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در تاریخ کاشت‌های تابستانه در سال ۱۳۹۲ نیز نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد ماده خشک در هر سه تاریخ کاشت موفق بوده است، به طوری که در هر سه تاریخ کاشت ضریب تبیین بالای ۰/۹۵ درصد به‌دست آمد و بیشترین  $NRMSE$  از تاریخ کاشت اول تیرماه به میزان ۲۵/۵ درصد به‌دست آمد (جدول ۶).

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی اثرات رژیم‌های آبیاری بر روی عملکرد ماده خشک در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نیز نشان داد که بهترین کارکرد مدل از آبیاری مطلوب به‌دست آمد و با افزایش تنش آبی دقت مدل کاهش یافت، به طوری که بیشترین  $NRMSE$  از تیمار تنش کامل به میزان ۴۴/۹ درصد به‌دست آمد (جدول ۶) و در این تیمار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۷۳ عملکرد مشاهده شده (۲۷۲۹ کیلوگرم در هکتار) بود. همچنین در همه تیمارهای آبیاری عملکرد ماده خشک شبیه‌سازی شده بیشتر از عملکرد ماده خشک مشاهده شده بود. درک و همکاران (۲۰۰۷) گزارش نمودند که مدل  $DSSAT$  مقدار تبخیر و تعرق را کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند و بنابراین گیاه کمتر دچار تنش شده و در نتیجه عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند (۷).

طبق نتایج هوگنوم و همکاران (۲۰۰۳) در این آزمایش نیز شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی) تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نگرفت (۱۶). از طرفی چون تولید و توزیع ماده خشک تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژیکی است (۳۷)، لازم است در معادلات به کار رفته در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی (تحت تیمارهای تنش خشکی) تجدید نظر شود.

**عملکرد دانه:** نتایج ارزیابی مدل نشان داد که مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی عملکرد دانه دارد، به طوری که مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و  $NRMSE$  به عنوان شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل برای عملکرد دانه به ترتیب برابر ۱۵۹۰ کیلوگرم در هکتار، ۲۹/۵ و ۰/۷۹ درصد به دست آمد (شکل ۱). همچنین ارزیابی مدل در سال ۱۳۸۷ (در سه تاریخ کشت پانزدهم فروردین و سی فروردین و پانزدهم اردیبهشت) نشان داد که مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و  $NRMSE$  به ترتیب برابر ۱۶۰۱ کیلوگرم در هکتار و ۰/۷۳ و ۱۶/۵ درصد بود (جدول ۶). ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های تابستانه در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نیز نشان داد که بیشترین جذر میانگین مربعات خطا در طی این دو سال به میزان ۱۵۱۲ کیلوگرم در هکتار (اول تیر) به دست آمد که کمتر از ۰/۲۵ مقدار میانگین مشاهده شده (۶۲۰۹ کیلوگرم در هکتار) است (جدول ۶). بنابراین این مدل توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی عملکرد دانه در تاریخ کاشت‌های متفاوت دارد.

بررسی اثرات رژیم‌های آبیاری نشان داد که مدل در شبیه‌سازی اثرات رژیم‌های آبیاری توانست روند کاهشی عملکرد دانه را با کاهش میزان آبیاری به خوبی شبیه‌سازی کند، اما شاخص‌های کارکرد مدل در تیمارهای آبیاری در محدوده مطلوبی قرار نداشتند و کمترین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه از تیمار تنش کامل به دست آمد؛ به طوری که مقدار  $NRMSE$  برای این تیمار برابر ۱۷۴/۹ درصد به دست آمد. در این تیمار، مدل عملکرد دانه را بیشتر از عملکرد دانه مشاهده شده پیش‌بینی نمود. یانگ و همکاران (۲۰۰۹) و موین (۲۰۱۳) نیز گزارش نمودند که مدل CERES-Maize تحت شرایط کم‌آبیاری عملکرد دانه را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند (۲۸، ۴۱). بیشترین دقت مدل از آبیاری  $MAD=60\%$  و پس از آن  $MAD=40\%$  به دست آمد (جدول ۶). یکی از دلایلی که باعث کاهش دقت شبیه‌سازی مدل در شرایط کم‌آبیاری می‌گردد تنوع موجود در خاک است، به طوری که ساختمان و بافت خاک دارای پراکندگی متنوعی است و چون مدل این شرایط را یکنواخت در نظر

