

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

مهین افزالی^۱، جواد طایی سمیرومی^{۲*} و مهدیه امیری نژاد^۳

۱. دانشجوی آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، ۲ و ۳. 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 فراسنج (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 ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ در منطقه 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، ماده خشک در هر مرحله، عملکرد و زیست‌توده از یک آزمایش مزرعه‌ای که به‌منظور مقایسه رقم‌ها و تاریخ‌های گوناگون کشت انجام گرفته بود، ثبت شد. در مرحله بعد، مدل بر پایه 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 و ۰/۸۲ بود که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده است. به‌طور کلی نتایج ارزیابی مدل WOFOST نشان داد، این مدل کارایی بالایی در شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری منطقه جیرفت داشت و این نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی خوبی داشت.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کشت، ذرت (*Zea mays L.*)، فنولوژی، ماده 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 Afzali¹, Javad Taei Semiromi^{2*} and Mahdiah Amirinezhad³

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: jtai.90@gmail.com

مقدمه

یکی از سیاست‌های بخش کشاورزی استفاده 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). با توجه به اینکه دستیابی به روش‌های شناسایی و مدیریت عامل‌های محدودکننده 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، به صورت قابل توجهی 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 تجزیه و تحلیل می‌کنند (Hammer *et al.*, 1993; Kalra *et al.*, 2008; Dua *et al.*, 2014).

یکی از مدل‌های شبیه سازی رشد گیاه که در طول دو دهه گذشته به صورت گسترده‌ای در بررسی‌های گوناگون استفاده شده، مدل^۱ WOFOST است (Boogard *et al.*, 1998). این مدل در دانشگاه واخنینگن هلند تکامل یافته است. مدل WOFOST در واقع 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 اتحادیه اروپا بر پایه 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*) 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 al.*, 2006) با استفاده از WOFOST تأثیر تغییر اقلیم را بر تولید گندم در استان خراسان بررسی کردند. (Taei samiroimi *et al.*, 2013) کارایی این مدل را برای ارزیابی سامانه‌های دیم و آبی تولید گندم در منطقه 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 رقم ۷۰۴ در منطقه ماهیدشت کرمانشاه با استفاده از مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد گیاه پیش‌بینی کرد.

کشت تابستانه 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 علوفه سیلویی یا در اواخر آذرماه برای تولید دانه برداشت می‌شود. با توجه به اینکه برای الگوی کشت تابستانه

1. World Food Studies (WOFOST)

خاموشی نور در سایه‌انداز است (Boogaard *et al.*, 1998).

پایگاه داده‌های ورودی مدل

۱- داده‌های اقلیمی: فراسنجه‌های اقلیمی مورد استفاده شامل: دمای کمینه و بیشینه روزانه، بارش روزانه، رطوبت نسبی هوا، پتانسیل تبخیر، ساعت‌های آفتابی روزانه و تبخیر و تعرق حقیقی. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی میانه جیرفت برای دو سال اجرای آزمایش دریافت شدند. ۲- داده‌های خاک: عامل‌های خاک موردنیاز برای مدل شامل: بافت خاک، نقطه پژمردگی، وضعیت اشباع، ظرفیت زراعی، وزن ویژه ظاهری، ماده 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 انجام‌شده داده‌های گیاهی: داده‌های موردنیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از آزمایش‌های مزرعه‌ای که در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۱ به‌منظور مقایسه 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 اندازه‌گیری‌شده رشد گیاه زراعی، مشاهده‌های مراحل پدیدشناختی و دیگر فراسنجه‌های اندازه‌گیری‌شده از داده‌های گوناگون آزمایش انجام گرفت (Wolf & Van Diepen, 1994). کارایی مدل WOFOST در برآورد عملکرد ماده خشک گیاه ذرت در مراحل رشد با استفاده از به‌کارگیری شاخص‌های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی (E)، شاخص سازگاری (D)، بیشینه خطا (ME) و ضریب باقی‌مانده (CRM) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی شد.

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

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 درزمینه 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 منطقه جیرفت است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دانشگاه جیرفت در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۲ اجرا شد. منطقه مورد بررسی، دشت جیرفت با ارتفاع کمتر از ۶۰۰ متر از سطح دریا (طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی) است که اقلیمی خشک، با زمستان ملایم و تابستان بسیار گرم بر پایه روش سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد (UNESCO, 1979) دارد.

