



تحقیقات غلات

دوره هشتم / شماره دوم / تابستان ۱۳۹۷ (۲۵۰-۲۳۹)

شبیه‌سازی مراحل رشد و نمو لاین اینبرد B73 ذرت با استفاده از مدل DSSAT-CSM-CERES-Maize

محمد رحمانی^۱، محسن زواره^{۲*}، آیدین حمیدی^۳، گریت هوگنبوم^۴ و محمد زارع مهرجردی^۵

تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

چکیده

تولید موفق بذر ذرت (*Zea mays* L.) نیازمند هم‌نوایی کامل مراحل نمو لاین‌های اینبرد والدینی با شرایط محیطی است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو می‌توانند با شبیه‌سازی زمان رخداد این مراحل نمو در مدیریت ایجاد این هم‌نوایی نقش کلیدی داشته باشند. به‌منظور ارزیابی توانایی مدل DSSAT-CSM-CERES-Maize در شبیه‌سازی مراحل رشد و نمو لاین اینبرد B73 ذرت، آزمایشی با پنج تاریخ کاشت و چهار تراکم بوته به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ در کرج اجرا شد. در این آزمایش، زمان رسیدن به هر یک از مراحل فنولوژیک لاین اینبرد B73 ذرت به‌عنوان والد مادری هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، شامل سبز گیاهچه (VE)، پیدایش آغازه تاسل (TI)، گل‌دهی یا پیدایش سیلک (R1)، پایان تلقیح (R2) و رسیدگی فیزیولوژیک (R6) اندازه‌گیری و سپس با استفاده از روش برآورد درستمایی غیرقطعی تعمیم‌یافته توسط نرم‌افزار GLUE، ضرایب ژنتیکی مورد استفاده در مدل یعنی P1، P2، P5 و PHINT برای لاین اینبرد B73 تعیین شدند. این مقادیر به‌ترتیب برابر با ۳۰۷، ۰/۳۳، ۹۷۰ و ۷۰ برآورد شدند. بررسی ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (nRMSE) برای اعتبارسنجی مدل برای پنج مرحله رشدی گیاه به‌ترتیب ۷/۸۵۷، ۱۴، ۷/۱۴۱، ۳/۶۰۷ و ۲/۶۸۷ به‌دست آمد که نشان می‌دهد مدل می‌تواند با استفاده از ضرایب جدید، مراحل رشد و نمو لاین اینبرد B73 ذرت را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. در کل، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که مدل CERES-Maize که برای شبیه‌سازی ارقام هیبرید ایجاد شده است، فقط در صورت استفاده از ضرایب ژنتیکی ویژه هر لاین اینبرد می‌تواند برای شبیه‌سازی تولید بذر هیبرید از لاین‌های اینبرد مادری، کارایی و دقت لازم را داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، تراکم بوته، فنولوژی رشد، مدل‌سازی تولید بذر

- ۱- محقق، مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ۲- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
- ۳- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ۴- استاد، انستیتو سیستم‌های پایدار غذا، دانشگاه فلوریدا، فلوریدا، امریکا
- ۵- مربی پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

* نویسنده مسئول: mzavareh@guilan.ac.ir

به یکی از مدل‌های اصلی نرم‌افزار (DSSAT Decision Support System for Agrotechnology Transfer) که یکی از قدرتمندترین بسته‌های نرم‌افزاری مدل‌سازی رشد گیاهان زراعی است، تبدیل شد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این مدل قادر است رشد و نمو فنولوژیک، انباشت زیست‌توده، تسهیم ماده خشک و عملکرد نهایی ذرت هیبرید را به‌طور مناسبی شبیه‌سازی کند (Rasse et al., 2000; Gungula et al., 2003; Saseendran et al., 2005; Soler et al., 2007).

تولید موفق بذر هیبرید ذرت از جمله هیبریدهای ۶۴۷ و ۷۰۴، نیازمند هم‌نوایی کامل شرایط محیطی با مراحل نمو لاین‌های اینبرد والدینی است که تا اندازه‌ای با تنظیم تاریخ کشت به‌دست می‌آید. نبود اطلاعات قابل اعتماد برای تصمیم‌گیری در باره زمان‌بندی کشت و عدم انتخاب زمان درست کشت، سبب شده است تا هر ساله خسارت زیادی به تولیدکنندگان بذر ذرت هیبرید ۷۰۴ وارد شود. در عین حال، انتخاب درست این زمان برای هر منطقه و هر سال زراعی، جدای از آزمایش‌های گران‌قیمت و زمان‌بر، نیازمند مدل‌هایی است که بتوانند با برآورد نسبتاً دقیق زمان وقوع مراحل نمو لاین‌های اینبرد مادری به تولید کنندگان بذر در انتخاب درست تاریخ کشت کمک کنند.

نبود چنین مدل‌هایی در کنار ضرورت روزافزون استفاده از آن‌ها سبب شد که این پژوهش اجرا شود که هدف از آن: بررسی توانایی مدل DSSAT-CSM-CERES-Maize در شبیه‌سازی رشد لاین اینبرد B73 ذرت و ارایه ضرایب ژنتیکی لازم برای پیش‌بینی مراحل انگیزش تاسل، گل‌دهی (پیدایش سیلک) و رسیدگی فیزیولوژیک بود که در تصمیم‌گیری زمان‌بندی تغذیه، کاشت و برداشت بذر مفید است.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل

برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک رشد لاین اینبرد B73 در این پژوهش، از بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴/۶ (Hoogenboom et al., 2015) و یکی از مدل‌های فرایند پایه شبیه‌سازی رشد و نمو ذرت هیبرید موجود در آن بسته، یعنی DSSAT-CSM-CERES-Maize استفاده شد. این مدل قادر به شبیه‌سازی رشد، نمو، انباشت، تخصیص و توزیع زیست‌توده گیاه بر اساس جذب نور و روابط آب و خاک است و می‌تواند برای پیش‌بینی رشد و

لاین اینبرد B73 ذرت (*Zea mays L.*) امیدبخش‌ترین لاین اینبرد ذرت در دنیا (Schnable et al., 2009; Walbot, 2009; Ganai et al., 2011) و لاین مادری دو رقم معروف ذرت سینگل کراس ۷۰۴ و تری‌وی کراس ۶۴۷ در ایران است. از این میان، رقم سینگل کراس ۷۰۴ به‌دلیل سازگاری محیطی بالا و عملکرد مناسب و محبوبیت آن در بین کشاورزان، سالانه در سطح دو تا چهار هزار هکتار از زمین‌های تولید بذر ذرت ایران کشت می‌شود. اهمیت تجاری و سطح کشت زیاد این لاین اینبرد در تأمین بذر باعث می‌شود، مدیریت مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو به تولیدکنندگان بذر کمک بزرگی به تصمیم‌گیری تولید بذر هیبرید از نظر زمان مناسب کشت، پیش‌بینی زمان رسیدگی و نیز مدیریت تغذیه و کنترل آفات و بیماری‌ها کند.