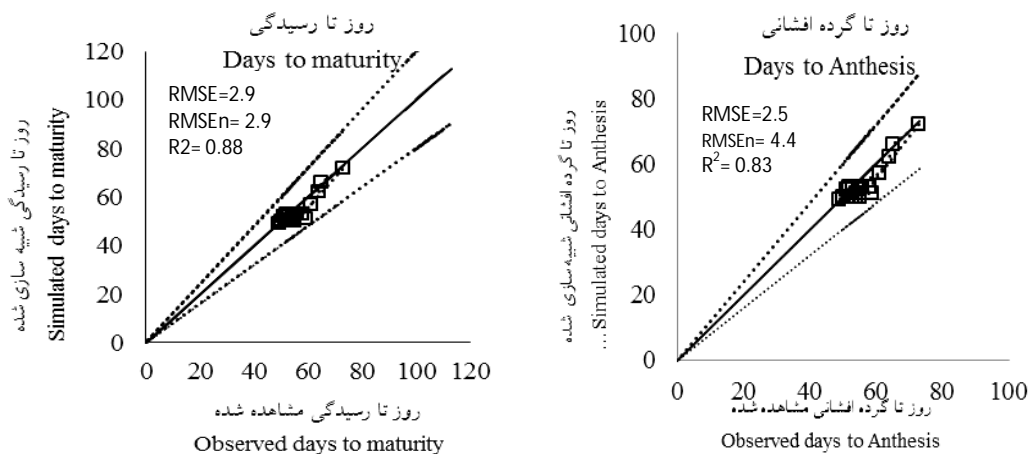


می‌گیرد در تخمین میزان و عمق آب دچار مشکل می‌شود. عبد و همکاران (۲۰۰۰) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند (۱). همچنین با توجه به ساده‌سازی صورت گرفته در بخش شبیه‌سازی آب و خاک و تبخیر و تعرق، بسته DSSAT برای شبیه‌سازی رشد ذرت دچار مشکلاتی است (۶، ۱۰). دیجونگ (۲۰۱۱) بیان نمود که عدم توجه به دمای برگ و مقاومت روزنه‌ای در تیمارهای تحت تنش از دلایلی هستند که باعث کاهش دقت مدل در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق می‌شود و همین امر باعث می‌شود تا میزان ماده خشک شبیه‌سازی شده افزایش یابد (۶). همچنین برخی از محققان (۹، ۱۰) سعی نمودند با تغییر ساختار و الگوریتم به کار رفته شبیه‌سازی محصول نهایی گیاه را در تیمارهای تحت تنش خشکی را تا حدودی بهبود دهند. دوکوهکی و همکاران (۲۰۱۲) بیان داشتند که مدل در تخمین میزان تبخیر از سطح خاک با مشکل روبه‌رو است (۹). همچنین نیلسون و همکاران (۲۰۰۲) بیان داشتند که منشأ این مشکل در تخمین نادرست میزان تبخیر و تعرق و یا در روش نادرست جداسازی تبخیر و تعرق از یکدیگر (در رابطه پرستلی تیلور) است (۲۹).

**حداکثر شاخص سطح برگ:** نتایج ارزیابی مدل در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ نشان داد که مدل CERES-Maize حداکثر شاخص سطح برگ را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند. به طوری که  $R^2$  و NRMSE، RMSE به ترتیب معادل ۱/۰۵، ۲۸/۹ و ۶۶ درصد به دست آمد (شکل ۱).

