Iranian Journal of Field Crop Science
Vol 49, No 1, Spring 2018 (57-64)
DOI: 10.22059/ijfcs.2017.205678.654112

علوم گیاهان زراعی ایران
دورهٔ ۴۹، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۷ (ص۶۴-۵۷)

ارزیابی کارایی مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد و نمو ذرت برای الگوی کشت تابستانه در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری جنوب کرمان

مهین افضلی[۱]، جواد طایی سمیرمی*[۲]و مهدیه امیری نژاد[۳]

۱. دانشجوآموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، ۲ و۳. استادیاران گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۷ – تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲)

چکیده

امروزه کاربرد مدل‌های همانندسازی رشد و نمو به‌عنوان ابزاری پیشرفته برای درک و تحلیل تأثیر فراسنجه (پارامتر)های گیاه، خاک و اتمسفر بر رشد و نمو گیاهان زراعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش به‌منظور ارزیابی مدل WOFOST (WOrld FOod STudies) برای برآورد عملکرد ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) در الگوی کشت تابستانه در سال‌های ۱۳۹۳و۱۳۹۲ در منطقهٔ نیمه گرمسیری جیرفت اجرا شد. پایگاه داده‌های ورودی مدل شامل داده‌های آب‌وهوا (تابش خورشیدی، دمای کمینه، دمای بیشینه و بارندگی)، داده‌های گیاه (مراحل پدیدشناختی یا فنولوژیک، عملکرد دانه و زیست‌توده) و داده‌های خاک (ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک) هستند. متغیرهای زمان رخداد مراحل پدیدشناختی، مادهٔ خشک در هر مرحله، عملکرد و زیست‌توده از یک آزمایش مزرعه‌ای که به‌منظور مقایسهٔ رقم‌ها و تاریخ‌های گوناگون کشت انجام گرفته بود، ثبت شد. در مرحلهٔ بعد، مدل بر پایهٔ داده‌های واقعی واسنجی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد، مقادیر ریشه، میزان ضریب کارایی مدل (E) برای عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص برداشت در سال نخست به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۸۷ و۰/۸۲ بود که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه سازی عملکرد و زیست‌توده است. به‌طورکلی نتایج ارزیابی مدل WOFOST نشان داد، این مدل کارایی بالایی در شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری منطقهٔ جیرفت داشت و این نتایج با مقادیر اندازه‌گیری‌شده همخوانی خوبی داشت.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کشت، ذرت (*Zea mays* L.)، فنولوژی، مادهٔ خشک، مدل‌سازی.

Evaluation of WOFOST model for growth and development simulation of maize under summer cropping system conditions in sub-tropical region of Southern Kerman

Mahin Afzali[1], Javad Taei Semiromi*[2] and Mahdieh Amirinezhad[3]

1. MSc student in Agroecology, 2 and 3. Assistants professors in Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

(Received: May 27, 2016- Accepted: Sep. October 24, 2017)

ABSTRACT

Today crop simulation models are as a developed tools for understanding and analyzing how soil, plant and atmosphere affecting crop growth and development. This study was conducted in order to evaluate WOFOST model in maize (*Zea mays* L.) yield production in summer cropping system under sub-tropical conditions in Jiroft region, Iran at 2012 and 2013. Model input database includes the climate data (daily parameters of solar radiation, temperature and rainfall), plant data (time of germination, flowering and maturity, grain yield and dry matter) and soil data (physical and chemical soil properties). Plant variables of model include phenological stages, dry matter production, yield and biomass collected from field which performed at different planting dates and genotypes. At the next step, model was calibrated and evaluated with field data. The results showed RMSE, for grain yield, biomass and harvest index were 9.06, 4.24 and 10.11, respectively. The model efficiency coefficient (E) for grain yield, biomass and harvest index was 0.99, 0.87, and 0.82, respectively. Therefore, these results presented high precision of model simulation. The results of WOFOST evaluation showed that the efficiency of model is good for maize summer cropping system under tropical climatic conditions of Jiroft region.

Keywords: planting date, maize (*Zea mays* L.), phenology, dry matter, modeling.