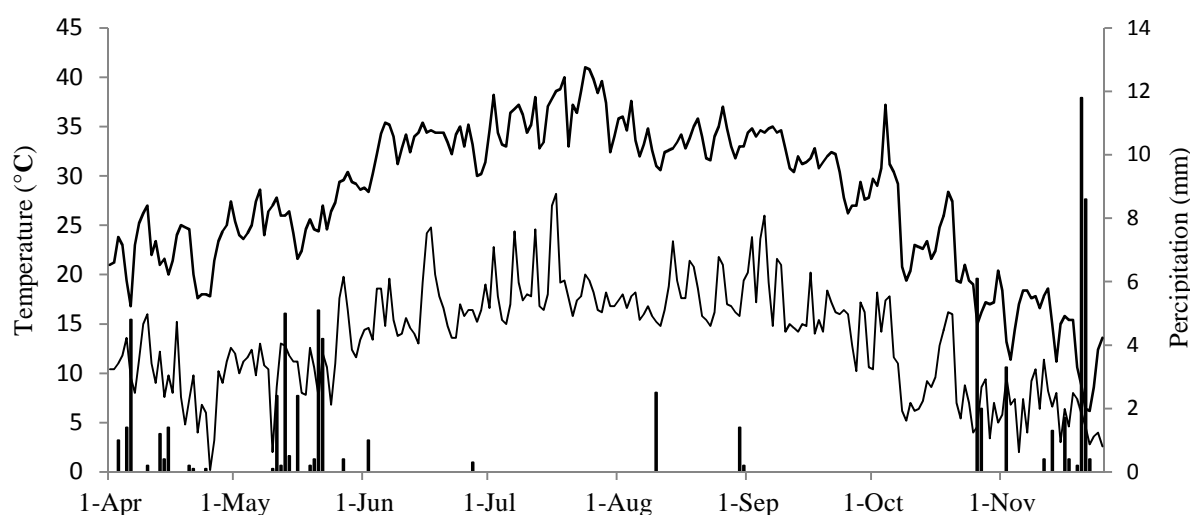
فنولوژی یا تنظیم زمانی مراحل زیستی تکرارشونده یک گونه (Puppi, 2007)، تعیین‌کننده سازگاری رقم یا کلون با منطقه خاص و تقارن مراحل نمو آن با شرایط محیطی مناسب و قابلیت تکمیل رشد، رسیدگی و تولید بذر آن‌ها است (Kumudini et al., 2014). رشد فنولوژیک ذرت شامل پنج مرحله: الف- جوانه‌زنی و سبز گیاهچه (VE)، ب- جوانی (VE-TI)، پ- رشد سریع ساقه (TI-VT)، ت- گل‌دهی یا پیدایش گل‌تاجی، کاکل و گرده‌افشانی (VT-R1) و ث- پر شدن دانه (R2-R6) است (Evans et al., 1994). به‌دلیل وابستگی رشد و نمو گیاهان به دمای دریافتی و طول روز، دقت پیش‌بینی وقوع فرایندهای رشد و نمو با استفاده از مدل‌های گیاهی مبتنی بر توابع دمایی بهتر از زمان تقویمی قابل انجام است (Kumudini et al., 2014). پیش‌بینی وقوع این فرایندها یکی از اهداف مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی و نیز سیستم‌های پشتیبان تصمیم است. مدل‌های گیاهان زراعی علاوه بر پیش‌بینی عملکرد می‌توانند برای ارزیابی تنوع و خطرات ناشی از استراتژی‌های مختلف مدیریتی در شرایط اقلیمی و یا تولید در مناطق متفاوت استفاده شوند (Tsuji et al., 1998).

مدل CERES-Maize از گروه مدل‌های اختصاصی برای شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد ذرت هیبرید است (Dobermann et al., 2003). این مدل نخستین بار توسط جونز و کنری در سال ۱۹۸۶ (Jones and Kiniry, 1986) معرفی شد. طی سال‌ها، این مدل ارتقا پیدا کرد و

جدول ۱- ویژگی لایه‌های خاک مزرعه آزمایشی بر اساس دو عمق ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر.

Table 1. Soil properties of two soil depths (0-30 & 30-60 cm) of the experimental field.

Soil characteristics	Soil depth (cm)	
	0-30	30-60
Sand (%)	34	40
Clay (%)	24	20
Silt (%)	42	40
Bulk density (g/cm ³)	1.1	1.39
PH (In water)	7.8	7.0
EC (ds/m)	2.5	2.6
CEC (Cmol/kg)	9.1	8.4
Organic carbon (%)	1.22	-
Potassium (ppm)	6.46	279.4
Phosphorus (ppm)	20.3	16.2
NO ₃ (mg/kg)	95.8	165.7
Total N (%)	0.12	0.12
Upper limit (cm ³ /cm ³)	0.20	0.29
Lower limit (cm ³ /cm ³)	0.120	0.149



شکل ۱- دمای حداقل و حداکثر روزانه (نمودارهای خطی) و میزان بارش روزانه (نمودار ستونی) در سال ۱۳۹۲ کرج.