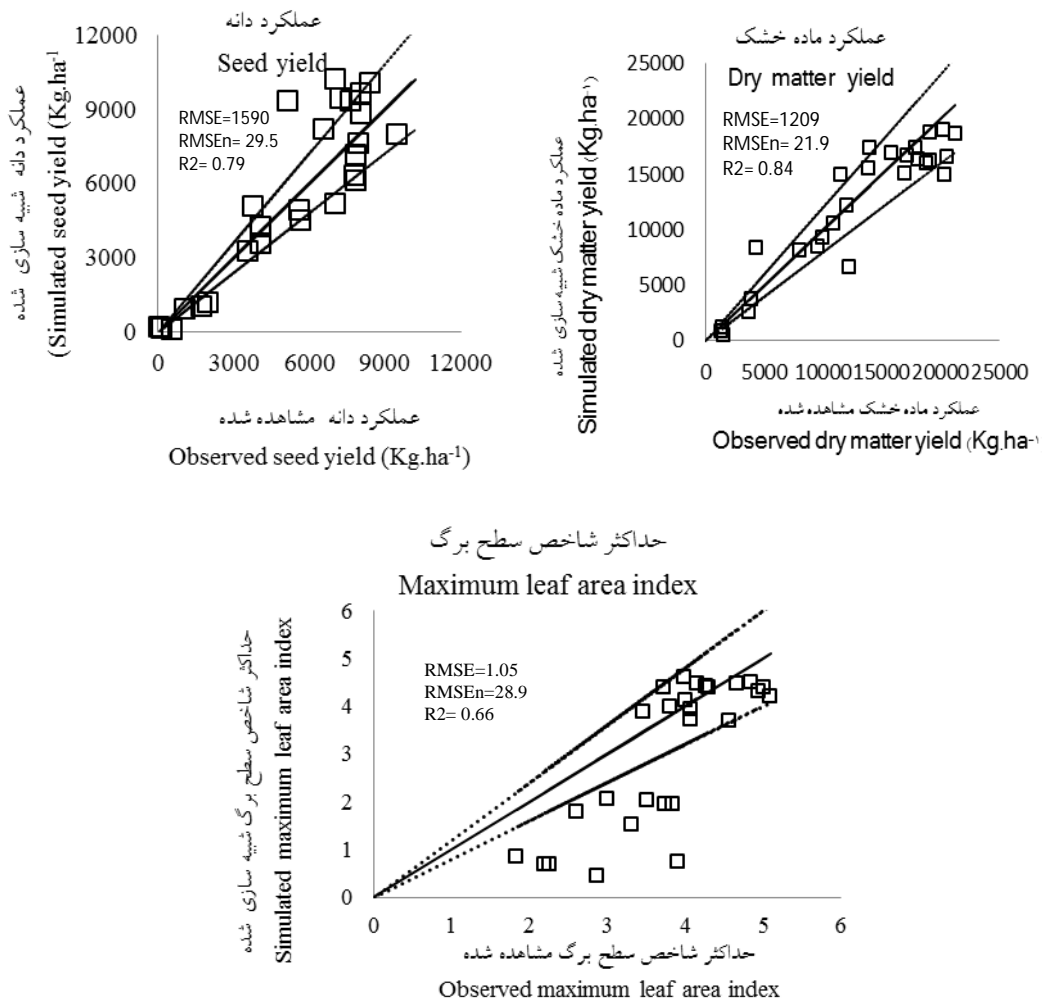
بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در سال ۱۳۸۷ نیز نشان داد که NRMSE، RMSE و  $R^2$  به ترتیب معادل ۰/۷، ۰/۷۷ و ۱۴/۳ درصد هستند (جدول ۶) که نشان می‌دهد دقت مدل در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ در تاریخ کشت‌های بهاره قابل قبول است. از طرفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در تاریخ کاشت‌های تابستانه در سال ۱۳۹۲ نشان داد که در تاریخ کشت‌های اول و پانزدهم تیر با وجود ضریب تبیین بالا (۰/۸۳) دقت مدل در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ قابل قبول نیست و میزان NRMSE در این دو تاریخ کاشت بیشتر از ۳۰ درصد بود. احتمالاً دماهای بالا در این دو تاریخ کاشت یکی از دلایلی است که باعث می‌شود مدل نتواند شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ را به خوبی انجام دهد، زیرا دما مهمترین عامل محدودکننده گسترش سطح برگ است (۳۸) و مدل مقادیر شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار پیش‌بینی شده شبیه‌سازی می‌کند.

ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ تحت تأثیر اثرات رژیم‌های آبیاری متفاوت بود، به طوری که در تیمار  $MAD=80\%$  بهترین شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ صورت گرفت، در این تیمار مقدار  $RMSE$  و  $NRMSE$  و  $R^2$  به ترتیب معادل  $0.95$ ،  $0.82$  و  $0.89$  به دست آمدند. در تیمارهای  $MAD=70\%$  و  $MAD=80\%$  هر چند ضریب تبیین کوچکی به دست آمد، ولی به دلیل کوچک بودن مقدار  $RMSE$  و  $NRMSE$  می‌توان گفت شبیه‌سازی خوب صورت گرفته است، ولی در تیمار تنش کامل جذر میانگین مربعات خطا و  $NRMSE$  به ترتیب به میزان  $1/39$  کیلوگرم در هکتار و  $54/7$  درصد به دست آمد و شبیه‌سازی از دقت لازم برخوردار نیست. از طرفی مدل در همه تیمارهای کم‌آبیاری حداکثر شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار مشاهده شده برآورد نمود. موبن و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش نمودند که مدل CERES-Maize حداکثر شاخص سطح برگ را در تیمارهای خشکی کمتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌نماید (۲۸). همچنین برخی از محققان پیشنهاد نمودند در معادلاتی که توسعه و زوال برگ را در شرایط خشکی شبیه‌سازی می‌کنند تجدید نظر شود (۵، ۱۴، ۱۵، ۳۶، ۴۰). همچنین ممکن است یکی از دلایل کاهش سطح برگ مشاهده شده این باشد که در دماهای بالا و تیمارهای تحت تنش برگ‌های ذرت به صورت لوله‌ای در می‌آیند و میزان خطا در تعیین سطح برگ افزایش می‌یابد.



شکل ۱- ارزیابی مدل CERES-Maize در تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲.

Figure 1. Evaluation of CERES- Maize model in different sowing dates and different irrigation regimes during 2008, 2012 and 2013.



ادامه شکل ۱- ارزیابی مدل **CERES-Maize** در تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت در سال‌های ۱۳۸۷، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲.

Figure 1. Evaluation of CERES- Maize model in different sowing dates and different irrigation regimes during 2008, 2012 and 2013.

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize برای روز تا گرده افشانی، روز تا رسیدگی و عملکرد ماده خشک تحت تأثیر تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های متفاوت آبیاری در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان.

Table 6. Results of CERES-Maize model evaluation for days to anthesis, days to maturity and dry matter yield in different sowing dates and different irrigation regimes at agricultural research station of Gorgan

صفت Trait	میانگین Mean		شاخص‌های آماری Statistical indexes			
	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	تعداد مشاهدات (n)	جذر میانگین مربعات نرمال (NRMSE)
روز تا گرده افشانی Days to anthesis						
پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷ 3 <sup>th</sup> April, 18 <sup>th</sup> April and 3 <sup>th</sup> May	67	67	0.98	0.82	3	1.2
22 <sup>th</sup> June (2013) اول تیر ۱۳۹۲	54	54	--	1.58	4	2.9
6 <sup>th</sup> July (2013) پانزده تیر ۱۳۹۲	52	53	--	1.73	4	2.3
21 <sup>th</sup> July (2013) سی تیر ۱۳۹۲	56	53	--	3.04	4	5.42
MAD= 40% (2013) MAD= %۴۰ (۱۳۹۲)	53	53	--	1.73	3	26.3
MAD= 60% (2012 and 2013) MAD= %۶۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	52	52	0.08	1.73	6	3.3
MAD= 80% (2012 and 2013) MAD= %۸۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	54	52	0.07	1.87	6	2.3
No irrigation (2012 and 2013) بدون آبیاری (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	56	52	0.097	4.22	6	7.5
روز تا رسیدگی Days to maturity						
پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷ 3 <sup>th</sup> April, 18 <sup>th</sup> April and 3 <sup>th</sup> May	105	105	0.95	2.08	3	1.9
22 <sup>th</sup> June (2013) اول تیر ۱۳۹۲	92	92	--	4.55	4	4.7
6 <sup>th</sup> July (2013) پانزده تیر ۱۳۹۲	95	94	--	1.58	4	1.7
21 <sup>th</sup> July (2013) سی تیر ۱۳۹۲	111	113	--	5.31	4	3.1
MAD= 40% (2013) MAD= %۴۰ (۱۳۹۲)	101	100	0.99	1.29	3	1.3
MAD= 60% (2012 and 2013) MAD= %۶۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	100	98	0.97	2.34	6	2.3
MAD= 80% (2012 and 2013) MAD= %۸۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	92	92	0.95	0.82	6	2.3
No irrigation (2012 and 2013) بدون آبیاری (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	96	96	0.66	4.96	6	5.1
عملکرد ماده خشک (کیلوگرم در هکتار) Dry matter yield (Kg.ha <sup>-1</sup> )						
پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷ 3 <sup>th</sup> April, 18 <sup>th</sup> April and 3 <sup>th</sup> May	20657	1691	0.16	1609	3	18.7
22 <sup>th</sup> June (2013) اول تیر ۱۳۹۲	13318	10320	0.98	3405	4	25.5
6 <sup>th</sup> July (2013) پانزده تیر ۱۳۹۲	12106	10883	0.97	1900	4	15.6
21 <sup>th</sup> July (2013) سی تیر ۱۳۹۲	10742	10794	0.95	1356	4	12.6
MAD= 40% (2013) MAD= %۴۰ (۱۳۹۲)	19297	16113	0.06	3313	3	17.1
MAD= 60% (2012 and 2013) MAD= %۶۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	15276	15786	0.14	2160	6	14.1
MAD= 80% (2012 and 2013) MAD= %۸۰ (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	10388	10955	0.03	2579	6	24.8
No irrigation (2012 and 2013) بدون آبیاری (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	2729	3393	0.81	1944	6	44.9

