نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۷۸-۱۶۶۵

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1665-1678

شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر تولید ذرت (*Zea maize*) توسط مدل CERES-Maize تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه

فرزاد مندنی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

چکیده

به منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی تولید ذرت تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار در کرمانشاه در سال ۱۳۹۳ اجرا شد. تیمارها شامل کود نیتروژن (صفر، ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار) به‌عنوان کرت‌های اصلی و ارقام ذرت SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به‌عنوان کرت‌های فرعی بودند. ضرایب ژنتیکی ارقام توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی برای تیمار ۳۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار محاسبه شد. نتایج واسنجی نشان داد، مدل قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. نتایج ارزیابی‌های مدل نشان داد که میزان nRMSE وزن خشک کل در ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶/۲، ۸/۲ و ۵/۸ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. میزان nRMSE عملکرد دانه نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴/۳، ۱۱/۴ و ۸/۱ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. هم در شرایط شبیه‌سازی و هم در شرایط مزرعه با افزایش میزان کود نیتروژن از صفر به ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت افزایش یافت. رقم سیمون در مقایسه با سایر ارقام از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بود. بطورکلی نتایج نشان داد که مدل CERES-Maize قادر بود واکنش ارقام ذرت نسبت به تغییرات نیتروژن را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی مدل، عملکرد دانه، نمو فنولوژیک، واسنجی مدل، وزن خشک کل

مقدمه

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد به عنوان ابزار مفیدی برای محاسبه واکنش محصولات زراعی نسبت به تغییر در عوامل محیطی و مدیریت زراعی،ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیک جهت بهبود عملکرد و کمک به تصمیم سازی‌ها جهت استفاده بهینه از منابع قابل دسترس افزایش یافته است (۱۵ و ۲۰). علاوه‌براین، مدل‌های شبیه سازی رشد محصولات زراعی کمک زیادی به کاهش هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها کرده و محققین را به کمک اطلاعات هواشناسی بلند مدت قادر به کاشت چندین ساله گیاه مورد نظر و ارزیابی نتایج آن می‌سازد (۲۱). در بین مدل‌ها یکی از معروفترین و پر کاربردترین آنها مدل DSSAT است که برای بیش از ۲۰ گیاه زراعی مختلف در یک بسته نرم‌افزاری، به منظور تسهیل در کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی در تحقیقات جمع‌آوری شده است (۲۱). مدلDSSAT در بیش از ۹۰ کشور توسط محققان بسیاری از اواخر دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱). بطوری‌که جونز و همکاران (۱۱) به بیش از ۱۲۰ مطالعه انجام شده توسط این مدلاز شمال آمریکا تا آفریقا اشاره کرده‌اند. در این مطالعات از این مدل برای تعیین عملیات مطلوب مدیریتی محصولات، مدیریت کود، مدیریت آبیاری، کشاورزی دقیق، مدیریت آفت، تنوع و تغییر اقلیم، آلودگی محیط و آموزش استفاده شده است (۲۱).

مدل سیستم گیاهی ذرت (CERES-Maize) یکی از مشهورترین مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT و یکی از پرکاربردترین مدل گیاهی شبیه‌سازی رشد و تولید ذرت است (۱۰ و ۱۹) که در سراسر جهان، بیش از ۳۰ سال در زمینهٔ آن تحقیق و بررسی شده و می‌تواند اثرات گونهٔ گیاهی، تراکم کشت، آب و هوا، آب خاک و نیتروژن را بر رشد، نمو و عملکرد ذرت شبیه سازی کند (۹ و ۱۱). این مدل در پژوهش‌های فراوانی از جمله ارزیابی عملکرد در شر ایط اقلیمی نیمه خشک مدیترانه‌ای (۱۶)، شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک (۲۲) و راهکارهای بهینهٔ آبی (۱۴) استفاده شده و

۱- استادیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
(*- نویسنده مسئول: Email: farzad_mondani@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.61895

کارایی و توانمندی آن به اثبات رسیده است. این مدل همچنین می‌تواند تحت شرایط تنش‌های محیطی رشد و نمو گیاه، تولید ماده خشک و عملکرد را شبیه‌سازی کند. وایت (۲۴) اثرات نوسان درجه حرارت روی زمان گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ذرت را توسط مدل CERES-Maize مورد ارزیابی قرار داد و نتیجه گرفتند که این مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک داشت.

نیتروژن مهمترین عنصر مورد نیاز گیاه جهت دستیابی به عملکرد مطلوب است. اگرچه کمبود نیتروژن در محیط اطراف گیاه باعث کاهش عملکرد می‌گردد با این حال مدیریت صحیح این عنصر نه تنها منجر به کاهش مصرف کود و هزینه‌های تولید شده، بلکه باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست نیز می‌شود (۴). چسانگا و همکاران (۵) نشان دادند مدل CERES-Maize توانایی بالایی در شبیه‌سازی ویژگی‌های رشد و نمو ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت. یانگ و همکاران (۲۷) نیز گزارش کردند مدل CERES-Maize دقت بسیار بالایی در شبیه‌سازی پاسخ ارقام ذرت به کاربرد مقادیر متفاوت کود نیتروژن داشت. همچنین گزارش شده است مدل CERES-Maize دقت بالای در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت در شرایط کاربرد کود نیتروژن دارد (۲۲). محققین دیگر نیز توانایی مدل CERES-Maize را در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت مطلوب گزارش کردند (۷، ۱۷ و ۲۳).

اطلاعات آب و هوایی و خاک، عملیات زراعی و ضرایب ژنتیکی از ورودی‌های اصلی مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT هستند. با این وجود دقت شبیه‌سازی صورت گرفته به وسیله مدل CERES-Maize بستگی به کیفیت داده‌های مورد استفاده، به خصوص در قسمت متغیرهای گیاهی، به عنوان ورودی‌های مدل دارد که اگر این متغیرها با توجه به مفهوم و تعریف آنها، به دقت از طریق آزمایش برآورد شوند، دقت و صحت شبیه‌سازی‌ها افزایش خواهد یافت (۱۵). در مدل‌های بسته نرم‌افزاری DSSAT ارقام مختلف گیاهان زراعی دارای واکنش‌های متفاوتی به تغییر در عوامل محیطی هستند که بر اساس ضرایب ژنتیکی تنظیم می‌شود (۹ و ۱۱). بر این اساس هدف از اجرای این تحقیق تعیین و واسنجی ضرایب ژنتیکی مدل CERES-Maize و ارزیابی اجرای آن در شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد دانه برخی از ارقام رایج ذرت تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن و همچنین کاهش هزینه‌های تحقیقات کشاورزی و کمک به تصمیم‌گیری‌های مدیریت زراعی بود.