Fig1. Daily maximum and minimum temperature (line graphs) and daily precipitation (bar graphs) in 2013 Karaj

تنظیم و ضرایب ژنتیکی P1 (زمان دمایی مورد نیاز از سبز گیاهچه تا پایان دوره جوانی بر اساس تابع حرارتی CERES و دمای پایه ۸ درجه سلسیوس)، P5 (زمان دمایی مورد نیاز از گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک) و PHINT (زمان دمایی بین پیدایش دو برگ متوالی) با استفاده از توابع ریاضی مربوطه و ضریب ژنتیکی P2 (حساسیت به طول روز بین صفر تا ۱) بر اساس تغییر طول روز از حداقل ۱۲/۵ ساعت در تاریخ‌های کشت مختلف با

واسنجی مدل

در مدل‌های گیاهی برای تفکیک آثار اقلیم و شرایط زراعی از بنیه ژنتیکی رقم، مدل بر اساس ضرایب مشخصی واسنجی می‌شود (van Ittersum *et al.*, 2013). به‌منظور واسنجی مدل CSM-CERES-Maize برای شبیه‌سازی رشد و نمو لاین اینبرد B73، فایل‌های ورودی مدل با استفاده از نرم‌افزارهای XBuild، ATCreator و WeatherMan نسخه‌های ۴/۶ به شکل کدهای ASCII

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

در این روابط، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهده شده و \bar{O} میانگین داده‌های مشاهده شده است. در ارزیابی‌ها از مقادیر نزدیک به یک استفاده شد. شکل‌های مقایسه ۱:۱ توسط نرم‌افزار EasyGrapher (نسخه ۴/۶) ترسیم و با استفاده از نرم‌افزار Excel آماده‌سازی شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های زمان رخداد مراحل اصلی رشد و نمو شامل زمان جوانه‌زنی، زمان گل‌دهی و زمان رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ‌های کاشت و تراکم‌های مورد مطالعه نشان داد که تاریخ کاشت بر زمان سبز گیاهچه، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۲). همچنین بین تراکم‌های مختلف از نظر زمان جوانه‌زنی و رسیدگی فیزیولوژیک اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، در مقابل تفاوت معنی‌داری بین تراکم‌های مختلف از نظر زمان گل‌دهی مشاهده شد (جدول ۲). بر اساس نتایج این پژوهش، مدل رشد و نمو لاین اینبرد B73 در تراکم‌های مختلف می‌تواند یکسان باشد. این یافته با فرضیات مدل CSM-CERES-Maize که اثر تراکم بوته بر الگوی رشد و نمو یک رقم را غیرمعنی‌دار می‌داند (Jones and Kiniry, 1986; Bannayan and Hoogenboom, 2009; Hoogenboom *et al.*, 2015)، همخوانی داشت.

نتایج واسنجی مدل

ضرایب ژنتیکی برآورد شده در این تحقیق برای لاین اینبرد B73 در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار $P1$ یا درجه روز-رشد در فاصله جوانه‌زنی تا پایان دوره جوانی برای این لاین در محاسبات ریاضی با استفاده از داده‌های مزرعه برابر با ۳۱۲ تعیین شد. این مقدار با استفاده از برنامه GLUE و به‌روشنی برآورد درستی‌مندی غیرقطعی تعمیم‌یافته بر پایه کم‌ترین مقدار nRMSE مربوطه، ۳۰۷ درجه روز-رشد به‌دست آمد و انتخاب شد. مقدار ضریب $P2$ برای لاین مورد

استفاده از توابع برازش خطی محاسبه شد. به‌منظور بهبود دقت ضرایب محاسبه شده، این ضرایب بر اساس روش برآورد درستی‌مندی غیرقطعی تعمیم‌یافته (Generalized likelihood uncertainty estimation) با کمک نرم‌افزار GLUE نسخه ۴/۶ آزمون و مناسب‌ترین مجموعه ضرایب ژنتیکی با استفاده از ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) (رابطه ۱) مقایسه و انتخاب شد:

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n} \times \frac{100}{M}} \quad (1)$$

که در آن، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهده شده و M میانگین داده‌های مشاهده شده است. این شاخص، تفاوت نسبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را به‌صورت درصد بیان می‌کند. بر این اساس، مقادیر کمتر از ۱۰ درصد به معنی شبیه‌سازی عالی، مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد به معنی شبیه‌سازی خوب یا قابل قبول و مقادیر بیش‌تر از ۳۰ درصد به معنی شبیه‌سازی ضعیف در نظر گرفته شدند. پس از تعیین ضرایب، مراحل رشد و نمو لاین B73 با مدل CMS-CERES-Maize شبیه‌سازی شد.

اعتبارسنجی مدل

صرف‌نظر از این‌که مدل جدید با چه روشی ایجاد شده باشد، یک مدل خوب فقط می‌تواند بخشی از سیستم واقعی را توضیح داده و پیش‌بینی کند. برای قضاوت در باره درستی مدل واسنجی شده، نیاز به انجام ممیزی و اعتبارسنجی مدل است (Popova *et al.*, 2006). به‌عبارت دیگر، باید مشخص شود که آیا مدل فرضیات را به درستی به‌کار گرفته و به‌طور منطقی به سیستم واقعی نسبت داده است یا نه. در صورتی که داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش واقعی با خروجی‌های مدل به اندازه کافی شباهت و نزدیکی داشته باشند، مدل شبیه‌سازی شده اعتبار پیدا می‌کند (Macal, 2005). اعتبارسنجی مدل مهم‌ترین مرحله در فرایند ایجاد یک مدل است (Carson, 2002).

برای اعتبارسنجی مدل واسنجی شده از داده‌های گردآوری شده از مزرعه (Popova *et al.*, 2006) که پیش‌تر در واسنجی مدل استفاده نشده بودند، استفاده شد. مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از سه شاخص nRMSE، شاخص توافق ویلموت (d) (رابطه ۲) و ضریب تبیین (R^2) (رابطه ۳) ارزیابی شدند (Hoogenboom *et al.*, 2015).

nRMSE برای ضرایب برگزیده توسط نرم افزار GLUE برابر با ۲/۸۷ به دست آمد که کمترین میزان به دست آمده در روش برآورد درست‌نمایی غیرقطعی تعمیم یافته مورد استفاده در برآورد محتمل‌ترین ضرایب ژنتیکی (Makowski *et al.*, 2002) است.