ادامه جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize برای عملکرد دانه و حداکثر شاخص سطح برگ تحت تأثیر تاریخ کشت‌های مختلف و رژیم‌های متفاوت آبیاری در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گرگان.

Table 6.continued- Results of CERES-Maize model evaluation for seed yield and maximum leaf area index in different sowing dates and different irrigation regimes at agricultural research station of Gorgan.

صفت Trait	میانگین Mean		شاخص‌های آماری Statistical indexes			
	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	ضریب تعیین (R <sup>2</sup> )	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	تعداد مشاهدات (n)	جذر میانگین مربعات نرمال (NRMSE)
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) (Kg.ha <sup>-1</sup> ) seed yield (Kg.ha <sup>-1</sup> )						
پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۱۳۸۷ 3 <sup>th</sup> April, 18 <sup>th</sup> April and 3 <sup>th</sup> May	9678	8310	0.73	1601	3	16.5
22 <sup>th</sup> June (2013) اول تیر ۱۳۹۲	6209	5039	0.99	1512	4	24.3
6 <sup>th</sup> July (2013) پانزده تیر ۱۳۹۲	5572	5232	0.9	1270	4	22.7
21 <sup>th</sup> July (2013) سی تیر ۱۳۹۲	4720	5514	0.88	1380	4	0.29
MAD= 40% (2013) (۱۳۹۲) MAD= %۴۰	9486	7729	0.01	1879	3	19.8
MAD= 60% (2012 and 2013) (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱) MAD= %۶۰	7046	7842	0.2	1768	6	25
MAD= 80% (2012 and 2013) (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱) MAD= %۸۰	4286	5897	0.09	1894	6	14.4
No irrigation (2012 and 2013) بدون آبیاری (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	603	1339	0.91	766	6	174.9
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index						
پانزده فروردین، سی فروردین و پانزده اردیبهشت ۲۰۰۸ 3 <sup>th</sup> April, 18 <sup>th</sup> April and 3 <sup>th</sup> May	4.9	4.3	0.77	0.7	3	14.3
22 <sup>th</sup> June (2013) اول تیر ۱۳۹۲	4	2.3	0.88	2	4	49.7
6 <sup>th</sup> July (2013) پانزده تیر ۱۳۹۲	3.6	2.7	0.87	1.1	4	30.8
21 <sup>th</sup> July (2013) سی تیر ۱۳۹۲	3.3	2.7	0.56	3.5	4	21.2
MAD= 40% (2013) (۱۳۹۲) MAD= %۴۰	4.4	4.2	0.04	1.3	3	5.9
MAD= 60% (2012 and 2013) (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱) MAD= %۶۰	4	3.8	0.19	1.3	6	2.3
MAD= 80% (2012 and 2013) (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱) MAD= %۸۰	3.6	2.2	0.95	0.8	6	0.89
No irrigation (2012 and 2013) بدون آبیاری (۱۳۹۲ و ۱۳۹۱)	2.5	1.4	0.95	1.4	6	54.7

### نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل CERES-Maize نشان داد که این مدل مراحل فنولوژیکی (روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی) را در تاریخ کاشت‌های مختلف و رژیم‌های آبیاری متفاوت با دقت زیادی شبیه‌سازی می‌کند