در این پژوهش برای پیش‌بینی پتانسیل عملکرد ذرت از نسخه 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 پایه ویژگی‌های گیاهی، فراسنجه (پارامتر)‌های روزانه هواشناسی و ویژگی‌های خاک شبیه سازی کند (Boogaard *et al.*, 1998). در مدل WOFOST رشد گیاهان بر پایه فرآیندهای اکوفیزیولوژیک شبیه سازی می‌شود، این برنامه ماده خشک گیاه را به‌عنوان تابعی از تابش، دما و ویژگی‌های گیاه در مراحل زمانی یک روز همانندسازی می‌کند. اصول محاسبه تولید ماده خشک، سرعت ناخالص جذب CO₂ توسط سایه‌انداز است که به انرژی تابشی جذب‌شده بستگی دارد که تابعی از تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب

رابطه ۱.

شاخص بیشینه خطا (ME)، بیشینه 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).

رابطه ۵.

$$ME = \text{Max} \frac{100}{M} |S_i - M_i|$$

شاخص جرم باقی مانده (CRM) نشانگر مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه گیری ها است. در حالت مطلوب که مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده با هم برابر باشند مقادیر عددی CRM, ME, RMSE برابر با صفر و میزان E و d برابر ۱ خواهند بود (Walpole et al., 1998).

رابطه ۶.

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

برازش رابطه ها و انجام محاسبات آماری، با استفاده از نرم افزار Excel و SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل WOFOST

بنا بر نتایج این پژوهش و دیگر آزمایش های انجام گرفته در منطقه، فراسنجه های گوناگون مدل WOFOST بررسی شدند (جدول-۱). و برخی از فراسنجه های 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)، بهره وری از تبدیل به برگ (CVL)، بهره وری از تبدیل به ریشه (CVR)، بهره وری از تبدیل به ساقه (CVS)، با استفاده از داده ها واسنجی شد. با تغییر ضریب

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

که در این رابطه ها (رابطه های ۱ تا ۶) M_i و S_i ترتیب مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده، n شمار مشاهده ها، \bar{M}_{avr} میانگین کل مقادیر واقعی است. توان پیش بینی مدل در صورتی که میزان RMSE کمتر از ۱۰ درصد، عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد ضعیف برآورد شد (Rinaldy, et al., 2003)، می توان این شاخص را با استفاده از رابطه (۲) بر پایه کیلوگرم در هکتار نیز گزارش کرد.

رابطه ۲.

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

شاخص سازگاری (D) یک فراسنجه توصیفی است که میزان آن $-\infty$ تا $+\infty$ تغییر می کند (Eitzinger et al., 2004). هرچه میزان D به یک نزدیک تر باشد، مدل کاراتر است و شبیه سازی موفق تر بوده است (Singh, 2008; Eitzinger et al., 2004; et al., 2008).

رابطه ۳.

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

ضریب کارایی (E) بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه سازی شده از اندازه گیری شده به انحراف مقادیر اندازه گیری شده از مقادیر میانگین است. میزان E بین $-\infty$ تا $+\infty$ متغیر است. هرچه میزان آن به یک نزدیک تر باشد، مدل کاراتر است و مقادیر شبیه سازی شده قابل اطمینان تر است (Willmoot, 1982).

رابطه ۴.

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

انجام شد و نتایج در جدول‌های ۳ و ۲ ارائه شده است. شبیه سازی عملکرد ماده خشک دانه: کارایی مدل در برآورد میزان عملکرد دانه ذرت در زمان برداشت با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی شد. جدول (۲) ارائه‌دهنده شاخص‌های آماری محاسبه شده برای تعیین دقت مدل برای سال نخست است. دقت و درستی مدل به ترتیب با مقادیر $RMSE=9/06$ ، $D=0/98$ و $ME=12/14$ در سال نخست به دست آمد.

واسنجی مدل یا فراسنجه‌های مدل، اساس بهترین همخوانی نتایج شبیه سازی شده با مقادیر مشاهده شده ضریب‌های واسنجی به صورت مقادیر گزارش شده در جدول ۱ به دست آمد.

نتایج ارزیابی مدل

ارزیابی مدل واسنجی شده بر پایه فراسنجه‌های بالا و متغیرهای عملکرد، زیست‌توده و شاخص برداشت

جدول ۱. فراسنجه‌های اصلاح شده برای واسنجی مدل WOFOST.