با مشخص شدن ضرایب مورد نیاز مدل CSM-CERES-Maize، نمو فنولوژیک لاین B73 شبیه‌سازی شد. مقدار nRMSE مدل واسنجی شده برای مراحل رشد گیاه شامل زمان جوانه‌زنی، زمان پیدایش تاسل، زمان گل‌دهی، زمان شروع پر شدن دانه و زمان رسیدگی فیزیولوژیک برای تاریخ‌های کشت اول تا پنجم به ترتیب ۲، ۲/۶، ۱، ۱/۵ و ۲/۸ به دست آمد.

مطالعه با هر دو روش ۰/۳۳ به دست آمد. ضریب P5 یا زمان دمایی مورد نیاز از شروع پر شدن بذر تا رسیدگی فیزیولوژیک در هر دو روش واسنجی ۹۷۰ درجه روز - رشد برآورد شد. مقدار ضریب PHINT یا فاصله فیلوکرونی پیدایش دو برگ متوالی در روش برازش ۶۵/۵ و به روش برآورد درست‌نمایی غیرقطعی تعمیم یافته با کمترین مقدار nRMSE مربوطه برابر با ۷۰ درجه روز - رشد محاسبه و برگزیده شد. مقادیر G2 و G3 که پتانسیل تعداد دانه در بوته و سرعت رشد دانه (در این مطالعه بذر) هستند، از مطالعه انجام شده روی رشد بذر اخذ و به ترتیب برابر با ۴/۲ و ۷۴۰ جایگزین شد. دو ضریب اخیر نقش مستقیمی در واسنجی مدل مراحل رشد ندارند، ولی لازم است در اختیار مدل CSM-CERES-Maize قرار گیرند. مقدار

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس صفات فنولوژیک رشد لاین اینبرد B73 ذرت
Table 2. Analysis of variance of phenological growth stages of B73 inbred line.

Source of variations	df	Emergence (dap)	Anthesis (dap)	Physiological maturity (dap)
Block	3	0.084**	5.07 ^{ns}	4.02 ^{ns}
Planting date	4	541.92**	1877.76**	3199.66**
Block × Planting date	12	0.019 ^{ns}	0.46 ^{ns}	4.151 ^{ns}
Plant density	4	0.006 ^{ns}	57.06**	14.99 ^{ns}
Plant density × planting	16	0.025 ^{ns}	5.185 ^{ns}	18.615 ^{ns}
CV (%)	-	0.71	3.1	2.33

جدول ۳- ضرایب ژنتیکی لاین اینبرد B73 ذرت برآورد شده با نرم افزار GLUE
Table 3. Genetic coefficients of B73 maize inbred line estimated by GLUE

Coefficient	Definition	Unit	Estimation
P1	Thermal time (base 8 °C) from seedling emergence to end of juvenile phase	Degree days	307
P2	Photoperiod sensitivity coefficient (0-1.0)		0.33
P5	Degree days (base 8 °C) from silking to physiological maturity		970
G2	Potential of the maximum number of kernel per plant	number/plant	740
G3	Potential kernel growth rate during grain linear growth stage in optimal conditions	mg.kg ⁻¹ .day ⁻¹	4.2
PHINT	Degree days required for successive leaf tip appearances		70.0

DSSAT ver. 4.6 (shell 4.6.1.0, updated on 2015) was used for cultivar calibration in this study.

شبیه‌سازی شده زمان تا وقوع این مراحل فنولوژیک در جدول ۴ ارائه شده است. شاخص nRMSE زمان گل‌دهی به عنوان مرحله کلیدی در دورگ‌گیری ارقام ذرت ۷/۱۴۱ درصد و مقدار شاخص ویلموت و ضریب تبیین مدل

نتایج اعتبارسنجی مدل

یافته‌ها نشان داد که مدل CSM-CERES-Maize همه مراحل فنولوژیک اصلی لاین اینبرد مورد مطالعه را به طور مناسبی برآورد کرده است. داده‌های مشاهده شده و