که نشان‌دهنده ساختار مناسب مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی است. بنابراین این مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مزرعه (نظیر انتخاب تاریخ کاشت مناسب، زمان کوددهی و...) مورد استفاده قرار گیرد. نتایج ارزیابی مدل در تاریخ کاشت‌های مختلف نیز نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه از دقت کافی برخوردار است. از طرفی هر چند مدل روند کاهش عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک و شاخص سطح برگ را در تیمارهای کم‌آبیاری به خوبی شبیه‌سازی می‌کند، ولی بر اساس شاخص‌های آماری از جمله RMSE، NRMSE و  $R^2$  به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی کارکرد مدل از دقت لازم برخوردار نیست. به نظر می‌رسد لازم است آزمون و دقت مدل با داده‌های حاصل از آزمایش‌های متنوع مجدداً انجام شود و در صورت تأیید نتایج این بررسی در معادلات به کار رفته در قسمت بیلان آب خاک که این صفات را شبیه‌سازی می‌نمایند تجدید نظر شود. همچنین نتایج نشان داد که شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی تحت تأثیر محتوای رطوبتی خاک قرار نگرفت. از طرفی چون تولید و توزیع ماده خشک تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد، لازم است در فرآیندهای به کار رفته در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی (تحت تیمارهای تنش خشکی) تجدید نظر شود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان از مدل CERES-Maize در پیش‌بینی عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک در شرایط پتانسیل در شرایط آب و هوایی گرگان بهره برد.

#### منابع

1. Abd, H., Razak, B., Aminuddin, Y., and Mohd, F. 2000. CERES-Maize simulation model: establishment of planting window for grains maize under rainfed conditions. *Pertanika Tropic Agri. Sci.* 23(2): 75-81.
2. Alizadeh, O., Majede, E., Nadian, H.A., Normohamade, G.H., and Amerian, M.R. 2008. Effect of water stress and different nitrogen rates on phenology, growth and development of corn. *J. Agric. Sci. Nat. Res.* 14: 101-115. (In Persian).
3. Andarzian, B., Bakhshandeh, A.M., Bannayan, M., and Emam, Y. 2007. Evaluation of the CERES-wheat model in Ahvaz condition. *Iran. J. Field Crops Res.* 6: 11-22. (In Persian).
4. Ben Nouna, B., Katerji, N., and Mastrorilli, M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *Eur. J. Agro.* 13: 309-322.
5. Carberry, P.S. 1991. Test of leaf-area development in CERES-Maize. *Field Crops Res.* 27: 159-167.

6. DeJonge, K. 2011. Evaluation and improvement of CERES-Maize Evapotranspiration simulations under full and limited irrigation treatments in northern Colorado. Ph.D. thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University.
7. Derek, M., Heeren, H.D., Werner, T., and Trooien, P. 2007. Alternative irrigation water management strategies to conserve water. 52<sup>nd</sup> Annual Midwest Ground Water Conference. Sioux Falls. Oct 29-31. 605-611.
8. Dogan, E., Clark, G.A., Rogers, D.H., Martin, V., and Vanderlip, R.L. 2006. On-farm scheduling studies and CERES-Maize simulation of irrigated corn. *App. Eng. Agric.* 22(4): 509-516.
9. Dokoohaki, H., Gheysari, M., Mousavi, S.F., and Mirlatifi, S.M. 2012. Estimation of soil water content under deficit irrigation by using DSSAT. *Water. Irri. Manag.* 2: 1-14.
10. Faria, R.T.D., and Bowen, W.T. 2003. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. *Brazil. Arch. Bio. Technol.* 46: 489-498.
11. France, J., and Thornely, J.H.M. 1984. *Mathematical Models in Agriculture*. Butterworth's, London. 335 pp.
12. Gerck, S., and Okant, M. 2010. Evaluation of CERES-Maize simulation model results with measured data using water pillow irrigation under semi-arid climate conditions. *Afri. J. Agric. Res.* 5(8): 606- 613.
13. Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Homae, M., Asadi, M.E., and Hogenboom, G. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates, *Agric Water Manag.* 96: 964-954.
14. Gungula, D.T., Kling, J.G., and Togun, A.O. 2003. CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed condition in Nigeria. *Agri. J.* 95: 892-899.
15. Hodges, T., Botner, D., Sakamoto, C., and Haug, J.H. 1987. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. Cornbelt. *Agric. Forest. Meteo.* 40, 293-303.
16. Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., and Tsuji, G.Y. (Editors). 2003. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0*. Vol. 1. Univ. of Hawaii, Honolulu, HI.
17. Hoogenboom, G., Jintrawet, A., and Wilkens, P.W. 2009. A training program on DSSAT version 4.5: Assessing crop production, nutrient management, climatic risk and environmental sustainability with simulation Models., In N. U. o. Malaysia, (ed.), March 30-April 10. Bangi, Selangor, Malaysia.
18. Irmak, A., Jones, J.W., Mavromatis, T., Welch, S.M., Boote, K.J., and Wilkerson, G.G. 2000. Evaluating methods for simulating soybean cultivar responses using cross validation. *Agro. J.* 92: 1140-1149.