مواد و روش‌ها

تشریح مدل

به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو ارقام مختلف ذرت از مدل سیستم گیاهی ذرت (CSM-CERES-Maize) از بسته نرم‌افزار DSSAT نسخه ۴/۶ استفاده شد (۹ و ۱۱). مدل CERES برای شبیه‌سازی اثر رقم، تراکم کاشت، آب و هوا (اقلیم)، رطوبت خاک و نیتروژن بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی مختلف طراحی شده است. ورودی‌های این مدل شامل عملیات مدیریت زراعی، اختلافات ارقام، نوع و ویژگی‌های خاک و اطلاعات آب و هوایی است. ورودی‌های مدیریت زراعی شامل تاریخ کاشت، تراکم بوته، عمق کاشت، فاصله ردیف کاشت، شرایط اولیه خاک (رطوبت و حاصلخیزی) و جزئیات برداشت بود که در بخش XBuild بسته نرم-افزاری مدل DSSAT معرفی گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز نیز شامل تشعشع خورشیدی روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه و بارندگی روزانه برای شرایط آب و هوایی کرمانشاه بود که توسط بخش WeatherMan بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT در قالب فایل هواشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید. علاوه‌بر این اطلاعات خاکشناسی مورد نیاز شامل درصد رس، شن و سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، کل نیتروژن قابل جذب توسط گیاه، درصد کربن آلی، نقطه ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و میزان رطوبت اشباء خاک محل آزمایش بود (جدول ۱) که توسط بخش SBuild بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT در قالب فایل خاکشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Soil physico-chemical properties of experimental field

عمق خاک (سانتی متر) Soil Depth (cm)	بافت خاک Soil Texture	رس (٪) Clay (%)	سیلت (٪) Silt (%)	شن (٪) Sand (%)	کربن آلی (٪) Organic Carbon (%)	نیتروژن (٪) Nitrogen (%)	اسیدیته خاک Ph	وزن مخصوص ظاهری Balk Density	نقطه پژمردگی دائم Permanent Wilting Point	نقطه ظرفیت زراعی Field Capacity	رطوبت اشباع Saturation ($m^3\ m^{-3}$)
0-30	Clay-Silt	44.3	39.0	16.7	1.5	0.17	7.4	1.4	0.205	0.325	0.49
30-60	Clay-Silt	44.7	38.7	16.7	1.1	0.17	7.4	1.5	0.205	0.325	0.49
60-90	Clay-Silt	42.3	40.0	17.7	1.0	0.17	7.4	1.6	0.225	0.355	0.495

آزمایش مزرعه

به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی مورد نیاز مدل CERES-Maize و اعتبارسنجی مدل آزمایشی در سال ۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۵/۹۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹/۵۲ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر) اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار بود. تیمارهای آزمایش شامل پنج سطح کود نیتروژن (صفر، ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ درصد نیاز گیاهی ذرت به عنصر نیتروژن که مقدار توصیه شده بر اساس آزمون خاک به ترتیب معادل صفر، ۱۳۸، ۲۳۸، ۳۵۰ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار در نظر گرفته شد) در قالب کرت‌های اصلی و سه رقم رایج ذرت دیررس SC-۷۰۴، متوسط رس سیمون و متوسط رس BC-۶۷۸ در قالب کرت‌های فرعی بودند. در این بررسی آنالیز خاک قبل از کاشت در اعماق صفر تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری خاک انجام شد و تیمارهای کود نیتروژن بر اساس این آزمون لحاظ شد (جدول ۱). از کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) در سه نوبت همزمان با کاشت، در مرحله نموی چهار برگی و آغاز گلدهی استفاده شد.

عملیات آماده‌سازی بستر بذر شامل شخم عمیق، دیسک زنی و تسطیح خاک بود که در نیمه دوم اردیبهشت انجام گردید و کاشت بذور ذرت به صورت خشکه‌کاری در اوایل خرداد ماه انجام شد. تراکم کاشت برای هر یک از ارقام مورد بررسی براساس تراکم مطلوب کاشت آن رقم انتخاب شد که ۷/۵ بوته در متر مربع بود. بذور ذرت در عمق ۵ تا ۷ سانتی‌متر توسط دست کشت شد. هر کرت فرعی نیز شامل ۴ ردیف کاشت به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به طول ۵ متر بود. آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و بعد از آن هر ۷ روز یکبار بصورت نشتی صورت گرفت. مبارزه با علف‌هرز توسط وجین دستی بر حسب نیاز انجام گرفت.

اندازه‌گیری وجمع آوری داده‌ها

اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت مراحل نموی بر حسب روز پس از سبز شدن و نمونه‌برداری‌های تخریبی از بوته‌های ذرت بود. برای نمونه‌برداری‌های تخریبی از ۲ هفته پس از سبز شدن تا مرحله رسیدگی کامل، نمونه‌های تصادفی (در هر کرت ۳ بوته بطور کاملا تصادفی) جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و وزن خشک گیاه برداشت شد. برای اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه شاخص سطح برگ‌سنج (مدل LA-3000A) استفاده شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک نیز ابتدا نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۷۲ ساعت تا ثابت شدن وزن خشک قرار داده شد و سپس توسط ترازو وزن آنها تعیین شد. برای ثبت عملکرد نهایی ذرت نیز در انتهای دوره رشد، یک متر مربع از هر کرت برداشت شده و سپس وزن خشک کل و عملکرد دانه تفکیک ارقام اندازه‌گیری شد.

واسنجی مدل

به منظور واسنجی مدل CERES-Maize لازم است که ضرایب ژنتیکی ارقام مورد ارزیابی در محل آزمایش تحت شرایط مطلوب رشد (عدم وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) تعیین شوند (۱۳). ضرایب ژنتیکی رشد و نمو گیاه را در شرایط آب و هوایی متفاوت تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (۱۱). ضرایب ژنتیکی مورد نیاز مدل CERES-Maize شامل P1، فاصله بین ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد، P2، میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب، P5، فاصله بین شروع گلدهی (ظهور ابریشم) تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد یا طول دوره پر شدن دانه، G2، حداکثر تعداد دانه تولید شده در بوته، G3، سرعت پر شدن دانه در مرحله پر شدن خطی دانه تحت شرایط مطلوب رشد و PHINT، فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی (فیلوکرون) است (۹ و ۱۱). برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT استفاده شد. روش کار به این صورت بود که ابتدا واریته GF0301 (با توجه به نزدیک بودن ویژگی‌های رشد و نمو آن به واریته‌های مورد ارزیابی) از فایل ضرایب ژنتیکی (MZCER045.CUL) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT به‌عنوان پیش فرض انتخاب شد. برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل CERES-Maize براساس شرایط آب و هوایی و خاکشناسی و همچنین مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای هر یک از واریته‌های مورد ارزیابی بطور جداگانه تخمین می‌زند. در این مرحله ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آنها تعیین و بطور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. اطلاعات لازم برای محاسبه ضرایب ژنتیکی شامل طول دوره نموی از سبز شدن تا گلدهی و طول دوره نموی از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، روند تغییرات شاخص سطح برگ، حداکثر شاخص سطح برگ، روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل و روند تغییرات عملکرد دانه ذرت بود که از تیمار ۳۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (شرایط مطلوب) استخراج شد.

اعتبارسنجی مدل

اطلاعات مراحل نمو فنولوژیک، روند شاخص سطح برگ، روند

عملکرد ماده خشک کل، روند عملکرد دانه و عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت که از سایر تیمارهای آزمایش که به منظور استخراج پارامترها و واسنجی مدل از آنها استفاده نشده بود، استخراج گردید و برای تعیین اعتبار مدل CERES-Maize استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این بررسی نیز شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود که از طریق روابط (۱ تا ۳) محاسبه شد (۲۸):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (۲)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۳)$$

در این معادلات S_i، مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i، مقادیر مشاهده شده، n، تعداد مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و$\bar{O}$، میانگین مقادیر مشاهده شده است. جذر میانگین مربعات خطا نشان دهنده میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (۲۵). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نشان دهنده نیز درصد نسبی میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقادیر صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب بیانگر دقت عالی، خوب و متوسط شبیه‌سازی‌ها است و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد نیز نشان دهنده عدم دقت شبیه‌سازی‌های مدل است (۲۷). مقادیر شاخص آماری توافق ویلموت بین صفر تا یک است که مقادیر d ≥۰/۹، بیانگر توافق عالی، ۰/۸< d≤ ۰/۹، بیانگر توافق خوب، ۰/۷< d≤ ۰/۸، بیانگر توافق متوسط و ۰/۷> d، بیانگر توافق ضعیف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (۱۲).