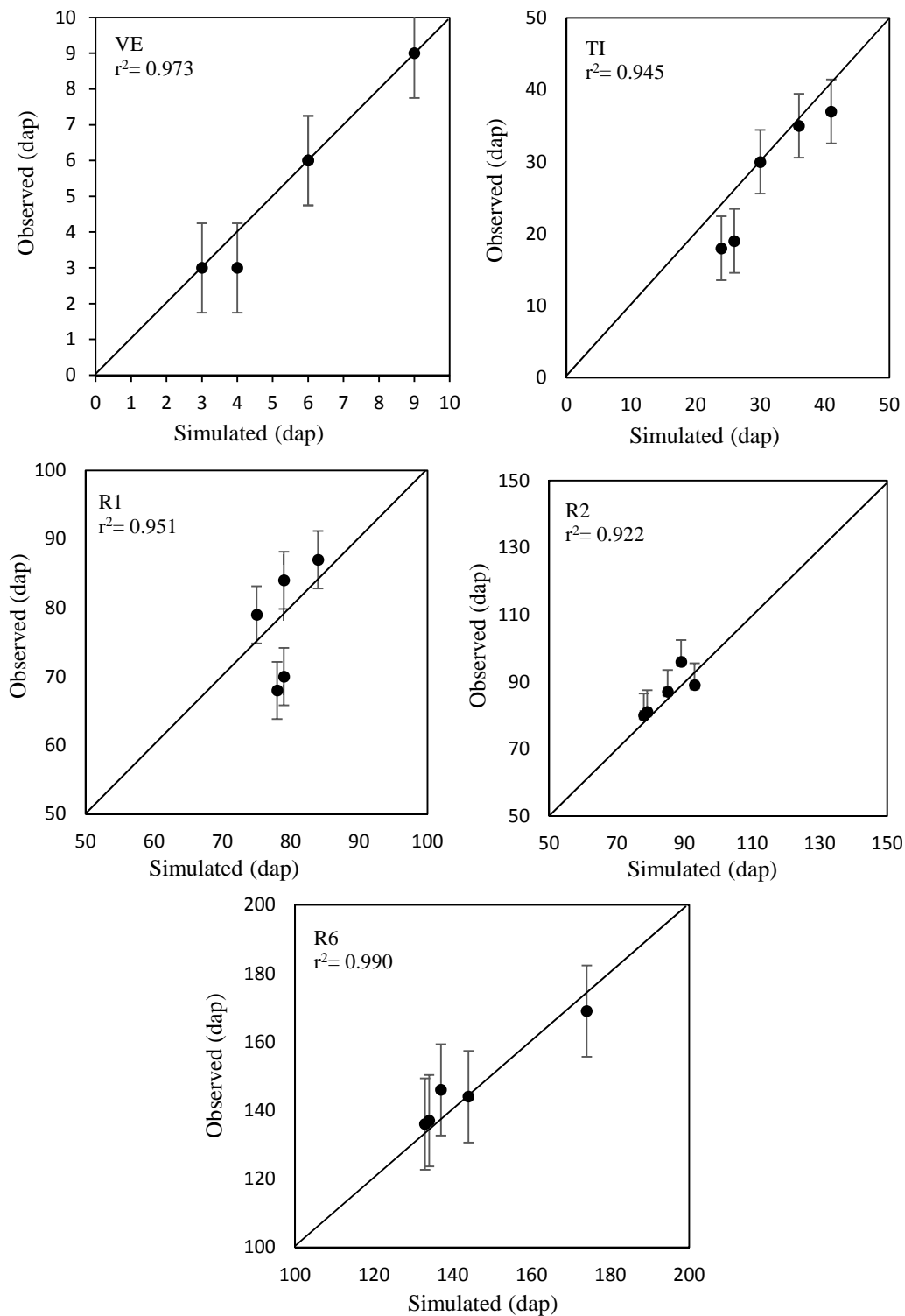
پنج تاریخ کشت مورد مطالعه (شکل ۲) و شاخص‌های ارزیابی مدل (جدول ۴) نشان داد که این مدل می‌تواند مراحل رشد لاین اینبرد B73 را در صورت استفاده از ضرایب مناسب، به‌طور مطلوبی پیش‌بینی کند. پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی توسط مدل انطباق تقریباً خوبی با مشاهدات انجام شده داشت و به‌جز تاریخ کاشت ۸ تیر، که دقت نسبی مناسبی داشت، مدل قادر بود زمان جوانه‌زنی را به‌طور دقیق محاسبه کند (جدول ۴). شاخص nRMSE از شبیه‌سازی زمان پیدایش تاسل ۱۴ درصد بود که نشان‌دهنده دقت متوسط اما قابل قبول مدل در پیش‌بینی زمان پیدایش آغاز تاسل است. می‌توان انتظار داشت که افزایش دقت ثبت زمان TI در بهبود این مدل تأثیرگذار باشد. ارزیابی مدل در شبیه‌سازی زمان گل‌دهی (پیدایش سیلک) نشان داد که استفاده از مدل واسنجی شده برای برآورد زمان گل‌دهی لاین اینبرد B73 قابل اعتماد است (جدول ۴).

ارزیابی مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی زمان رسیدگی فیزیولوژیک بذر لاین مورد مطالعه نیز نشان داد که این مدل توانسته است زمان رسیدگی فیزیولوژیک را در تاریخ‌های کاشت دوم و ۱۵ اردیبهشت و اول و ۲۲ خرداد به‌خوبی شبیه‌سازی و برآورد کند (جدول ۴). با این حال، پیش‌بینی زمان رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ کاشت هشتم تیرماه مناسب نبود، به‌این ترتیب که حداکثر زمان تا رسیدگی فیزیولوژیک لاین اینبرد بر پایه محاسبات مدل CERES-Maize و با توجه به میانگین دمای منطقه کرج ۱۷۲ روز برآورد شد، در حالی که در شرایط مزرعه، بوته‌های ذرت کشت شده در تاریخ هشتم تیرماه نتوانستند در مدت ۱۷۲ روز دمای مورد نیاز برای رسیدن به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک را دریافت کنند (شکل ۳، T5) و در نتیجه مدل، شبیه‌سازی را بدون پایان بردن رشد، به اتمام رسانده و متوقف کرد. احتمالاً دلیل این وضعیت این بوده است که دوره رسیدگی در این تاریخ کاشت هم‌زمان با شروع فصل سرد در منطقه کرج و افت میانگین دمای روزانه به زیر هشت درجه سلسیوس (دمای پایه رشد ذرت در مدل CERES-Maize) شده است. مطالعه چهارساله کاشت با تأخیر سه هبیرید ذرت در کمربند ذرت امریکا نشان داد که در سیکل واقعی رشد، با شروع فصل سرما ذرت دوره پر شدن را زودتر متوقف می‌کند و رسیدگی جلو می‌افتد (Nielsen et al., 2002). بر اساس این مطالعه، زمان دمایی لازم برای رسیدگی فیزیولوژیک به‌میزان ۱۱۰ درجه روز-رشد کاهش یافت.

