Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

CC BY

Research Article
Vol. 14, No. 4, Winter 2023, p. 601-615

Calibration and Validation of WOFOST Model for Predicting the Phenology and Yield in Potato (Solanum tuberosum L.) Growing Regions in Iran

Mojtaba Torkaman[1], Mehdi Nassiri Mahallati[2*] and Alireza Koocheki[2]

Received: 13-06-2015
Revised: 03-10-2015
Accepted: 27-10-2015
Available Online: 27-10-2015

How to cite this article:
Torkaman, M., Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A., 2023. Calibration and validation of WOFOST model for predicting the phenology and yield in potato (Solanum tuberosum L.) growing regions in Iran. Journal of Agroecology 14(4): 601-615.
DOI: 10.22067/jag.v1i1.47502

Introduction

Food and Agriculture Organization of the united nations (FAO) stated potato as a product supplier in the world's future food security and Iran with an annual production of 5 million tons of potatoes ranked eleventh in the world's total production. Future climate change may have strong influence on field crops including potato and evaluation of these effects is of great importance. Crop simulation models are known as powerful tools to study crop responses to the future climatic scenarios. However, such models should be calibrated and validated for local conditions before using in climatic studies at regional scale. WOFOST (WOrld FOod STudies) is a well- known crop simulation model and during the past two decades has been widely used in various studies. Simulation method of WOFOST is based on leaf photosynthesis and the assimilates are converted to dry matter of different plant organs using specific conversion factors, after subtraction of the calculated values of maintenance and growth respiration. The model also simulated phenological stages of crop based on accumulated degree days. For simulation of potential yield WOFOST inputs are daily weather data and crop specific parameters. In previous studies WOFOST model was calibrated for several crops such as wheat, corn and sugar beet in different parts of Iran but not for potato. The aim of this study was to calibrate and statistically validate the WOFOST model for predicting phenology and tuber yield of potato under potential growth conditions in different climatic regions of Iran.

Materials and Methods

Yield, phenological and weather data of major potato production regions of Iran (Hamedan, Ardabil, Isfahan, Ghorveh, Shiraz, Jiroft, Mashhad, Gorgan and Dezful) covering wide range of climatic conditions were collected from official databases and field observations for 5 years (2010-2014). The model was calibrated under potential production conditions for semi-late varieties (e.g. Agria) with the dataset of 3 years and the remaining 2-year data was used for model validation. Calibration was conducted using FSEOPT sub-program which optimizes the model parameters with the lowest deviation between measured and simulated yield and phenological variables.

Predicted results of yield and phenological stages were tested against observed values during model validation. The model performance was statistically evaluated using coefficient of determination (R^2), t-

1- Ph.D. in Crop Ecology, Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Expert of Hamedan Meteorology Office, Iran.
2- Professor, Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
(*- Corresponding author's Email: mnassiri@um.ac.ir)

test, root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (RMSEn), maximum error (ME) and coefficient of efficiency (E).

Results and Discussion

During the ccalibration, fewmodel parameters and functions including thermal time from emergence to initiation of flowering (TSUM1), thermal time from initiation of flowering to maturity (TSUM2), specific leaf area as a function of development stage (SLATB), lower threshold temperature for ageing of leaves (TBASE), maximum leaf CO_2 assimilation rate as a function of development stage of the crop (AMAXTB) and air temperature affecting photosynthetic rate (TMPFTB) was amended. It should be noted that for regions with cold summers such as Ardabil, Oromieh or Sarab TSUM2 was set at 1580 °Cd which is relatively lower than 1789 °Cd used for other parts of the country. Validation of model with independent data showed a great compliance of simulation results with field observations. Average simulated tuber yield over all regions and the studied period was 52061 kg ha^{-1} that was reasonably close to the mean observed potato tuber yield of 50650 kg ha^{-1} and the same was obtained for phenological variables. RMSE for tuber yield was 2933 kg ha^{-1} and for time to emergence, flowering and physiological maturity were estimated as 1.6, 3.2 and 6.4 days, respectively. RMSEn for phenological stages such as days to emergence, flowering, physiological maturity and tuber yield were 9.5, 8.3, 5.6 and 5.8%, respectively showing good model accuracy.