* Corresponding author E-mail: jtaei.90@gmail.com

مقدمه

یکی از سیاست‌های بخش کشاورزی استفادهٔ بهتر از منابع موجود در راستای افزایش تولید پایدار است (Monteith, 1981; Marletto *et al*., 2007). کشت گیاهان زراعی و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها در هر کشور از سالی به سال دیگر تأثیر مستقیمی بر اقتصاد ملی منطقه‌ای و بین‌المللی داشته و نقش مهمی در مدیریت تولید غذا نیز خواهد داشت (Kassi *et al*., 2014; Hayes & Decker, 1996). با توجه به اینکه دستیابی به روش‌های شناسایی و مدیریت عامل‌های محدودکنندهٔ عملکرد مطلوب، نیاز به انجام آزمایش‌های پی‌درپی و پرهزینه در مناطق گوناگون دارد، لذا یافتن راهی برای کاهش هزینه‌های یادشده، ضروری است (Van Keulen & Wolf, 1986; Eitzinger *et al*., 2004). امروزه انجام این مهم با شبیه سازی فرآیندهای رشد رویشی و زایشی با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای مبتنی بر معادله‌های ریاضی و با اعمال متغیرهای بسیار مؤثر بر عملکرد، امکان‌پذیر شده است (Wolfram, 1991; Allen *et al*., 2002) مدل‌های شبیه سازی ، به‌صورت قابل‌توجهی برای بهینه‌سازی مدیریت کشت گیاهان زراعی استفاده می‌شوند (Nasiri Mahallati, 2008). این مدل‌ها تأثیر کمی منابع بیوفیزیکی، مانند خاک و ویژگی‌های آب و هوایی، ویژگی‌های گیاهی و عامل‌های مدیریتی را روی عملکرد محصول و میزان آب موردنیاز تجزیه‌وتحلیل می‌کنند (Hammer *et al*., 1993; Kalra *et al*., 2008; Dua *et al*., 2014).

یکی از مدل‌های شبیه سازی رشد گیاه که در طول دو دههٔ گذشته به‌صورت گسترده‌ای در بررسی-های گوناگون استفاده شده، مدل WOFOST[1] است (Boogard *et al*., 1998). این مدل در دانشگاه واخنینگن هلند تکامل یافته است. مدل WOFOST درواقع از مدل دیگری به نام SUCROS مشتق شده و اصول آغازین آن توسط (Van Keulen, & Wolf, 1986) نوشته شده است. مدل WOFOST در آغاز به‌عنوان مدل شبیه سازی رشد گیاهان زراعی به‌منظور ارزیابی پتانسیل عملکرد آن‌ها در کشورهای استوایی توسعه یافته است. همچنین از دیگر قابلیت‌های این مدل ارزیابی عملکرد پتانسیل نسبت به عامل‌های حساس، پیش‌بینی عملکرد محصول و نیاز آبی گیاه با توجه به پیش‌بینی‌های هواشناسی است. Wolf & Van Diepen (1994) عملکرد ذرت سیلویی را در اتحادیهٔ اروپا بر پایهٔ داده‌های هواشناسی و ویژگی‌های خاک و با استفاده از مدل WOFOST پیش‌بینی کرده و حساسیت مدل به متغیرهای هواشناسی رانیز تعیین کردند. Dua *et al*. (2014) کارایی این مدل را برای سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) بررسی کردند. Gharineh *et al*. (2012) از این مدل به‌منظور منطقه بندی اقلیم زراعی (اگروکلیماتیکی) استان خوزستان برای ظرفیت عملکرد گندم (*Triticum aestivum L.*) بهره بردند. Nasiri *et at*., 2006 با استفاده از WOFOST تأثیر تغییر اقلیم را بر تولید گندم دیم در استان خراسان بررسی کردند. Taei samiromi *et al*. (2013) کارایی این مدل را برای ارزیابی سامانه‌های دیم و آبی تولید گندم در منطقهٔ بروجن استفاده کرد. کارایی مدل WOFOST برای شبیه سازی مراحل پدیدشناختی (فنولوژیک) و عملکرد در شرایط تغییر اقلیم برای برخی گیاهان زراعی نیز ارزیابی شده است. Kassi *et al*. (2014) تأثیر تغییر اقلیم بر شکاف عملکرد ذرت در اتیوپی با استفاده از WOFOST را ارزیابی کردند. Ceglar & Kajfez-Bogataj (2012) عملکرد ذرت را با استفاده از این مدل در شرایط تغییر اقلیم در آینده پیش‌بینی کردند. Bafkar *et al*. (2011) ظرفیت تولید ذرت دانه‌ای رقم۷۰۴ در منطقهٔ ماهیدشت کرمانشاه با استفاده از مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد گیاه پیش‌بینی کرد.