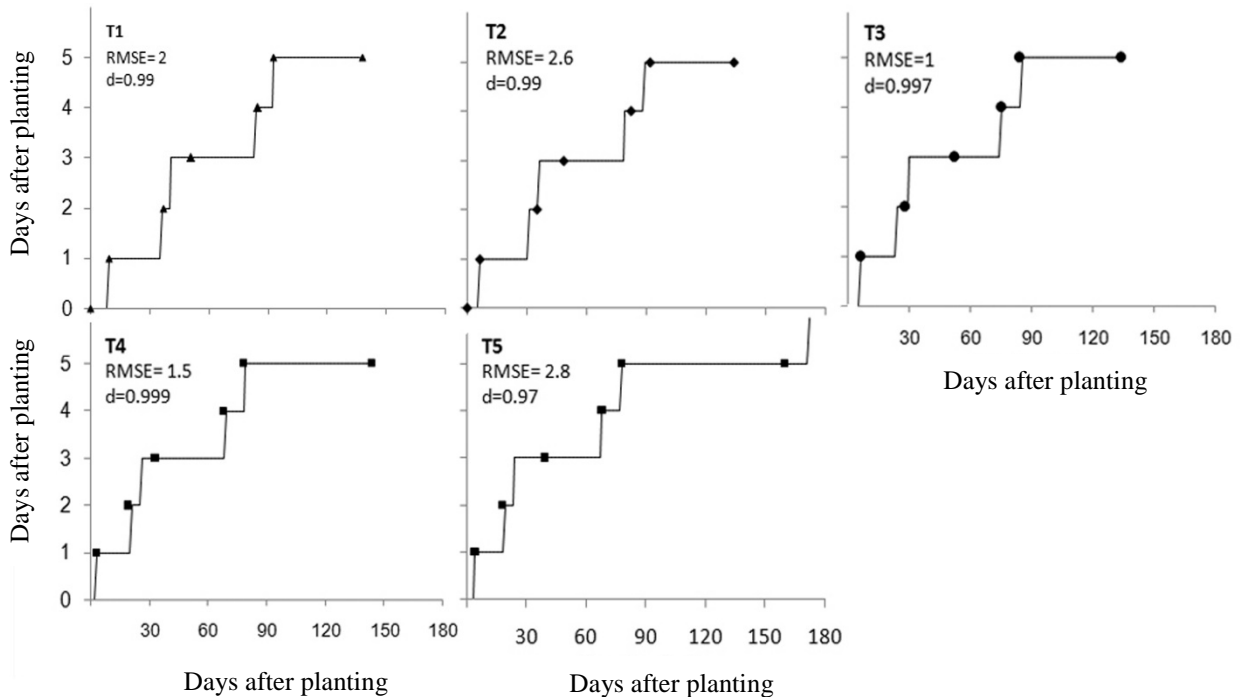
به‌ترتیب ۰/۹۹۱ و ۰/۹۵۱ بود که نشان می‌دهد این مدل در پیش‌بینی این مرحله و مدیریت‌های مربوط به حذف تاسل‌های مادری و بوته‌های خارج از رده بسیار قابل اعتماد است. مقادیر شاخص‌های nRMSE و توافق ویلموت برای پیش‌بینی زمان شروع پر شدن بذر به‌ترتیب ۳/۶۰۷ درصد و ۰/۹۹۷ و برای پیش‌بینی زمان رسیدگی فیزیولوژیک ۲/۶۸۷ درصد و ۰/۹۹۹ به‌دست آمد. در نتیجه، می‌توان از مدل واسنجی شده با اطمینان بسیار بالایی در انتخاب زمان کاشت برای جلوگیری از برخورد دوره پر شدن دانه با دماهای آستانه تحمل جنین و افت دما و بارندگی پایان فصل رشد و رسیدگی استفاده کرد. شاخص nRMSE مدل برای برآورد زمان جوانه‌زنی و پیدایش تاسل نیز به‌ترتیب ۷/۸۵۷ درصد و ۱۴/۰۰ درصد بود. خطای معیار مشاهدات در نمودارهای مقایسه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که اختلاف بین داده‌های پیش‌بینی شده با اندازه‌گیری شده در اغلب تاریخ‌های کشت معنی‌دار نیست (شکل ۲).

همان‌طور که گفته شد، در مدل CERES-Maize فرض بر این است که تراکم بوته بر تغییر رخداد (جلو انداختن یا عقب انداختن) مراحل نموی تأثیر نمی‌گذارد (Jones and Kiniry, 1986; Hoogenboom et al., 2015). در این آزمایش هم مشاهده شد که گیاهان در شبیه‌سازی انجام شده از چهار تراکم مورد آزمایش (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ هزار بوته در هکتار) در زمان‌های یکسانی وارد هر یک از مراحل فنولوژیک شدند و در زمان یکسانی نیز آن مرحله را به پایان رساندند (شکل ۳). از این‌رو، نمودارهای مدل مراحل رشد تراکم‌های بوته مختلف در تاریخ‌های کاشت معین با هم هم‌پوشانی نشان می‌دهند. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نیز نشان داد که تاریخ کاشت تأثیر معنی‌داری بر زمان‌های وقوع مراحل فنولوژیک لاین اینبرد B73 نداشته است.

نتیجه ارزیابی مدل CSM-CERES-Maize واسنجی شده برای پیش‌بینی مراحل رشد لاین اینبرد B73 نشان داد که این مدل پنج مرحله اصلی رشد و نمو لاین اینبرد ذرت (زمان سبز گیاهچه، پیدایش آغاز تاسل، گل‌دهی یا پیدایش سیلک، پایان تلقیح بذر و زمان رسیدگی فیزیولوژیک) که پیش‌بینی زمان وقوع آن‌ها در مدیریت برنامه‌های تولید بذر اینبرد یا هبیرید دارای اهمیت زیاد است را به‌طور مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. مقایسه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مراحل رشد لاین B73 در



شکل ۲- مقایسه نسبت ۱:۱ داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای اعتبارسنجی مدل برآورد مراحل فنولوژیک در لاین اینبرد B73 ذرت. VE سبز گیاهچه، TI انگیزش تاسل، R1 گل‌دهی، R2 پایان تلقیح یا آغاز پر شدن بذر، R6 زمان رسیدگی فیزیولوژیک. Figure 2. Comparison of 1:1 ratio of the simulated and observed data for validation of phenological model in B73 maize inbred line. VE, seedling emergence; T1, tassel initiation; R1, anthesis; R2, end of fertilization or beginning of seed filling; R6, physiological maturity.



شکل ۳- مدل‌های واسنجی شده مراحل رشد لاین اینبرد B73 ذرت. مراحل فنولوژیک رشد (محور عمودی) به ترتیب عبارت‌اند از: T1 سبز گیاهچه تا پایان دوره جوانی، T2 پایان دوره جوانی تا پیدایش آغازه تاسل، T3 پیدایش تاسل تا پیدایش سیلک، T4 پیدایش سیلک تا شروع پر شدن دانه، T5 پر شدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک.