Conclusion

Based on the results the WOFOST model will be able to simulate the yield and phenological stages of potato with an acceptable performance at different regions of Iran. The calibrated model can be successfully used for climate change impact studies and yield gap analysis of potato under wide range of climatic conditions over country. However, it seems that the model should be also assessed for other potato cultivars with different growth habits.

Keywords: Coefficient of model efficiency, Modelling, Phenological stages, Potential conditions, Statistical indices.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در ایران

مجتبی ترکمان [۱*]، مهدی نصیری محلاتی [۲] و علیرضا کوچکی [۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۷/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۵

ترکمان، م.، نصیری محلاتی، م.، و کوچکی، ع.، ۱۴۰۱. واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در ایران. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۴): ۶۱۵-۶۰۱.

چکیده

مدل WOFOST یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو در گیاهان می‌باشد که رشد، فنولوژی و عملکرد گیاه را به‌صورت روزانه در شرایط پتانسیل، کمبود آب و کمبود مواد غذایی شبیه‌سازی می‌کند. در این مطالعه، به‌منظور واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای ارقام نیمه-دیررس سیب‌زمینی(*Solanum tuberosum* L.) در شرایط پتانسیل از داده‌های روزانه هواشناسی، اطلاعات فنولوژیکی و عملکرد در مناطق همدان، اردبیل، اصفهان، قروه، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاهرود و دزفول طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ استفاده گردید. مراحل مختلف فنولوژیکی رشد (شامل کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گل‌دهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی) با استفاده از مشاهدات عینی در مزرعه تعیین و بر اساس دمای هوا مقدار درجه-روز رشد مورد نیاز برای تکمیل هر مرحله محاسبه شد و برای واسنجی و تعیین اعتبار پارامترهای گیاهی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مدل با داده‌های سه سال واسنجی گردید و پس از آن ضرایب مدل به‌منظور انطباق با شرایط مختلف اقلیمی کشور برای مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده تغییر یافت و سپس با داده‌های دو سال تعیین اعتبار شد. برای ارزیابی دقت مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد غده و مراحل فنولوژیکی زمان (سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی) از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، آزمون t، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (RMSEn)، حداکثر خطا (ME) و ضریب کارآیی(E) استفاده گردید که همگی مطابقت نتایج شبیه‌سازی مدل با مشاهدات مزرعه‌ای را نشان دادند. نتایج نشان داد که جذر میانگین مربعات خطای مدل برای مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی به‌ترتیب ۱/۶، ۲/۳ و ۶/۴ روز و برای عملکرد غده ۲۹۳۳ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. همچنین جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی و عملکرد غده به‌ترتیب ۹/۵، ۸/۳، ۵/۶ و ۵/۸ درصد محاسبه گردید که نشان‌دهنده درجه ناچیز خطای مدل بود. بر اساس نتایج حاصله مدل قادر خواهد بود عملکرد و مراحل فنولوژیکی را در مناطق مختلف ایران در حد مطلوب شبیه‌سازی نماید. با این‌حال، پیشنهاد می‌شود مدل برای سایر ارقام با تیپ رشدی متفاوت نیز ارزیابی گردد.

۱- دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، کارشناس اداره کل هواشناسی همدان، ایران.
۲- استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: mnassiri@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jag.v1i1.47502

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های آماری، شرایط پتانسیل، ضریب کارایی مدل، مدلسازی، مرحله فیزیولوژیکی

مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) بعد از ذرت (*Zea mays L.*)، گندم (*Triticum aestivum L.*) و برنج (Oryza sativa *L.*) چهارمین محصول زراعی از نظر ارزش غذایی محسوب می‌شود (Fabeiro et al., 2001). سازمان خوار و بار و کشاورزی جهانی (فائو[1]) سیب‌زمینی را یک محصول تأمین‌کننده امنیت غذایی آینده در دنیا معرفی نموده که به‌علت انعطاف‌پذیری اکولوژیکی زیاد در سراسر جهان پراکنده شده است و ایران با داشتن اقلیمی متنوع و با تولید سالانه پنج میلیون تن سیب‌زمینی در رتبه یازدهم تولید این محصول در جهان قرار دارد (FAOSTAT, 2012).