کشت تابستانهٔ ذرت در جنوب استان کرمان یکی از الگوهای کشت است که در سال‌های اخیر در منطقه رایج شده است، در این الگوی کشت، ذرت در مردادماه کشت شده و در اواخر مهرماه برای تولید علوفهٔ سیلویی یا در اواخر آذرماه برای تولید دانه برداشت می‌شود. با توجه به اینکه برای الگوی کشت تابستانهٔ

1. WOrld FOod STudies (WOFOST)

ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری جنوب کرمان شبیه سازی رشدونمو ذرت بررسی نشده است، لذا درک تغییرپذیری فرآیندهای رشد و تولید محصول این گیاه در شرایط اقلیمی این منطقه با استفاده از مدل شبیه سازی برای دستیابی به تولید پایدار این محصول و کاهش شکاف عملکرد یا تعیین برنامه‌ریزی‌های بلندمدت مرتبط درزمینهٔ اصلاح نباتات ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از این پژوهش به‌عنوان گام نخست در این راستا ارزیابی کارایی مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد و عملکرد ذرت در شرایط کشت تابستانه در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری منطقهٔ جیرفت است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دانشگاه جیرفت در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۲ اجرا شد. منطقهٔ مورد بررسی، دشت جیرفت با ارتفاع کمتر از ۶۰۰ متر از سطح دریا (طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۷دقیقهٔ شرقی و عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و۴۳ دقیقهٔ شمالی) است که اقلیمی خشک، با زمستان ملایم و تابستان بسیار گرم بر پایهٔ روش سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد (UNESCO, 1979) دارد.

در این پژوهش برای پیش‌بینی پتانسیل عملکرد ذرت از نسخهٔ ۷ مدل WOFOST استفاده شد. WOFOST یک مدل شبیه سازی رشد گیاهان زراعی بوده که می‌تواند عملکرد شماری از گیاهان زراعی را در سه شرایط تولید ظرفیت اقلیمی، تولید با محدودیت آب و تولید با محدودیت نیتروژن را بر پایهٔ ویژگی‌های گیاهی، فراسنجه (پارامتر)های روزانهٔ هواشناسی و ویژگی‌های خاک شبیه سازی کند (*et* Boogaard *al.*, 1998). در مدلWOFOST رشد گیاهان بر پایهٔ فرآیندهای اکوفیزیولوژیک شبیه سازی می‌شود، این برنامه مادهٔ خشک گیاه را به‌عنوان تابعی از تابش، دما و ویژگی‌های گیاه در مراحل زمانی یک روز همانندسازی می‌کند. اصول محاسبهٔ تولید مادهٔ خشک، سرعت ناخالص جذب CO_2 توسط سایه‌انداز است که به انرژی تابشی جذب‌شده بستگی دارد که تابعی از تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب خاموشی نور در سایه‌انداز است (Boogaard *et al.*, 1998).

پایگاه داده‌های ورودی مدل

۱-داده‌های اقلیمی: فراسنجه‌های اقلیمی مورد استفاده شامل: دمای کمینه و بیشینهٔ روزانه، بارش روزانه، رطوبت نسبی هوا، پتانسیل تبخیر، ساعت‌های آفتابی روزانه و تبخیر و تعرق حقیقی. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی میاندهٔ جیرفت برای دو سال اجرای آزمایش دریافت شدند. ۲-داده‌های خاک: عامل‌های خاک موردنیاز برای مدل شامل: بافت خاک، نقطهٔ پژمردگی، وضعیت اشباع، ظرفیت زراعی، وزن ویژهٔ ظاهری، مادهٔ آلی، شوری خاک، pH و دیگر ویژگی‌های شیمیایی موردنیاز که از آزمایش خاک مزرعه اندازه‌گیری شد. ۳-داده‌های گیاه زراعی: داده‌های موردنیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از اطلاعات و داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام‌شدهٔ داده‌های گیاهی: داده‌های موردنیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از آزمایش‌های مزرعه‌ای که در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۱ به‌منظور مقایسهٔ سازگاری رقم‌های ذرت دیررس تا زودرس , KCS500, G3393 BC666, BC404 و تاریخ‌های گوناگون کشت تابستانه در ایستگاه تحقیقاتی آموزشی شهید بهشتی دانشگاه جیرفت انجام شده بود، استفاده شد.