ضرایب ژنتیکی ذرت

مدل CERES-Maize دارای شش ضریب ژنتیکی است که رشد و نمو ذرت را تشریح می‌کند (جدول ۲). در این بررسی ضریب P1 که نشان دهنده فاصله بین ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد است، برای رقم SC-۷۰۴، ۲۷۵ درجه روز رشد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۲۸۶ درجه روز رشد بدست آمد. مقدار ضریب P2 که بیانگر میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب است، برای رقم SC-۷۰۴، ۱/۸۰ در هر ساعت و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۰/۵۷۶ در هر ساعت محاسبه شد. ضریب P5 که فاصله بین شروع گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت بر اساس درجه روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد یا طول دوره پر شدن دانه را نشان می‌دهد، برای رقم SC-۷۰۴، ۹۱۰ درجه روز رشد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۹۵۰ درجه روز رشد بود. همچنین مقدار ضریب G2 که نشان دهنده حداکثر تعداد دانه تولید شده در بوته است برای ارقام SC-۷۰۴ و BC-۶۷۸، ۷۵۰ دانه در بوته و برای رقم سیمون، ۸۵۰ دانه در بوته بدست آمد. مقدار ضریب G3 که سرعت پر شدن دانه در مرحله پر شدن خطی دانه تحت شرایط مطلوب رشد را نشان می‌دهد، برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۷/۵، ۷/۰ و ۷/۹ میلی‌گرم در روز محاسبه شد. همچنین ضریب PHINT (فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی) برای رقم SC-۷۰۴، ۵۱/۹۷ درجه روز رشد در هر ظهور برگ و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۵۱/۷۰ درجه روز رشد در هر ظهور برگ بود. هوگینبوم و همکاران (۹) نیز دامنه ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف ذرت را برای ضرایب P1، P2، P5، G2، G3 و PHINT به ترتیب، ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه روز رشد، ۰/۸ در هر ساعت، ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه روز رشد، ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دانه در بوته، ۶ تا ۱۰ میلی‌گرم در روز و ۳۰ تا ۶۰ درجه روز گزارش کردند.

نتایج و بحث

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی تخمین زده شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT برای هر یک از ارقام ذرت

Table 2- Estimated genetic coefficients using DSSAT GenCal for each maize cultivar

ضرایب ژنتیکی Genetic coefficients	ارقام ذرت CultivarsMaize			
	پیش فرض Default (GF0301)	SC SC-704-۷۰٤	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon
P1 (degree days)	250.0	275.0	286.0	286.0
P2 (days)	0.500	1.800	0.576	0.576
P5 (degree days)	730.0	910.0	950.0	950.0
G2	840.0	750.0	750.0	850.0
G3 (mg day^{-1})	8.19	7.50	7.00	7.90
PHINT (degree days)	38.90	51.97	51.70	51.70

واسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل CERES-Maize برای مراحل نموی ارقام مختلف ذرت در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی برای رقم SC-۷۰۴، یک روز و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، صفر روز بود (جدول ۳). جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی رقم SC-۷۰۴، ۱/۳۷ درصد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، صفر بود.

جدول ۳- مقایسه آماری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت برای واسنجی مدل CERES-Maize

Table 3- Statistical comparison between observed and simulated values for days to anthesis, days to maturity, Leaf area index,total dryweight and grain yield of maize cultivars for CERES-Maize model calibration

ارقام ذرت Maize Cultivars	جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)			جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده Normalized Root Mean Square Error (nRMSE)		
	SCSC--۷۰٤ 704	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon	SCSC--۷۰٤ 704	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon
روز تا گلدهی Anthesis day	1	0	0	1.37	0.00	0.00
روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Maturity day	2	1	1	1.59	0.85	0.85
شاخص سطح برگ Leaf area index	0.56	0.58	0.42	18.95	22.04	15.12
وزن خشک کل Total dry weight (kg ha^{-1})	518.22	513.80	546.65	5.94	5.98	6.43
عملکرد دانه Grain weight (kg ha^{-1})	362.80	111.39	260.42	7.05	2.77	5.29

مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک برای رقم SC-۷۰۴، ۲ روز و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، یک روز بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای مرحله نموی سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک رقم SC-۷۰۴، ۱/۶ درصد و برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون، ۰/۸ درصد بود (جدول ۳). نتایج این بررسی همچنین نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب،۰/۶، ۰/۵ و ۰/۴، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۲/۹، ۲/۶ و ۲/۷ اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برایشاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۲۵/۵، ۲۱/۸ و ۱۶/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۵۱۸/۲، ۵۱۳/۸ و ۵۴۶/۶ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با میانگین اندازه‌گیری شده به ترتیب، ۸۷۳۰/۰، ۸۵۹۶/۱ و ۸۴۹۵/۴ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای وزن خشک کل ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۵/۹، ۵/۹ و ۶/۴ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۳۶۲/۸، ۱۱۱/۴ و ۲۶۰/۴ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با میانگین اندازه‌گیری شده به ترتیب، ۵۱۴۵/۵، ۴۰۱۹/۷ و ۴۹۲۶/۰ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای عملکرد دانه ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب،۷/۱، ۲/۸ و ۵/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳).

همانگونه که نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ویژگی‌های شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده برای تیمار ۳۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب نیاز غذایی ذرت به کود نیتروژن) نشان داد، مدل CERES-Maize توانست با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت پیش‌بینی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام مورد بررسی بود. همچنین مقایسه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده و r^2 در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده دقت بسیار بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT بود (۱۸، ۲۲ و ۲۳).

اعتبارسنجی مدل

مراحل نموی

هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها تغییرات نیتروژن خاک اثری بر طول دوره نمو فنولوژیک ارقام ذرت نداشت. با

این وجود ارقام ذرت از نظر مراحل فنولوژیک با یکدیگر تفاوت داشتند. در شرایط مزرعه زمان رسیدن از مرحله سبز شدن تا گلدهی و از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک رقم SC-۷۰۴ به ترتیب،۷۳ و ۵۳ روز بود، در حالی‌که نتایج شبیه‌سازی‌ها طول مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک را به ترتیب ۷۴ و ۵۴ روز نشان داد. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای مراحل نموی سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، یک روز بود. همچنین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رقم SC-۷۰۴ به ترتیب، ۱۲۶ و ۱۲۸ روز بود. نتایج حاصل از ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک رقم SC-۷۰۴ نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب، ۱ و ۲ روز و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز به ترتیب، ۱/۴ و ۱/۶ درصد بود (جدول ۴).