Figure 3. Calibrated models for phenological growth stages of B73 maize inbred line. Growth stages are including: T1, seedling emergence to end of juvenile; T2, end of juvenile to tassel initiation; T3, appearance of tassel to appearance of silk; T4, appearance of silk to seed filling; T5, seed filling to physiological maturity.

نتیجه‌گیری کلی

در مدیریت کشتین تاسل‌ها و حذف بوته‌های خارج از رده و انتخاب زمان کاشت و پرهیز از دمای بالاتر از آستانه دوره تلقیح حیاتی است را با اختلافی کم‌تر از ۱۰ درصد از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی کرد. همچنین، زمان پایان گرده‌افشانی و تلقیح و زمان رسیدگی فیزیولوژیک را با اختلافی کم‌تر از ۷ درصد از مقدار مشاهده شده در مزرعه شبیه‌سازی کرد. زمان پایان گرده‌افشانی و تلقیح در مدیریت حذف پایه‌های پدیری و نیز در انتخاب زمان درست کاشت لاین‌های اینبرد والدینی برای عدم تلاقی با دماهای کشنده چنین حائز اهمیت بسیار است. پیش‌بینی دقیق زمان تا رسیدگی فیزیولوژیک توسط مدل، این اطمینان را به کاربر می‌دهد که بتواند با تغییر شرایط مدیریتی از برخورد دوره حساس پر شدن دانه با شرایط نامناسب پایان فصل رشد جلوگیری کند.

در کل، یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل CSM-CERES-Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT اگرچه برای مدل‌سازی رشد ارقام هیبرید با بنیه بالای حاصل از هتروزیس ایجاد شده است، ولی می‌تواند در صورت استفاده از ضرایب ژنتیکی مناسب، با اعتماد بسیار بالایی برای شبیه‌سازی مراحل رشد و نمو لاین اینبرد B73 ذرت نیز استفاده شود. در این آزمایش، مقادیر ضرایب ژنتیکی P1، P2، P5 و PHINT برای لاین اینبرد B73 به ترتیب برابر با ۳۰۷، ۰/۳۳، ۹۷۰ و ۷۰ برآورد شد. مدل ایجاد شده، توانست زمان سبز شدن گیاهچه‌ها را که در پیش‌بینی استقرار گیاهچه اهمیت دارد، با اختلافی کم‌تر از ۳ درصد و زمان پیدایش آغازه تاسل، که در برنامه‌ریزی عملیات تغذیه دارای اهمیت است را با اختلاف کم‌تر از ۱۵ درصد از مقدار مشاهده شده پیش‌بینی کند. این مدل، زمان گل‌دهی که

جدول ۴- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای مراحل زمان سبز گیاهیچه، انگیزش تاسل، گل‌دهی، پایان تلقیح یا شروع پر شدن

بذر و رسیدگی فیزیولوژیک در بوته در تاریخ‌های کاشت مختلف در لاین اینبرد B73 ذرت به‌همراه شاخص‌های ارزیابی مدل

Table 4. Observed and simulated data for seedling emergence, tassel initiation, flowering, seed filling and physiological maturity at different planting dates along with model evaluation indices

Planting date	Days to seedling emergence		Days to tassel initiation		Days to flowering		Days to seed filling		Days to physiological maturity	
	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated
Apr. 22	9	9	37	41	85	84	89	93	146	137
May 6	6	6	35	36	83	79	96	89	135	134
May 22	6	6	28	30	76	75	87	85	132	133
June 12	3	3	19	26	67	69	81	79	146	144
June 22	3	4	18	24	64	68	80	78	168	(172)**
nRMSE*	7.857		14.003		7.141		3.607		2.687	
d	0.992		0.971		0.991		0.997		0.999	
R ²	0.973		0.945		0.951		0.922		0.990	

*: nRMSE, d and R² are normalized root mean square error, Willmott index of agreement and coefficient of determination, respectively.

** : The simulation of maturity at the planting date of June 22 was determined because of temperature drop lower than T_{base} of CERES-Maize model and long lasting the plant maturity stage more than 172 days.

References

- Angstrom, A. 1924.** Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 50: 121-126.
- Bannayan, M. and Hoogenboom, G. 2009.** Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. **Field Crops Research** 111: 290-302.
- Birch, C. J., Vos, J. and Van der Putten, P. E. L. 2003.** Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperate environment in the field. **European Journal of Agronomy** 19 (2): 173-188.
- Bonhomme, R., Derieux, M. and Edmeades, G. 1994.** Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. **Crop Science** 34: 156-164.
- Çakir, R. 2004.** Effects of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research** 89 (1): 1-16.
- Carson, J. S. 2002.** Model verification and validation. Simulation conference, 2002. Proceedings of the Winter. Vol. 1. pp: 52-58.
- Diepen, C. V., Wolf, J., Keulen, H. V. and Rappoldt, C. 1989.** WOFOST: A simulation model of crop production. **Soil Use and Management** 5: 16-24.
- Dobermann, A. R., Arkebauer, T. J., Cassman, K. G., Drijber, R. A., Lindquist, J. L., Specht, J. E., Walters, D. T., Yang, H., Miller, D. N. and Binder, D. L. 2003.** Understanding corn yield potential in different environments. University of Nebraska Press.
- Evans, M., Passas, H. J. and Poethig, R. S. 1994.** Heterochronic effects of glossy15 mutations on epidermal cell identity in maize. **Development** 120: 1971-1981.
- Ganal, M. W., Durstewitz, G., Polley, A., Bérard, A., Buckler, E. S., Charcosset, A., Clarke, J. D., Joets, J., Le Paslier, M. C., McMullen, M. D., Montalent, P., Rose, M., Schön, C. C., Sun, Q., Walter, H., Martin, O. C. and Falque, M., 2011.** A large maize (*Zea mays* L.) SNP genotyping array: Development and germplasm genotyping, and genetic mapping to compare with the B73 reference genome. **PLoS ONE** 6 (12): e28334. doi:10.1371/journal.pone.0028334.
- Gouesnard, B., Rebourg, C., Welcker, C. and Charcosset, A. 2002.** Analysis of photoperiod sensitivity within a collection of tropical maize populations. **Genetic Resources and Crop Evolution** 49 (5): 471-481.
- Gungula, D., Kling, J. and Togun, A. 2003.** CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. **Agronomy Journal** 95: 892-899.