واسنجی مدل WOFOST با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری‌شدهٔ رشد گیاه زراعی، مشاهده‌های مراحل پدیدشناختی و دیگر فراسنجه‌های اندازه‌گیری‌شده از داده‌های گوناگون آزمایش انجام گرفت Wolf & Van (Diepen, 1994) کارایی مدلWOFOST در برآورد عملکرد مادهٔ خشک گیاه ذرت در مراحل رشد با استفاده از به‌کارگیری شاخص‌های آماری شامل ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی (E)، شاخص سازگاری (D)، بیشینهٔ خطا (ME) و ضریب باقی‌مانده (CRM) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی شد.

شاخص RMSEn از رابطهٔ زیر محاسبه شد (Rinaldy, *et al.*, 2003):

رابطهٔ ۱.

$$RMSEn = \left[\left(\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2 / n \right)^{0.5} / \overline{M}_{avr} \right] \times 100$$

که در این رابطه‌ها (رابطه‌های ۱تا ۶) Si و Mi به ترتیب مقادیر شبیه سازی شده و اندازه‌گیری‌شده، n شمار مشاهده‌ها، M_{avr} میانگین کل مقادیر واقعی است. توان پیش‌بینی مدل درصورتی‌که میزان RMSE کمتر از ۱۰درصد، عالی، بین ۱۰تا ۲۰درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰درصد، متوسط و بالاتر از ۳۰درصد ضعیف برآورد شد (Rinaldy, *et al.*, 2003)، می‌توان این شاخص را با استفاده از رابطهٔ (۲) بر پایهٔ کیلوگرم در هکتار نیز گزارش کرد.

رابطهٔ ۲.

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2 / n \right)^{0.5}$$

شاخص سازگاری (D) یک فراسنجهٔ توصیفی است که میزان آن∞- تا۱+ تغییر می‌کند (Eitzinger *et al.*, 2004). هرچه میزان D به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است و شبیه سازی موفق‌تر بوده است (Singh et al., 2004; Eitzinger *et al.*, 2008).

رابطهٔ۳.

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(\left| S_i - \overline{M} \right| + \left| M - \overline{M} \right| \right)^2}$$

ضریب کارایی (E) بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه سازی شده از اندازه‌گیری‌شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری‌شده از مقادیر میانگین است. میزان E بین∞- تا۱+ متغیر است. هرچه میزان آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است و مقادیر شبیه سازی شده قابل اطمینان‌تر است (Willmoot, 1982).

رابطهٔ ۴.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{n} \left(M_i - \overline{M} \right)^2}$$

شاخص بیشینهٔ خطا (ME)، بیشینهٔ خطا بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده شده است . میزان زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارایی مدل است. هرچه کمتر باشد، مدل کارایی بهتری خواهد داشت (Willmoot, 1982).

رابطهٔ ۵.

$$ME = Max \frac{100}{\overline{M}} . \left| S_i - M_i \right|$$

شاخص جرم باقی‌مانده (CRM) نشانگر مدل برای برآورد بیش‌ازحد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. در حالت مطلوب که مقادیر شبیه سازی شده و اندازه‌گیری‌شده با هم برابر باشند مقادیر عددی CRM, ME, RMSE برابر با صفر و میزان E و dبرابر ۱ خواهند بود (Walpole *et al.*, 1998).

رابطهٔ ۶.

$$CRM = \frac{\sum_{=1}^{n} m_i - \sum_{i=1}^{n} s_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$

برازش رابطه‌ها و انجام محاسبات آماری، با استفاده از نرم‌افزار Excel و SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل WOFOST

بنا بر نتایج این پژوهش و دیگر آزمایش‌های انجام گرفته در منطقه، فراسنجه‌های گوناگون مدل WOFOST بررسی شدند (جدول-۱). و برخی از فراسنجه‌های گیاهی که مدل WOFOST نسبت به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد، از جمله مجموع دما از کشت تا سبز شدن (TSUMEM)، مجموع دما از سبز شدن تا آغاز رشد گلدهی (TSUM1)، مجموع دما از آغاز گلدهی تا رسیدگی (TSUM2)، بهره‌وری از تبدیل به برگ (CVL)، بهره‌وری از تبدیل به ریشه (CVR)، بهره‌وری از تبدیل به ساقه (CVS)، با استفاده از داده‌ها واسنجی شد. با تغییر ضریب

واسنجی مدل یا فراسنجه‌های مدل، اساس بهترین همخوانی نتایج شبیه سازی شده با مقادیر مشاهده‌شده ضریب‌های واسنجی به‌صورت مقادیر گزارش‌شده در جدول ۱ به دست آمد.