Table 1. Modified parameters for calibration of WOFOST model.

Cultivar	BC404	SC500	SC666	G3393
Model parameter				
(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

شده است. Bafkar *et al.* (2011) پیش‌بینی‌های شایان پذیرشی را برای ذرت با استفاده از مدل WOFOST در منطقه ماهیدشت کرمانشاه ارائه کرده است. در این آزمایش، شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب $0/96$ و $0/99$ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بالای این مدل در برآورد عملکرد ذرت است.

ماده خشک کل

نتایج بررسی زیست‌توده در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان $RMSE$ برای زیست‌توده کل ذرت دانه‌ای در سال نخست $4/24$ و میزان شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب $0/77$ ، $0/97$ درصد و در سال دوم به ترتیب $6/26$ ، $0/99$ و $0/99$ به دست آمد که نشانه موفقیت مدل در پیش‌بینی روند تغییرپذیر زیست‌توده در هر دو سال بوده است.

این مقادیر برای سال دوم نیز به ترتیب $8/85$ ، $0/91$ و $-0/18$ به دست آمد. میزان ضریب تبیین (R^2) به دست آمده از تجزیه رگرسیون خطی توابع بین مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده در سال نخست و دوم ($R^2=0/91$) به دست آمد. به‌طور کلی مدل عملکرد دانه ذرت را به خوبی پیش‌بینی کرد. نتایج نشان‌دهنده همخوانی خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده است. بنابراین این مدل کارایی مناسب برای پیش‌بینی عملکرد دارد، زیرا بر پایه آنچه توسط Hammer & Muchow (1994) ارائه شده است، در به کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد بیان شده است که میزان R^2 باید بیش از ۶۰ درصد باشد، که این شرط در این مدل وجود دارد. بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد استفاده کرد. تاکنون مدل WOFOST در پژوهش‌های پیش‌بینی عملکرد بسیاری استفاده

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

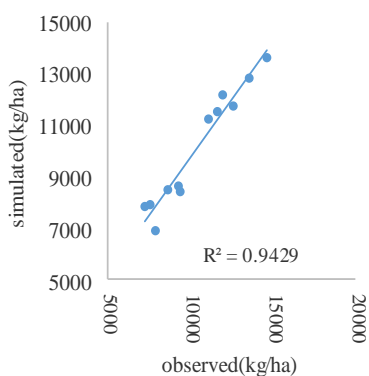
جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل WOFOST برای سال دوم

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

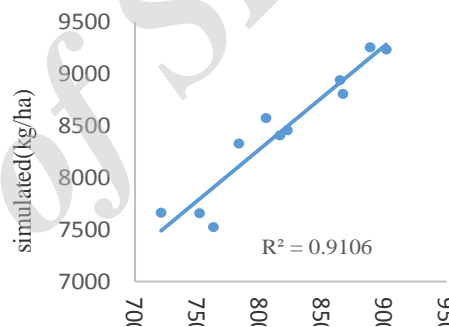
خشک قابل قبول بوده است. به طوری که هرگاه همبستگی مناسبی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی مدل مشاهده شود، به معنی آن است که سازوکارها به‌خوبی توسط مدل توصیف شده‌اند (Ceglár & Kajfez-Bogataj, 2012).

مقایسه همبستگی زیست‌توده اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه 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 ماده



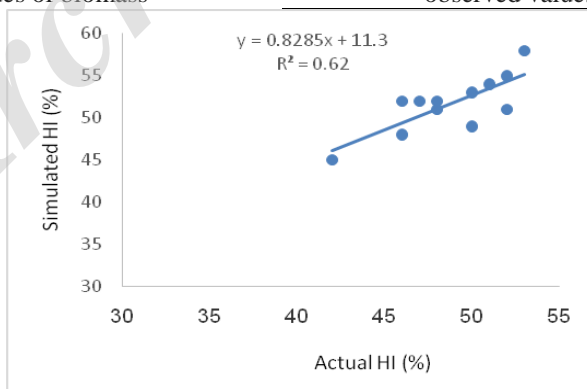
شکل ۲. خط رگرسیونی بین مقادیر شبیه سازی شده و واقعی زیست‌توده