جدول ٤- مقایسه آماری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت برای ارزیابی مدل CERES-Maize

Table 4- Statistical comparison between observed and simulated values for days to anthesis, days to maturity, leaf area index, total dry weight and grain yield of maize cultivars for CERES-Maize model validation

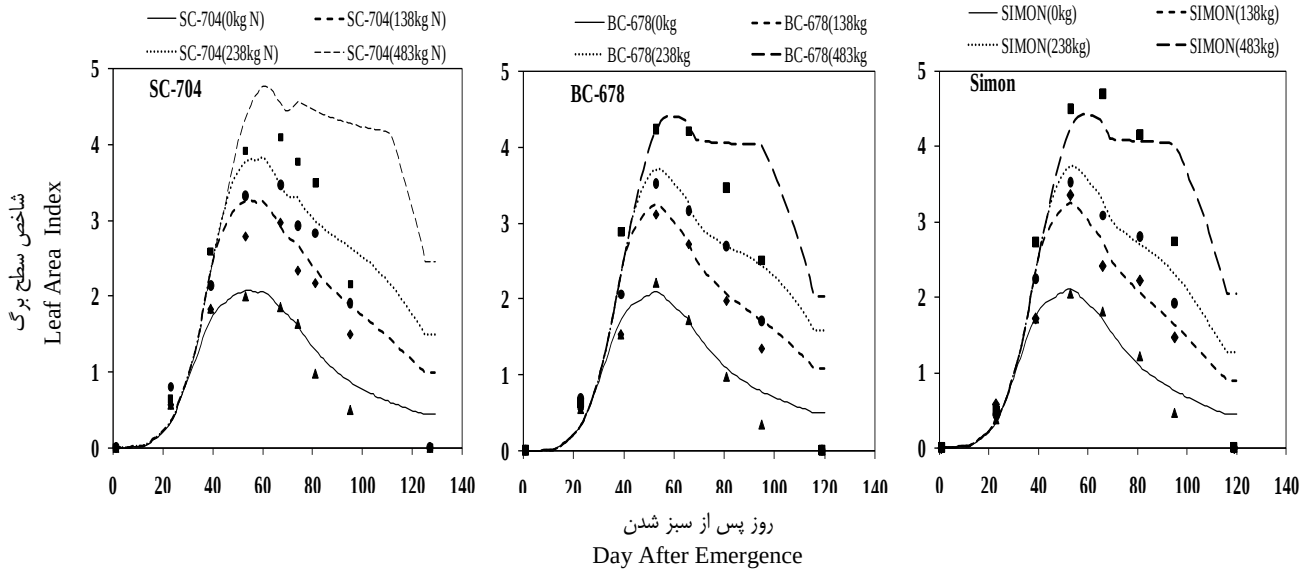
ارقام ذرت Maize Cultivars	جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)			جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده Normalized Root Mean Square Error (nRMSE)			ضریب توافق (d) Index of agreement (d)		
	SC-۷۰٤ SC-704	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon	SC-۷۰٤ SC-704	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon	SC -۷۰٤ SC-704	BC-٦٧٨ BC-678	سیمون Simon
روز تا گلدهی Anthesis day	1	0	0	1.37	0.00	0.00	0.99	1.00	1.00
روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Maturity day	2	1	1	1.59	0.85	0.85	0.99	0.99	0.99
شاخص سطح برگ Leaf area index	0.56	0.46	0.36	25.49	21.84	16.32	0.94	0.96	0.98
وزن خشک کل Total dry weight (kg ha^{-1})	440.05	569.57	419.75	6.25	8.18	5.82	0.95	0.94	0.95
عملکرد دانه Grain weight (kg ha^{-1})	163.68	345.19	314.36	4.30	11.36	8.11	0.98	0.93	0.94

همچنین ضریب توافق (d) برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیک ۰/۹۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک ذرت رقم SC-۷۰۴ داشت (جدول ۴). نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که مرحله سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده برای ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶۵ و ۵۳ روز بود. طول مرحله نموی شبیه‌سازی شده سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز به ترتیب ۶۵ و ۵۴ روز بود. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای طول مراحل سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب صفر و یک روز بود. طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده ارقام BC-۶۷۸ و سیمون نیز به ترتیب، ۱۱۸ و ۱۱۹ روز بود. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، صفر و یک روز و جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز به ترتیب، صفر و ۰/۸درصد بود (جدول ۴). همچنین ضریب توافق (d) برای مرحله نموی سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک نیز به ترتیب، ۱ و ۰/۹۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک ذرت ارقام BC-۶۷۸ و سیمون داشت (جدول ۴). در مدل‌های رشد گیاهان زراعی دقت شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک گیاه از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا تمام فرآیندهای تولید مواد فتوسنتزی و تخصیص آنها بین اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین سایر

فرآیندهای رشدی گیاه تابعی از مراحل نموی است. یانگ و همکاران (۲۶) مقدار جذر میانگین مربعات خطای طول دور نموی سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده ارقام ذرت توسط مدل CERES-Maize در کارولینای شمالی را به ترتیب از ۱/۱ تا ۳/۵ روز و ۱/۳ تا ۳/۵ روز گزارش کردند. وایت (۲۴) نیز نشان داد که مدل CERES-Maize دقت خوبی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک داشت. بنایان و همکاران (۳) شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گندم زمستانه امریکا را با مدل CERES-Wheat انجام دادند و به جذر میانگین مربعات خطا ۷ روز برای تاریخ گرده افشانی و ۱۰ روز برای رسیدگی برداشت دست یافتند.

شاخص سطح برگ

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با پیشرفت مراحل نموی، صرف‌نظر از تیمارهای کود نیتروژن، شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت تا حدود ۳۰ روز پس از سبز شدن از رشد کمی برخوردار بود اما از این مرحله به بعد همراه با افزایش درجه حرارت روزانه، رشد شاخص سطح برگ به تدریج افزایش یافت و در حدود ۶۰ روز پس از سبز شدن (مرحله ظهور گل تاجی) به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۱). شاخص سطح برگ بعد از مرحله گلدهی به علت پیری و ریزش برگ‌ها به تدریج کاهش یافت و در نهایت برای رقم SC-۷۰۴ و ارقام BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب در ۱۲۸ و ۱۱۹ روز پس از سبز شدن به انتهای رشد خود رسید (شکل ۱). مقایسه نتایج مزرعه نیز نشان داد که شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت به جز در مراحل انتهایی رشد گیاه، روند تقریباً مشابهی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده داشت (شکل ۱).



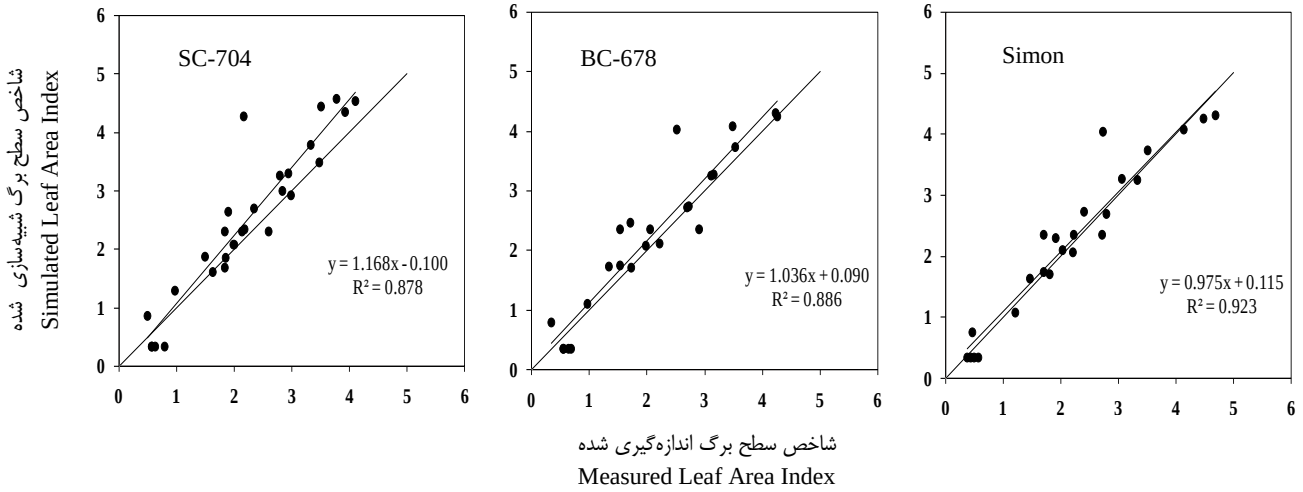
شکل ۱- اثر کاربرد کود نیتروژن بر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت

Figure 1- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars leaf area index

لازم به ذکر است که هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها، روز تا رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ ارقام ذرت تحت تأثیر نیتروژن قرار گرفت، به گونه‌ای که با افزایش میزان کاربرد کود اوره حداکثر شاخص سطح برگ دیرتر حادث گردید. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش میزان کاربرد نیتروژن، حداکثر میزان شاخص سطح برگ ارقام ذرت در تیمارهای ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم اوره در هکتار نسبت به شرایط عدم مصرف کود به تدریج افزایش یافت که با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه همخوانی زیادی داشت. به نظر می‌رسد نیتروژن از طریق اثر بر افزایش و سرعت تقسیم و بزرگ شدن سلول‌های برگ منجر به افزایش شاخص سطح برگ ذرت شد. علاوه‌بر این، افزایش میزان کاربرد نیتروژن می‌تواند از طریق تغییر زاویه برگ‌ها نسبت به ساقه، دوام سطح برگ و تولید برگ‌های بزرگتر باعث بهبود شاخص سطح برگ شود.

میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) شاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۶، ۰/۶و ۰/۴، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۲/۲، ۲/۱ و ۲/۲ مشاهده‌ها بود (جدول ۴). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE)

نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۲۵/۵، ۲۱/۸ و ۱۶/۳ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۳). ضریب توافق (d) برای شاخص سطح برگ ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ بود که حاکی از دقت بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت (جدول ۴). علاوه‌بر 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 CERES-Maize قادر بود تا بیش از ۹۲ درصد از تغییرات شاخص سطح برگ مشاهده شده را پیش‌بینی کند (شکل ۲).



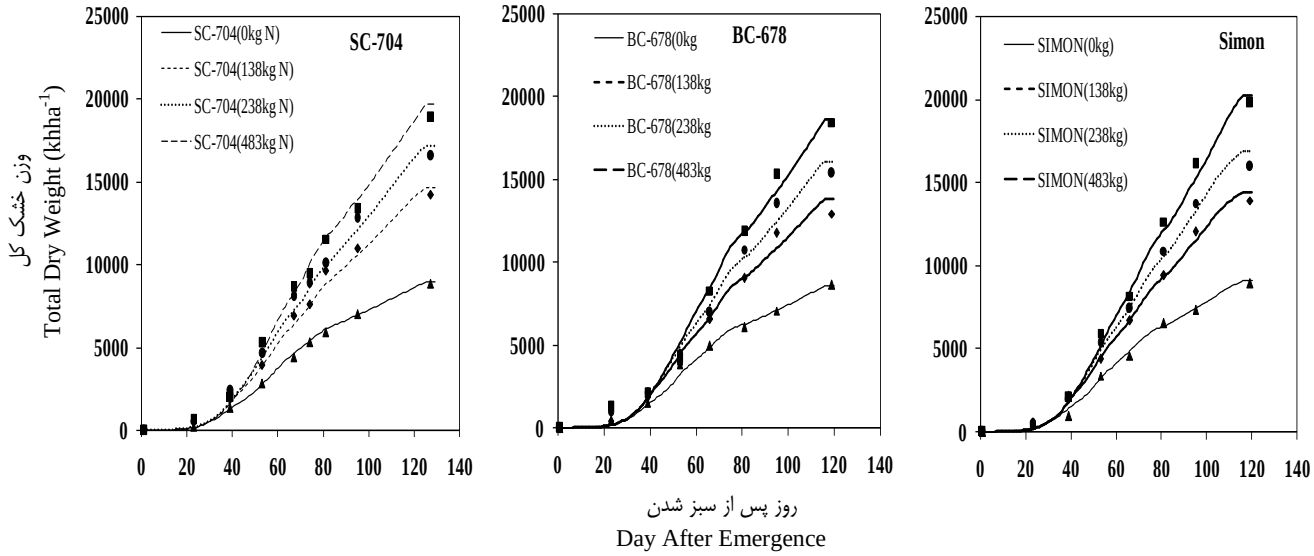
شکل ۲- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 2- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars leaf area index in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

همانطور که نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ارقام ذرت تحت شرایط تیمارهای نیتروژن نشان داد، مدل در اکثر تیمارهای مورد بررسی میزان شاخص سطح برگ را در مراحل بعد از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بیشتر از داده‌های مزرعه تخمین زد (شکل ۱) که این موضوع باعث افزایش مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده به ویژه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و در نتیجه کاهش نسبی دقت پیش‌بینی‌ها گردید. اما بطور کلی برآیند نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد که مدل CERES-Maize از دقت نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن برخوردار بود. چیسانگا و همکاران (۵) مقادیر جذر میانگین خطا و ضریب توافق (d) در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Maize را به ترتیب، ۱/۳۴ و ۰/۵۴ نشان دادند. نونا و همکاران (۱۶) نیز گزارش کردند مدل CERES-Maize از دقت پایینی در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت برخوردار بود. نامبردگان مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده را از ۲۶/۱۴ تا ۴۰/۵۷ درصد گزارش کردند.

عملکرد وزن خشک کل

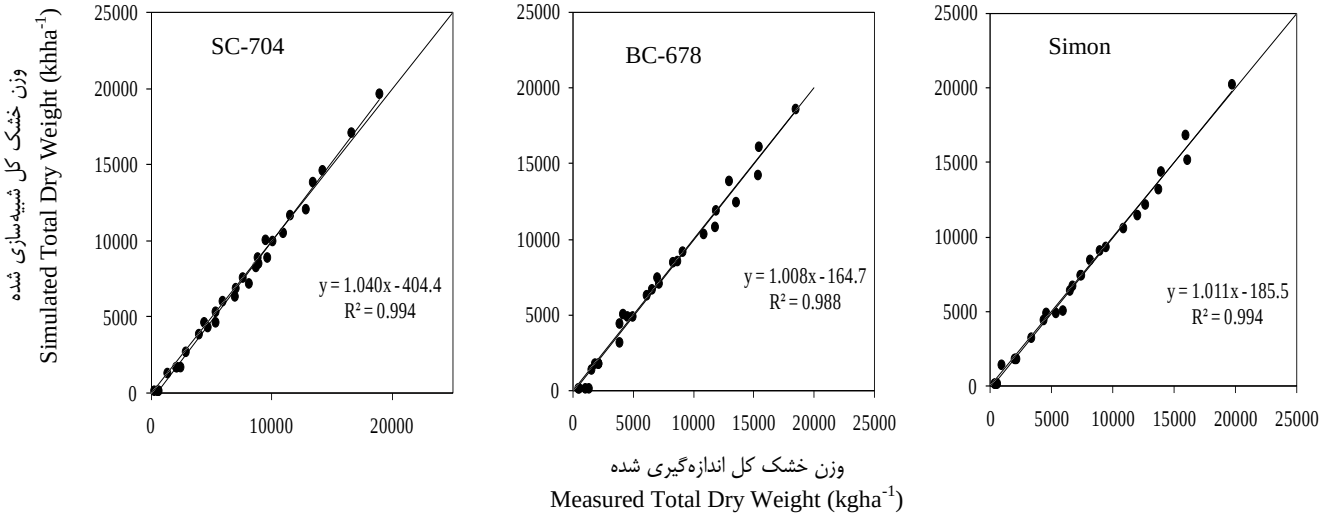
در ابتدای دوره رشد وزن خشک کل شبیه‌سازی شده ارقام ذرت صرف‌نظر از کاربرد کود نیتروژن به علت کوچک بودن بوته‌ها تا حدود ۴۰ روز پس از سبز شدن از روند رشد کندی برخوردار بود اما پس از آن به سرعت افزایش یافت و در انتهای دوره رشد گیاه به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۳). در شرایط مزرعه نیز وزن خشک کل از روند مشابهی نسبت به شبیه‌سازی‌ها برخوردار بود. هم در شرایط شبیه‌سازی و هم در شرایط مزرعه با افزایش میزان کاربرد کود اوره از صفر به ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم در هکتار، وزن خشک کل ذرت نیز به تدریج افزایش یافت. بیشترین وزن خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمار کاربرد ۴۸۳ کیلوگرم اروه در هکتار بدست آمد که به ترتیب برای رقم SC-۷۰۴، ۱۸۹۲۰ و ۱۹۶۶۲ کیلوگرم در هکتار، رقم BC-۶۷۸، ۱۸۴۷۰ و ۱۸۶۰۹ کیلوگرم در هکتار و رقم سیمون، ۱۹۷۵۰ و ۲۰۲۳۷ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۳).