نتایج ارزیابی مدل

ارزیابی مدل واسنجی‌شده بر پایهٔ فراسنجه‌های بالا و متغیرهای عملکرد، زیست‌توده و شاخص برداشت انجام شد و نتایج در جدول‌های ۲و۳ ارائه شده است.

شبیه سازی عملکرد مادهٔ خشک دانه: کارایی مدل در برآورد میزان عملکرد دانهٔ ذرت در زمان برداشت با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی شد. جدول (۲) ارائه‌دهندهٔ شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای تعیین دقت مدل برای سال نخست است. دقت و درستی مدل به ترتیب با مقادیرRMSE=۹/۰۶، D=۰/۹۸ وME=۱۲/۱۴ در سال نخست به دست آمد.

جدول ۱. فراسنجه‌های اصلاح‌شده برای واسنجی مدلWOFOST.

Table 1.Modified parameters for calibration of WOFOST model.

Cultivar / Model parameter	BC404	SC500	SC666	G3393
(Tsum Em)	95.90	90.50	93.58	96.33
Tsum1	868.33	850.650	881.739	938.628
Tsum2	904.661	936.35	955.266	947.372
Dtsmtb	0.00	0.00	0.00	0.00
	8.00	8.00	8.00	8.00
	30.00	30.00	30.00	30.00
	35.00	35.00	35.00	35.00
CVR	0.690	0.690	0.695	0.695
CVS	0.720	0.719	0.720	0.722
CVL	0.720	0.717	0.719	0.721

این مقادیر برای سال دوم نیز به ترتیب ۸/۸۵، ۰/۹۱و ۰/۰۱۸- به دست آمد. میزان ضریب تبیین (R^2) به‌دست‌آمده از تجزیهٔ رگرسیون خطی توابع بین مقادیر عملکرد دانهٔ اندازه‌گیری‌شده و شبیه سازی شده در سال نخست و دوم (R2=۰/۹۱) به دست آمد. به‌طورکلی مدل عملکرد دانهٔ ذرت را به‌خوبی پیش‌بینی کرد. نتایج نشان‌دهندهٔ همخوانی خوب بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه سازی شده است. بنابراین این مدل کارایی مناسب برای پیش‌بینی عملکرد دارد، زیرا بر پایهٔ آنچه توسط Hammer & Muchow (1994) ارائه شده است، در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد بیان شده است که میزانR^2 باید بیش از ۶۰ درصد باشد، که این شرط در این مدل وجود دارد. بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی عملکرداستفاده کرد. تاکنون مدل WOFOST در پژوهش‌های پیش‌بینی عملکرد بسیاری استفاده شده است. Bafkar *et al*. (2011) پیش‌بینی‌های شایان پذیرشی را برای ذرت با استفاده از مدل WOFOST در منطقهٔ ماهیدشت کرمانشاه ارائه کرده است. در این آزمایش، شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب ۰/۹۹و۰/۹۶ به دست آمد که نشان‌دهندهٔ کارایی بالای این مدل در برآورد عملکرد ذرت است.

مادهٔ خشک کل

نتایج بررسی زیست‌توده در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان RMSE برای زیست‌تودهٔ کل ذرت دانه‌ای در سال نخست ۴/۲۴ و میزان شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۹۷ درصد و در سال دوم به ترتیب ۶/۲۶، ۰/۹۹و۰/۹۹ به دست آمد که نشانهٔ موفقیت مدل در پیش‌بینی روند تغییرپذیر زیست‌توده در هر دو سال بوده است.