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



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

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



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

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

شده است. میزان شاخص برداشت ضریبی از ماده خشک تولیدی گیاه است. میزان $RMSE=10/11$ و میزان شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به ترتیب

شبیه سازی شاخص برداشت نتایج شاخص برداشت پیش‌بینی شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول ۱ نمایش داده

همخوانی مقادیر شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده بود. Kassı et al. (2014) با استفاده از نتایج موفقیت آمیز شبیه سازی عملکرد ذرت در اتیوپی، تأثیر تغییرپذیری اقلیمی بر تولید زیست توده و عملکرد را پیش بینی کردند، این پژوهشگران کارایی بالا و دقت مناسب مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد و نمو ذرت را تأیید کردند.

Wu (2008) نیز کارایی بالای این مدل را برای شبیه سازی، تولید ماده خشک در مراحل پدیدشناختی ذرت گزارش کرد، در این پژوهش با استفاده از این مدل، عملکرد ظرفیت ذرت را در مناطق شمال چین پهنه بندی شد. قابل توجه است که شبیه سازی عملکرد و زیست توده در پژوهش های بالا اغلب در مناطق معتدله و تاریخ های کشت رایج انجام شده است. باین حال کارایی مدل WOFOST در شرایط خاص کشت تابستانه در منطقه جیرفت و برداشت در اواخر آذرماه شایان پذیرش بود.

نتیجه گیری

به طور کلی مدل، پیش بینی شایان پذیرشی از عملکرد ماده خشک دانه و زیست توده و شاخص برداشت را نشان داد. البته این مدل ماده خشک دانه و زیست توده کل را بهتر از شاخص برداشت شبیه سازی کرد. با توجه به نتایج همخوانی به نسبت خوب بین مقادیر همانندسازی با مقادیر اندازه گیری شده می توان نتیجه گرفت که کاربرد مدل WOFOST در پژوهش های زراعی ذرت در منطقه نیمه گرمسیری جنوب کرمان با الگوی کشت تابستانه قابل اعتماد است و از کارایی مناسبی برخوردار است.

۰/۸۲ و ۰/۷۹ درصد در سال نخست به دست آمد. برای سال دوم این مقادیر به ترتیب ۱۵/۴۷، ۰/۷۹ و ۰/۹۱ درصد به دست آمد. نتایج شاخص های آماری این مطلب را تأیید می کند که مدل WOFOST شاخص برداشت را به خوبی برآورد می کند، به گونه ای که ضریب همبستگی شاخص برداشت در سال نخست برابر با ۰/۶۱ و در سال دوم ۰/۵۹ درصد است. با برآورد دقیق شاخص برداشت می توان پیش بینی مناسبی از عملکرد دانه داشت، به گونه ای که Hammer & Muchow (1994) در بررسی میزان خطرپذیری (ریسک) های اقلیمی بر تغییرپذیری تولید سورگوم دانه ای (*Sorghum bicolor*) بیان داشتند تغییرپذیری کوچک در شاخص برداشت تأثیر بالایی روی پیش بینی 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 نگاره ای (گرافیکی) مدل به منظور شبیه سازی زیست توده کل، زیست توده خوشه و شاخص سطح برگ نتیجه گرفتند که مدل WOFOST در شبیه سازی زیست توده کل و زیست توده خوشه دقت مناسبی داشت، ولی شاخص سطح برگ را به خوبی شبیه سازی نمی کند. میزان ضریب تبیین زیست توده کل ۰/۹۸ محاسبه شد به گونه ای که مقادیر شبیه سازی همخوانی خوبی با مقادیر اندازه گیری شده داشت. Gharine et al. (2012) آزمایشی را در خوزستان با استفاده از مدل WOFOST انجام دادند.

نتایج بررسی ها نشان داد، این مدل عملکرد دانه گندم را به خوبی شبیه سازی می کند، به گونه ای که میزان ضریب تبیین ۰/۹۱ به دست آمده که نشان دهنده

REFERENCES

- 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.
- 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.
- Bafkar, A., Boromandnasab, S., Behzad, M. & Farhadi Bansoule, B. (2011). Estimation of potential yield of grain maize in Mahidasht Kermanshah using WOFOST, a crop growth simulation model. *Iranian Journal of Field Crop Research*, 42 (4), 799-808. (In Farsi)
- 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 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5*. 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., Andriyan, B. & Fayeziadeh, 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: Rainfed 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.