شکل ۳- اثر کاربرد کود نیتروژن بر وزن خشک کل اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت

Figure 3- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars total dry weight

تولید ماده خشک، انعکاسی از فتوسنتز خالص گیاه است که می‌تواند تعیین کننده عملکرد گیاه باشد. عدم دسترسی به نیتروژن کافی در مراحل حساس رشد، به دلیل رشد کمتر اندام هوایی منجر به تولید ماده فتوسنتزی کمتر و تجمع وزن خشک اندک گردید. با توجه به این که عوامل مؤثر بر رشد و تولیدات گیاه، میزان جذب نور توسط برگ‌ها و تبدیل آنها به ترکیبات فتوسنتزی است، افزایش مصرف نیتروژن باعث افزایش سرعت گسترش برگ‌ها، دوام سطح برگ و افزایش میزان جذب تشعشع شد که در نهایت منجر به افزایش تولید ماده خشک کل گردید (۸).



شکل ٤- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وزن خشک کل ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

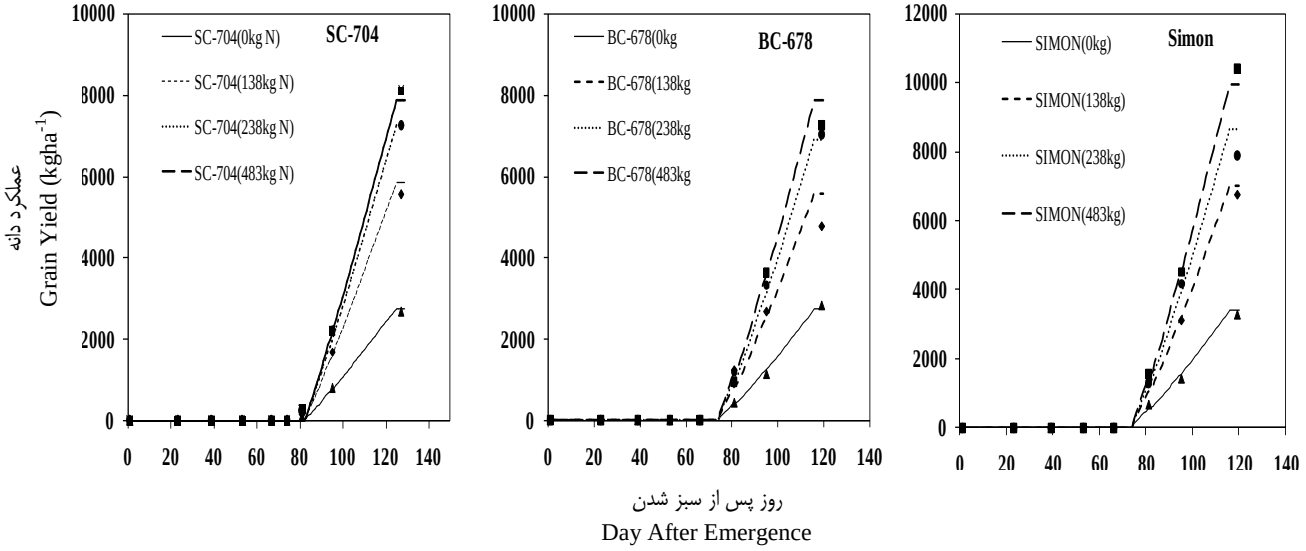
Figure 4- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars total dry weight in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

در تمام تیمارهای مورد بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده شده اختلاف بسیار ناچیزی داشت، بطوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) وزن خشک کل برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴۴۰/۰۵، ۵۶۹/۵۷ و ۴۱۹/۷۵، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۷۰۴۱/۹۷، ۶۹۶۴/۲۱ و ۷۲۱۳/۱۱ کیلوگرم در هکتار مشاهده‌ها بود (جدول ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۶/۲۵، ۸/۱۸ و ۵/۸۲ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۴). همچنین ضریب توافق (d) برای وزن خشک کل ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۰/۹۵، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی وزن خشک کل در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۳). همچنین 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 CERES-Maize توانست تا بیش از ۹۹ درصد از تغییرات وزن خشک کل مشاهده شده را پیش‌بینی کرده و دقت بسیار بالایی برای پیش‌بینی وزن خشک کل ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۴).

در مطالعات دیگر میزان جذر میانگین مربعات خطا، ضریب توافق (d) و r^2 برای شبیه‌سازی وزن خشک کل ذرت علوفه‌ای رقم SC-۷۰۴ توسط مدل CERES-Maize به ترتیب از ۹ تا ۱۳۸۳ کیلوگرم در هکتار، ۰/۹۳ تا ۰/۹۷ و ۰/۸۶ تا ۰/۹۹ گزارش شده است (۱۸). فرید و همکاران (۷) نیز میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل شبیه‌سازی شده گندم تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Wheat را ۳۴۷/۸۱ تا ۸۷۳/۶۵ کیلوگرم در هکتار گزارش کرد. در تحقیقی دیگر جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده وزن خشک کل شبیه‌سازی شده برنج تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Rice به ترتیب ۸۶۲ کیلوگرم در هکتار و ۱۰ درصد گزارش شده است (۲).

عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که از شروع مرحله گلدهی ذرت (به ترتیب حدود ۷۴ و ۶۵ روز پس از سبز شدن برای رقم SC-۷۰۴ و ارقام BC-۶۷۸ و سیمون)، عملکرد دانه صرف‌نظر از میزان کاربرد کود نیتروژن به سرعت افزایش یافت و در انتهای دوره رشد (مرحله رسیدگی فیزیولوژیک) به حداکثر میزان خود رسید (شکل ۵). با افزایش میزان کاربرد کود اوره در تیمارهای ۱۳۸، ۲۳۸ و ۴۸۳ کیلوگرم در هکتار نسبت به شرایط عدم مصرف کود، عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت نیز به تدریج بهبود یافت که با نتایج اندازه‌گیری شده در مزرعه همخوانی بالای داشت (شکل ۵).