جدول ۲. ارزیابی مدل WOFOST برای آزمایش نخست

Table 2. Evaluation of WOFOST model for the first field experiment

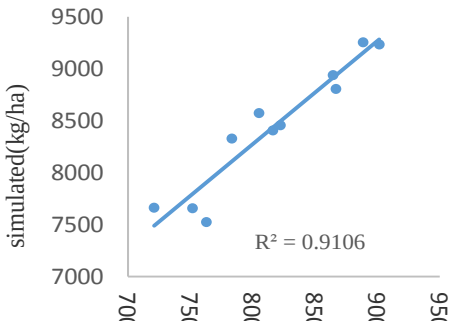
Variable	Simulated	Observed	RMSE (%)	E	D	ME	CRM
Grain yield (kg/ha)	8475.6	7933.3	9.06	0.99	0.98	12.14	0.28
Biomass (kg/ha)	9533.5	11261.3	4.24	0.97	0.77	3.92	0.15
Harvest Index	0.47	0.46	10.11	0.79	0.82	2.17	0.014

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدلWOFOST برای سال دوم

Table 3.Evaluation WOFOST model for second year

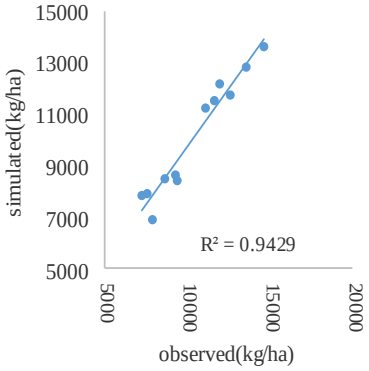
Variable	Simulated	Observed	RMSE (%)	E	D	ME	CRM
Grain yield (kg/ha)	8096.8	7933.3	8.85	0.91	0.91	25.5	0.018
Biomass (kg/ha)	10114.1	10423	6.26	0.99	0.99	10.03	0.029
Harvest Index	0.60	0.53	15.47	0.79	0.91	15.09	0.014

مقایسهٔ همبستگی زیست‌تودهٔ اندازه‌گیری‌شده و مقادیرشبیه سازی شده آن در ذرت نشان داد (شکل ۲) این شاخص برای مقادیر واقعی و شبیه سازی شده زیست توده به ترتیب در سال اول و دوم ۰/۹۴ و ۰/۸۳ بود. این نتایج نشان می‌دهد که برآورد مدل از مادهٔ خشک قابل قبول بوده است. به طوری که هرگاه همبستگی مناسبی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی مدل مشاهده شود، به معنی آن است که سازوکارها به‌خوبی توسط مدل توصیف شده‌اند (Ceglar & Kajfez-Bogataj, 2012).



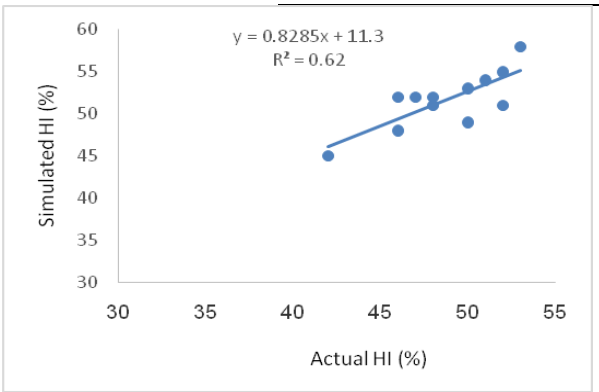
شکل ۱. خط رگرسیونی بین مقادیر شبیه سازی شده و واقعی مادهٔ خشک دانه

Figure 1. Regression line between simulated and observed values of dry matter



شکل ۲. خط رگرسیونی بین مقادیر شبیه سازی شده و واقعی زیست‌توده

Figure 2.Regression line between simulated and observed values of biomass



شکل ۳. رگرسیون مقادیر شبیه سازی و واقعی شاخص برداشت (درصد)

Figure 3. Regression line between simulated and observed values of harvest index (%)

شبیه سازی شاخص برداشت

نتایج شاخص برداشت پیش‌بینی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول ۱ نمایش داده شده است. میزان شاخص برداشت ضریبی از مادهٔ خشک تولیدی گیاه است. میزان RMSE=۱۰/۱۱ و میزان شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب

۰/۸۲ و ۰/۷۹ درصد در سال نخست به دست آمد.

برای سال دوم این مقادیر به ترتیب ۱۵/۴۷، ۰/۷۹و۰/۹۱ درصد به دست آمد. نتایج شاخص‌های آماری این مطلب را تأیید می‌کند که مدل WOFOSTشاخص برداشت را به‌خوبی برآورد می‌کند، به‌گونه‌ای که ضریب همبستگی شاخص برداشت در سال نخست برابر با ۰/۶۱ و در سال دوم۰/۵۹ درصد است. با برآورد دقیق شاخص برداشت می‌توان پیش‌بینی مناسبی از عملکرد دانه داشت، به‌گونه‌ای که Hammer & Muchow. (1994) در بررسی میزان خطرپذیری (ریسک)های اقلیمی بر تغییرپذیری تولید سورگوم دانه‌ای (*Sorghum bicolor*) بیان داشتند تغییرپذیری کوچک در شاخص برداشت تأثیر بالایی روی پیش‌بینی عملکرد دانه دارد.