19. Jamieson, P., Porter, J., and Wilson, D. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27: 337-350.
20. 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. *Eur. J. Agri.* 18: 235–265.
21. Kamkar, B., Koocheki, A.R., Mahallati, M.N., and Razvani Moghaddam, P. 2007. Construction and primary evaluation of a simple model to predict potential dry matter production in pearl millet. *EJCP.* 3: 99-116. (In Persian).
22. Kamkar, B., Koocheki, A.R., mahallati, M.N., and Razvani moghaddam, P. 2008. Yield gap analysis of cumin in nine regions of Khorasan provinces using modeling approach. *Iran. J. Field Crops Res.* 2(2): 196-208. (In Persian).
23. Loague, K., and Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Contaminant Hydro.* 7:51-73.
24. Mahru, A.H., Soltani, A., Galeshi, S., and Kalate-Arabi, M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of DSSAT model for Golestan province. *EJCP.* 3 (2): 229-253. (In Persian).
25. Mati, B.M. 2004. The influence of climate change on maize production in the semihumid-semi-arid areas on Kenya. *J. Arid. Environ.* 46: 333-344.
26. Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Wilkerson, G.G., and Hoogenboom, G. 2002. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trials across different states. *Crop Sci.* 42: 76–89.
27. Mokhtarpour, H., 2011. Impact of planting date and density on growth of maize in northeren Iran. Ph.D. thesis. University Putra Malaysia. Putra, Malaysia.
28. Mubeen, M., Ahmad, A., Wajid, A., Khaliq, T., and Bakhsh, A. 2013. Evaluating CSM-CERES-Maize model for irrigation scheduling in semi-arid conditions of Punjab. Pakistan. *Int. J. Agri. Bio.* 15: 1–10.
29. Nielsen, D.C., Ma, L., Ahuja, L.R., and Hoogenboom, G. 2002. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRO models. *Agr. J.* 94: 1234-1243.
30. Panda, R., Behera, S., and Kashyap, P. 2004. Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. *Agric Water Manag.* 66:181-203.
31. Qiring, S.M., and Legates, D.R. 2008. Application of CERES-Maize for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA. *Agri. Forest Meteo.* 148: 964-975.
32. Ritchie, J., Singh, U., D., and Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield, p. 79-98, In G. Y. Tsuji, et al., eds. *Understanding options for agricultural production.* Kluwer Academic Publishers.



33. SAS Institute Inc. 1996. SAS/STAT User's Guide, Release 6.09. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
34. Saseendran, S.A., Ma, L., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., and Ahuja, L.R. 2005. Simulating planting date effects on corn production using RZWQM and CERES-Maize models. *Agro. J.* 97: 58-71.
35. Sohrabi, B., and Ghorbani, N. 2002. The effect of soil moisture allowed depletion on cotton yield in Gorgan. *J. Agric. Sci. Nat. Res.* 9: 100-108. (In Persian).
36. Soler, C.M.T., Sentelhas, P.C., and Hoogenboom, G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *Eur. J. Agri.* 27: 165-177.
37. Soltani, A. 2009. *Mathematical Modeling in Field Crops*. Ferdowsi University Press. 175 p. (In Persian).
38. Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y., and Rahemi-Karizaki, A. 2008. Modeling leaf production and senescence in chickpea. "International meeting on soil fertility and management and agroclimatology". Turkey. Oct 29. 655-674.
39. Tollenaar, M., and Hunter, R. 1983. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize. *Crop Sci.* 23:457-460.
40. Xie, Y., Kiniry, J.R., Nedbalek, V., and Rosenthal, W.D. 2001. Maize and sorghum simulations with CERES-Maize, SORKAM, and ALMANAC under water-limiting conditions. *Agri. J.* 93:1148-1155.
41. Yang, Z., Wilkerson, G., Buol, G., Bowman, D., and Heiniger, R. 2009. Estimating Genetic Coefficients for the CSM-CERES-Maize Model in North Carolina Environments. *Agri. J.* 101: 1276-1285.