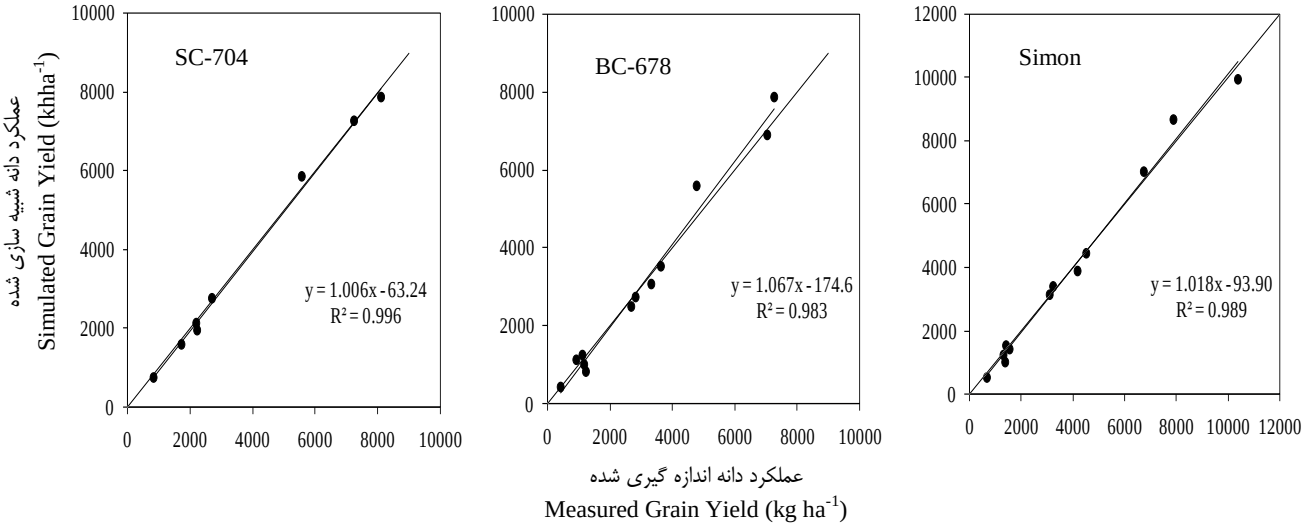


شکل ۵- اثر کاربرد کود نیتروژن بر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خطوط) ارقام ذرت

Figure 5- Effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of maize cultivars grain yield

بیشترین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمار کاربرد ۴۸۳ کیلوگرم اروه در هکتار بدست آمد که به ترتیب برای رقم SC-۷۰۴، ۸۱۰۲ و ۷۸۷۲ کیلوگرم در هکتار، رقم BC-۶۷۸، ۷۲۵۰ و ۷۸۷۵ کیلوگرم در هکتار و رقم سیمون، ۱۰۴۰۷ و ۹۹۲۵ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۵). به نظر می‌رسد مصرف نیتروژن از طریق بهبود ویژگی‌هایی نظیر شاخص سطح برگ، جذب تشعشع و سرعت رشد محصول باعث افزایش میزان تجمع ماده خشک کل و همچنین تخصیص مواد فتوسنتزی بیشتر به سمت اندام‌های ذخیره‌ای گیاه شد که این موضوع سبب بهبود عملکرد دانه ذرت شد (۱). رقم سیمون در شرایط شبیه‌سازی و مزرعه نسبت به دو رقم دیگر از عملکرد دانه بیشتری برخوردار بود که امکان دارد به‌علت مقاومت به خوابیدگی بوته، تحمل نسبتاً مناسب به تنش‌های محیطی به ویژه شوری و خشکی انتهای فصل، مقاوم به بیماری سیاهک و سازگاری بهتر با شرایط آب و هوایی استان کرمانشاه باشد (۶).

نتایج این بررسی همچنین نشان داد که بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه اختلاف بسیار ناچیزی وجود داشت، بطوری‌که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) عملکرد دانه برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۱۶۳/۷، ۳۴۵/۲ و ۳۱۴/۴، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۳۸۰۹/۲، ۳۰۳۸/۲ و ۳۸۷۵/۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده‌ها بود (جدول ۳). میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) نیز برای ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون به ترتیب، ۴/۳، ۱۱/۴ و ۸/۱ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (جدول ۴). ضریب توافق (d) برای عملکرد دانه ارقام SC-۷۰۴، BC-۶۷۸ و سیمون نیزبه ترتیب، ۰/۹۸، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ بود که نشان دهنده توانایی بسیار بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۴). همچنین 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 CERES-Maize توانست تا بیش از ۹۹ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کرده و توانایی بالایی برای پیش‌بینی عملکرد دانه ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۶). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب توافق (d) برای پیش-بینی عملکرد دانه ذرت توسط مدل CERES-Maize به ترتیب، ۱۹ درصد و ۰/۹۱ گزارش شده است (۲۲). محققین دیگر نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطا را در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت به‌وسیله مدل CERES-Maize را از ۷/۳ تا ۲۱/۴ درصد نشان دادند (۷، ۱۷ و ۲۳).



شکل ٦- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 6- The regression analysis between the simulated and the measured maize cultivars grain yield in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این بررسی نشان داد که بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴/۶ به خوبی توانست ضرایب ژنتیکی مورد نظر برای ارقام مورد مطالعه را تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه محاسبه نمایید. به گونه‌ای که نتایج واسنجی این ضرایب برای صفات شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمار شرایط مطلوب نیاز غذایی ذرت به کود

نیتروژن نشان داد، مدل CERES-Maize قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت پیش‌بینی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام مورد بررسی بود. هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها با افزایش میزان کود نیتروژن شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه بهبود یافت. اگرچه طول دوره نموی ارقام مورد ارزیابی با یکدیگر متفاوت بود ولی تغییرات نیتروژن تأثیری بر این صفت نداشت. رقم سیمون در مقایسه با دیگر ارقام از عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (۹۹۲۵ کیلوگرم در هکتار) و اندزه‌گیری شده (۱۰۴۰۷ کیلوگرم در هکتار) بالاتری برخوردار بود. نتایج تعیین اعتبار نیز نشان داد مدل CERES-Maize دقت بالایی برای پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد دانه ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت. بررسی شاخص‌های ارزیابی بیانگر این مطلب بود که مدل CERES-Maize دقت نسبتاً پایینی در شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ به ویژه در مراحل انتهایی رشد ذرت داشت. در اکثر تیمارها روند تغییرات شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده از مرحله گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک بالاتر از مشاهده شده بود. با این حال مدل CERES-Maize توانست با دقت بسیار بالایی تغییرات عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام ذرت را در تیمارهای کود نیتروژن به خوبی شبیه‌سازی کند که این نتیجه نشان می‌دهد که با اطمینان بالایی می‌توان از رهیافت‌های علم مدل‌سازی در کاهش وقت و هزینه‌های تحقیقات کشاورزی و همچنین تصمیم‌گیری‌های صحیح مدیریت زارعی استفاده کرد.

منابع

1- Abdian A., Rahimzade Khoei F., Anvari Savojbolagh K., and Rahimzada S. 2010. Evaluation of yield and yield components of early maturing maize in the second cropping. 11th Agronomy and Crop Breeding Congress. Tehran's Shahid Beheshti University, Iran. (in Persian with English abstract).

2- Amiri E., Rezaei M., Bannayan M., and Soufizadeh S. 2013. Calibration and Evaluation of CERES Rice Model under Different Nitrogen- and Water-Management Options in Semi-Mediterranean Climate Condition. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 44: 1814-1830.

3- Bannayan M., Crout N.M.J., and Hoogenboom G. 2003. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in theUnited Kingdom. Agronomy Journal, 95:114-125.

4- Cassman K.G., Dobermann A., Walters D.T., and Yang H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annual Review of Environment and Resources, 28: 315-358.

5- Chisanga C.B., Phiri E., Shepande C., and Sichingabula H. 2015. Evaluating CERES-Maize Model Using Planting Dates and Nitrogen Fertilizer in Zambia. Journal of Agricultural Science, 7: 79-97.

6- Dehghanpoor Z. 2014. Technical instructions planting and harvesting of corn (grain and forage). Agricultural Training Press.

7- FaridH.U., Bakhsh A., Mahmood-Khan Z., Ahmad N., and Ahmad A. 2015. Calibration and Validation of CERES-Wheat (*Triticum aestivum*) Model for Simulating Fertilizer Application Rates in Management Zones. Journal of Agricultural Science, 7: 115-127.

8- Gulser F. 2005. Effect of ammonium sulphate and urea on NO_3 and NO_2 accumulation nutrient contents and yield criteria in spinach. Scientia Horticulture, 106: 330-340.