Amiri & Rezaei (2009) مدل WOFOST را برای شبیه سازی رشدونمو برنج (*Oryza sativa* L.) استفاده کردند. بنا بر نتایج ارزیابی آماری و نگاره‌ای (گرافیکی) مدل به‌منظور شبیه سازی زیست‌تودهٔ کل، زیست‌تودهٔ خوشه و شاخص سطح برگ نتیجه گرفتند که مدل WOFOST در شبیه سازی زیست‌تودهٔ کل و زیست‌تودهٔ خوشه دقت مناسبی داشت، ولی شاخص سطح برگ را به‌خوبی شبیه سازی نمی‌کند. میزان ضریب تبیین زیست‌تودهٔ کل ۰/۹۸محاسبه شد به‌گونه‌ای که مقادیر شبیه سازی همخوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. Gharine *et al.* (2012) آزمایشی را در خوزستان با استفاده از مدل WOFOST انجام دادند.

نتایج بررسی‌ها نشان داد، این مدل عملکرد دانهٔ گندم را به‌خوبی شبیه سازی می‌کند، به‌گونه‌ای که میزان ضریب تبیین ۰/۹۱ به‌دست‌آمده که نشان‌دهندهٔ همخوانی مقادیر شبیه سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده بود. Kassi *et al.* (2014) با استفاده از نتایج موفقیت‌آمیز شبیه سازی عملکرد ذرت در اتیوپی، تأثیر تغییرپذیری اقلیمی بر تولید زیست‌توده و عملکرد را پیش‌بینی کردند، این پژوهشگران کارایی بالا و دقت مناسب مدل WOFOSTبرای شبیه سازی رشد و نمو ذرت را تأیید کردند.

Wu (2008) نیز کارایی بالای این مدل را برای شبیه سازی ، تولید مادهٔ خشک در مراحل پدیدشناختی ذرت گزارش کرد، در این پژوهش با استفاده از این مدل، عملکرد ظرفیت ذرت را در مناطق شمال چین پهنه‌بندی شد. قابل‌توجه است که شبیه سازی عملکرد و زیست‌توده در پژوهش‌های بالا اغلب در مناطق معتدله و تاریخ‌های کشت رایج انجام شده است. بااین‌حال کارایی مدل WOFOST در شرایط خاص کشت تابستانه در منطقهٔ جیرفت و برداشت در اواخر آذرماه شایان پذیرش بود.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی مدل، پیش‌بینی شایان پذیرشی از عملکرد مادهٔ خشک دانه و زیست‌توده و شاخص برداشت را نشان داد. البته این مدل مادهٔ خشک دانه و زیست‌تودهٔ کل را بهتر از شاخص برداشت شبیه سازی کرد. با توجه به نتایج همخوانی به نسبت خوب بین مقادیر همانندسازی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد مدل WOFOST در پژوهش‌های زراعی ذرت در منطقهٔ نیمه گرمسیری جنوب کرمان با الگوی کشت تابستانه قابل اعتماد است و از کارایی مناسبی برخوردار است.

REFERENCES

1. Allen, R. Overman Richard, V. & Scholtz, I. (2002). *Mathematical models of crop growth and yield.* University of Florida Gainesville, Florida, U.S.A. Marcel Dekker. 344pp.
2. Amiri, E. & Rezaei, M. (2009). Testing the modeling capability of ORYZA2000 under water-nitrogen limit conditions in Northern Iran. *World Applied Science Journal*, 6 (8), 1113-1122.
3. Bafkar, A., Boromandnasab, S., Behzad, M. & Farhadi Bansoule, B. (2011). Estimation of potential yield of grain maiz in Mahidasht Kermanshah using WOFOST, a crop growth simulation model. Iranian *Journal of Field Crop Research*, 42 (4), 799-808. (In Farsi)
4. Boogaard, H. L., vanDiepen, C. A., Rötter, R. P., Cabrera, J. M. C. A. & Van Laar, H.H. (1998). *User's guide for the WOFOST 7.1crop growth simulation model and WOFOST Control Center1.5*. Technical document 52, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, Netherlands. Calif. (USA): Addison-Wesley Publishing Company. 144pp.