- Hoogenboom, G., Jones, J., Wilkens, P., Porter, C., Boote, K., Hunt, L., Singh, U., Lizaso, J., White, J. and Uryasev, O. 2015.** Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT). Ver. 4.6. DSSAT Foundation, Prosser, Washington. www. DSSAT. net.
- Jones, C. and Kiniry, J. 1986.** CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. 1986. Texas A & M University Press.
- Khalili A. and Sadr H. 1998.** Estimation of total solar radiation in the region of Iran based on climatic data. *Journal of Geographical Research* 13 (1): 15-35. (In Persian with English Abstract).
- Keisling, T. 1982.** Calculation of the length of day. *Agronomy Journal* 74: 758-759.
- Kumudini, S., Andrade, F., Boote, K., Brown, G., Dzotsi, K., Edmeades, G., Gocken, T., Goodwin, M., Halter, A. and Hammer, G. 2014.** Predicting maize phenology: Intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal* 106: 2087-2097.
- Macal, C. M. 2005.** Model verification and validation. In Workshop on " Threat Anticipation: Social Science Methods and Models.
- Makowski, D., Wallach, D. and Tremblay, M. 2002.** Using a bayesian approach to parameter estimation: Comparison of the GLUE and MCMC methods. *Agronomy Journal* 22 (2): 191-203.
- Nielsen, R. L., Thomison, P. R., Brown, G. A., Halter, A. L., Wells, J. and Wuethrich, K. L. 2002.** Delayed planting effects on flowering and grain maturation of dent corn. *Agronomy Journal* 94: 549-558.
- Popova, Z., Eneva, S. and Pereira, L. S. 2006.** Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments. *Biosystems Engineering* 95 (1): 139-149.
- Puppi, G. 2007.** Origin and development of phenology as a science. *Italian Journal of Agrometeorology* 3: 24-29.
- Rasse, D. P., Ritchie, J. T., Wilhelm, W. W., Wei, J. and Martin, E. C. 2000.** Simulating inbred-maize yields with CERES-IM. *Agronomy Journal* 92 (4): 672-678.
- Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C. and Bowen, W. T. 1998.** Cereal growth, development and yield. In: Tsugi, G. Y., Hoogenboom, G. and Thornton, P. K. (Eds.). Understanding option for agricultural production. Kluwer Academic Press. Boston.
- Saseendran, S. A., Ma, L., Nielsen, D., Vigil, M. and Ahuja, L. 2005.** Simulating planting date effects on corn production using RZWQM and CERES-Maize models. *Agronomy Journal* 97: 58-71.
- Schnable, P. S., Ware, D., Fulton, R. S., Stein, J. C., Wei, F., Pasternak, S., Liang, C., Zhang, J., Fulton, L. and Graves, T. A. 2009.** The B73 maize genome: Complexity, diversity and dynamics. *Science* 326: 1112-1115.
- 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. *European Journal of Agronomy* 27: 165-177.
- Soltani A. and Maddah V. 2000.** Simple and applied programs for education and research in agronomy. Iranian Scientific Society of Agroecology. (In Persian).
- Tsimba, R., Edmeades, G. O., Millner, J. P. and Kemp, P. D. 2013.** The effect of planting date on maize grain yields and yield components. *Field Crops Research* 150: 135-144.
- Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G. and Thornton, P. K. 1998.** Understanding options for agricultural production. Springer Science and Business Media.
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. and Hochman, Z. 2013.** Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.
- Walbot, V. 2009.** 10 Reasons to be tantalized by the B73 maize genome. *PLoS Genetics* 5: e1000723.



University of Guilan
Faculty of Agricultural
Sciences

Cereal Research
Vol. 8, No. 2, Summer 2018 (239-250)

Simulation of growth and development of B73 maize inbredline using DSSAT-CSM-CERES-Maize model

Mohammad Rahmani¹, Mohsen Zavareh^{2*}, Aidin Hamidi³, Gerrit Hoogenboom⁴ and Mohammad Zare-Mehrjardi⁵

Received: November 5, 2017

Accepted: March 5, 2018

Abstract

A successful hybrid maize (*Zea mays* L.) seed production program depends on conformity and synchrony of growth and developmental stages of the parental inbred lines with environmental conditions. Crop simulation models play a key role in managing such synchrony by providing the simulation of the growth stages occurrence time. To evaluate the power of the DSSAT-CSM-CERES-Maize model to simulate the growth and developmental stages of B73 maize inbred line, an experiment was performed as split plot in randomized complete block design with four replications in Karaj, Iran, in 2013. The experimental factors were including planting date and plant densities in five and four levels, respectively. Time to reach any of the developmental stages of B73 maize inbred line including emergence (VE), tassel initiation (TI), silk appearance as the crop flowering (R1), completion of fertilization or beginning of the seed filling (R2) and physiological maturity (R6) were recorded. Then, the genetic coefficients used in the model including P1, P2, P5 and PHINT were determined based on generalized likelihood uncertainty estimation using GLUE software. These genetic coefficients were 307, 0.33, 970 and 70, respectively. The normalized root of error mean square (nRMSE) values for the recorded five growth stages were calculated as 7.857, 14.0, 7.141, 3.607 and 2.687, respectively, which show the model can simulate the growth stages of B73 maize inbred line using the new specific genetic coefficients. Overall, the results of current research showed that the CERES-Maize model which already developed to simulate the growth and development of maize hybrid cultivars can be efficient and accurate to simulate the production of maize hybrid seed only if the specific genetic coefficient of each parental inbred line is used.

Keywords: Growth phenology, Planting date, Seed production modeling, Seed density

1. Researcher, Seed and Plant Registration and Certification Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
3. Research Assoc. Prof., Seed and Plant Registration and Certification Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4. Prof., Preeminent Scholar, Institute for Sustainable Food Systems, University of Florida, Florida, USA
5. Researcher, Dept. of Soil and Water, Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Yazd Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

* Corresponding author: mzavareh@guilan.ac.ir