9- Hoogenboom G., Jones J.W.P., Wilkens W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.I., White J.W., Uryasev O., Ogoshi R., Koo J., Shelia V., and Tsuji G.Y. 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version4.6 (http://dssat.net). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.

10- Jones C.A., and Kiniry J.R. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development Texas A&M University Press, College Station, TX, USA.

11- 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. DSSAT Cropping System Model. European Journal of Agronomy, 18: 235-265.

12- Liu S., Yang J.Y., Zhang X.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., and Hoogenboom G. 2013. Modelling crop yield, soilwater content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China.Agricultural Water Management, 123: 32-44.

13- Liu H.L., Yang J.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., and Bai Y.L., et al., 2011. Usingthe DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling infields under long-term continuous maize production. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 89: 313-328.

14- Lopez-Cedron F.X., Boote K.J., Piñeiro J., and Sau F. 2008. Improving the CERES-Maize modelability to simulate water deficit impact on maizeproduction and yield components. Agronomy Journal, 100: 296-307.

15- Mahru A.H., Soltani A., Galeshi S., and Kalate-Arabi M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province.Elecronic Journal of Crop Production, 3: 229-253. (in Persian with English abstract).

16- Nouna B.B., Katerji N., and Mastrorilli M. 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean

environment: New modeling of leaf area and water stress functions. European Journal of Agronomy, 19: 115-123.
17- Nouna B.B., Katerji N., and Mastrorilli M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. European Journal of Agronomy, 13: 309-322.
18- Rabie M., Mirlatifi S.M., and Gheysari M. 2012. Calibration and Evaluation of the CSM-CERES-MAIZE Model for Maize Hybrid 704 Single-Cross in Varamin. Journal of Water and Soil, 26: 290-299. (in Persian with English abstract).
19- Ritchie J.T., Singh U., Godwin D.C., and Bowen W.T. 1998. Cereal growth, development, and yield.p. 79-98. InTsuji G.Y. et al. (ed.). Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, The Netherlands.
20- Soltani A., Robertson M.J., Mohammad-Nejad Y., and Rahemi-Karizaki A.2006. Modeling chickpea growth and development: leaf production andsenescence. Field Crop Research, 99: 14-23.
21- Soltani A., and Hoogenboom G. 2007. Assessing crop management options with cropsimulation models based on generated weather data. Field Crop Research, 103: 198-207.
22- Ting L.Z., Yang J.Y., Drury C.F., and Hoogenboom G. 2015. Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. Agricultural Systems, 135: 90-104.
23- Tojo Soler C.M., 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. European Journal of Agronomy, 27: 165-177.
24- White J.W. 2003. Modeling Temperature Response in Wheat and Maize: Proceedings of aWorkshop, CIMMYT, El Batán, Mexico, 23-25 April 2001. NRG-GIS Series 03-01. México, D.F.: CIMMYT.
25- Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society, 63: 1309-1313.
26- Yang Z., Wilarkson G.G., Buol G.S., Bowman D.T., and Heiniger R.W. 2009. Estimating Genetic Coefficients for the CSM-CERES-Maize model in North Carolina environments. Agronomy Journal, 101: 1276-1285.
27- Yang J.M., Yang J.Y., Dou S., Yang X.M., and Hoogenboom G. 2013. Simulating the effect of long-term fertilization on maize yield and soil C/N dynamics in northeastern China using DSSAT and CENTURY-based soil model. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 95: 287-303.
28- Yang J.M., Yang J.Y., Liu S., and Hoogenboom G. 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. Agricultural Systems, 127: 81-89.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1665-1678

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۷۸-۱۶۶۵

Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea maize*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition

F. Mondani[1]*

Received: 26-02-2017
Accepted: 18-12-2017

Introduction: The DSSAT consists of a series of popular and widely used process-based crop growth simulation models. The models have been used worldwide to simulate crop biomass and yield, and soil nitrogen leaching under different management practices and various climatic conditions. The DSSAT has also proven to be a useful tool for selecting improved agricultural practices. Among all management agronomic factors, nitrogen fertilizer and crop species are major effective aspects impacting crops production. Although limited use of nitrogen fertilizer seems likely to reduce crop yield, high application rates of nitrogen causes serious adverse environmental effects. Thus, management of nitrogen fertilizer consumption decreases production costs and environmental pollution in agroecosystems. Therefore, the objectives of the present study were: (1) to determine the genetic coefficients and calibrate the CERES-Maize model (2) to evaluate the performances of the CERES-Maize model in simulating maize cultivars growth, development and grain yield for different fertilizer nitrogen application rates under Kermanshah climate condition.

Materials and Methods: This experiment was carried out in a split-plot design with 5 levels of nitrogen fertilizer application (0, 138, 238, 350 and 483 kg ha^{-1} urea) as main plots, 3 current maize cultivars SC-704, BC-678 and Simon as sub plots, and 4 replications in 2014. The required model inputs describe field management, daily weather condition, soil profile characteristics, and cultivar characteristics. The cultivar coefficients were obtained under optimum conditions (i.e., minimum stress in weather and nutrients). The genetic coefficients (P1, P2, P5, G2, G3 and PHINT) of the maize cultivars i.e. SC-704, BC-78 and Simon were determined using the GenCal software of DSSAT v 4.6 for 350 kg Urea ha^{-1} treatment (optimum nitrogen fertilizer amount based on the results of soil library). Model performance was evaluated by comparing simulated and measured values of maize cultivars phonological development stages (DVS), leaf area index, total dry weight and grain yield for independent nitrogen fertilizer treatment (0, 138, 238 and 483 kg Urea ha^{-1}) by root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE) and index of agreement (d).

Results and Discussion: The coefficients of P1, P2, P5, G2, G3 and PHINT ranged between 275 to 286 °C day, 0.576 to 1.80 days hr^{-1}, 910 to 950 °C day, 940 to 990 number per plant, 7.0 to 7.9 mg day^{-1} and 51.70 to 51.97 °C day , respectively, for all cultivars. The CERES-Maize model was able to accurately simulate growth, development stages and yield for maize cultivars. For both simulated and measured conditions, leaf area index, total dry weight and grain yield were improved by increasing the application of nitrogen fertilizer. Simon cultivar had higher simulated (9925 $kg.ha^{-1}$) and measured (10467 $kg.ha^{-1}$) grain yield in respect to other cultivars. The validation results also indicated that the CERES-Maize model gave a reliable estimate of growth, development stages and grain yield for maize cultivars in the different fertilizer nitrogen application rates. The value of RMSE and nRMSE for leaf area index of SC-704, BC-78 and Simon cultivars were 0.56, 0.46 and 0.36 and 25.5%, 21.8% and 16.3%, respectively. The index of agreement (d) for leaf area index ranged from 0.94 to 0.98. The RMSE and nRMSE magnitudes for total dry weight of SC-704, BC-78 and Simon cultivars were 440.1, 569.6 and 419.7 and 6.2%, 8.2% and 5.8%, respectively. The index of agreement (d) for total dry weight ranged from 0.94 to 0.95. The RMSE and nRMSE values for SC-704, BC-78 and Simon grain yield were equal to 163.7, 345.2 and 314.4 and 4.3%, 11.4% and 8.1%, respectively. The index of agreement (d) for grain yield ranged from 0.93 to 0.98.

Conclusion: The results indicated that the CERES-Maize was parameterized reliably for three maize cultivars under Kermanshah climate conditions. The results of validation also showed that the CERES-Maize model was able to give an accurate simulation of all studied traits of maize cultivars except leaf area index in different fertilizer nitrogen application rates**.**

Keywords: Development stages, Grain yield, Model calibration, Model validation, Total dry weight

1- Assistant Professor in Crop Ecology, Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: farzad_mondani@yahoo.com)