5. Ceglar, A. & Kajfez-Bogataj, L. (2012). Simulation of maize yield in current and changed climatic conditions: Addressing modelling uncertainties and the importance of bias correction in climate model simulations. *European Journal of Agronomy*, 37, 83–95.
6. Dua, V. K., Govindakrishnan. P. M. & Singh, B. P. (2014). Calibration of WOFOST model for potato in India. *Potato Journal*, 41 (2), 105-112.
7. Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. & Dubrovsky, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Journal of Ecological Modeling*, 171: 223-246.
8. Gharineh, M., Bakhshandeh, A., Andrzyan, B. & Fayezizadeh, N. (2012). Agroclimatic zoning of Khuzestan province for potential yield wheat using WOFOST model. *Journal of Agroecology*, 4 (3): 255-264. (In Farsi).
9. Goudriaan, J. (1977). *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*. Simulation Monographs, Pudoc,Wageningen. 249pp.
10. Hammer, G. L. & Muchow, R. C. (1994). Assessing climatic risk to sorghum production in water limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model. *Field Crops Research*, 36, 221-234.
11. Hammer, G. L., Carberry, P. S. & Muchow, R. C. (1993). Modeling genotype and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research*, 33, 293-310.
12. Hayes, M. J. & Decker, W. L. (1996). Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing, 17, 3189–3200.*
13. Kalra, N., Chander, S., Pathak, H., Aggarwal, P. K., Gupta, N. C., Sehgal, M. & Chakarborty, D. (2008). Impact of climate change on agriculture. *Outlook on Agriculture*, 36, 109-118
14. Kassi, B. T., Van Ittersum, M. K., Hengsdijk, H., Asseng, S., Wolf, J. & Rötter, R. P. (2014). Climate-induced yield variability and yield gaps of maize (*Zea mays* L.) in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Field Crops Research*, 160, 41–53.
15. Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G. & Tomei, F. (2007).Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and numerical model. *Agriculture and Forest Meteorology*, 147(1), 71-79.
16. Monteith, J. L. (1981). Climatic variation and the growth of crops. *Meteorological Science*, 107 (546), 749–774.
17. Nassiri Mahalati, M., Koocheki, A., Kamali, G. A. & Shahandeh, H. (2006). Potential impact of climate change on rain fed wheat production in Iran. *Agronomy and Soil Science*, 52, 113-124.
18. Nasiri Mahallati, M. (2008). *Modeling potential crop growth* process. Mashhad University Press. 280pp (In Farsi).
19. Rinaldy M. L., Losavio, N. & Flagella, Z. (2003). Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*. 78, 17-30.
20. Singh, A. K., Tripathy, R. & Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERES Wheat and Crop System models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776-786.
21. Taei Semiromi, J., Ghanbari, A., Amiri, E., Ghaffari, A. A., Syahsar, B. & Ayoubi, Sh. (2013). Agro ecological zoning of wheat in the Borujen Watershed: Rianfed and irrigated wheat cropping System Evaluation. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, 22 (4), 1-12. (In Farsi)
22. Van Keulen, H. & Wolf, J. (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation Monographs*. Wageningen. The Netherlands. 479pp.
23. Walpole, R. E., Myers, R. M. & Myers, S. L. (1998). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists.* (6th ed) New Jersey: Prentice Hall International.823pp.
24. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *American Meteorology Society*. 63: 1309-1313.
25. Wolf, J. & Van Diepen, C. A. (1994). Effects of climate change on silage maize production potential in the European Community. *Agriculture and Forest Meteorology*, 71 (1/2), 33-60.
26. Wolf, J., Mandryk, M., Kanellopoulos, A., Oort, P.V., Schaap, B., Reidsma, P. & Ittersum, M. V. (2010). *Methodologies for analyzing future farming systems and climate change impacts in Flevoland as applied within the AgriAdapt project*. Wageningen University and Research Centre, Wageningen. 108pp.
27. Wolfram, S. (1991). *Mathematica: a system for doing mathematics by computer* (2nd Ed.). Addison Wesley Longman Publishing Co., Redwood City, CA, USA. 961pp.
28. Wu, D., (2008). Impact of spatial- temporal variations of climatic variables on summer maize yield in North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 24 (3), 226-235.