اقلیم جهانی در حال تغییر است و تغییرات آب و هوا در آینده تأثیرات زیادی بر تولید سیب‌زمینی خواهد داشت، لذا ارزیابی اثرات آب و هوا بر تولید این محصول ضروری می‌باشد (Singh et al., 2010)، بدین منظور یک مدل رشد محصول که قادر به شبیه‌سازی الگوی رشد و امکان بررسی تداخل اثرات متقابل شرایط زیست‌محیطی را داشته باشد بسیار مفید خواهد بود (Wolf & Oijen, 2002). طی چند دهه گذشته مدل‌های متعددی به‌منظور شبیه‌سازی مراحل رشد و تولید گیاهان زراعی، اثرات متغیرهای آب و هوایی و مدیریت آب و مواد غذایی در جهت استفاده بهینه از منابع موجود توسط محققین دانشگاه واگنینگن هلند معرفی و توسعه یافته‌اند (Kalra Wu, 2008 ; et al., 2007; Richter & Semenove, 2005). که تعدادی از آن‌ها از قبیل SUCROS، ORYZA، INTERCOM و WOFOST در مطالعات مختلف زراعی در جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Van Ittersum et al., 2003).

یکی از مدل‌هایی که طی دو دهه گذشته به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته مدل WOFOST می‌باشد (Wu, 2008Hengsdijk et al., 1999 ;). مدل WOFOST[2] در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واگنینگن هلند و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واگنینگن ایجاد گردید. مدل WOFOST توسط فان‌کولن و وولف (Van Keulen & Van Diepen, 1990) طراحی شده است که در ابتدا به‌عنوان مدل شبیه‌سازی رشد گیاه برای ارزیابی عملکرد پتانسیل گیاهان مختلف در کشورهای استوایی توسعه یافته است. از دیگر قابلیت‌های این مدل ارزیابی عملکرد پتانسیل نسبت به عوامل مؤثر بر رشد گیاه، تعیین فاکتورهای حساس پیش‌بینی عملکرد محصول و نیاز آبی گیاه با توجه به پیش‌بینی‌های هواشناسی است. در میان مدل‌هایی که از داده‌های روزانه آب و هوایی، خاک و گیاه به‌عنوان ورودی استفاده می‌کنند، مدل WOFOST دارای توانایی خوبی جهت استفاده در آنالیز ریسک و تولید یک محصول زراعی در شرایط اقلیمی خاص می‌باشد (Tsuji et al., 1998). با این‌حال، اغلب مدل‌های اقلیمی کشاورزی در صورت استفاده در محلی به غیر از محل ساخته شدن آن‌ها از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند. بنابراین، پیش از به‌کارگیری این مدل‌ها در مطالعات لازم است تا با داده‌های فنولوژی و عملکرد، توانایی مدل در تخمین مراحل رشد و عملکرد گیاه در شرایط جدید افزایش یابد و نسبت به واسنجی پارامترهای مدل اقدام گردد (Hoogenboom et al., 1999). این عمل معمولاً با اجرای مدل، تصحیح پارامترها و ضرایب جهت اصلاح نتایج نادرست و تکرار این عمل تا حصول نتیجه مطلوب دنبال می‌شود (Wolf, 2003).

مدل WOFOST در سیستم پایش رشد گیاهی[3] برای تخمین عملکرد برخی گیاهان مختلف نظیر گندم، جو (*Hordeum vulgare L.*)، پنبه (*Gossypium herbaceum* L.)، آفتابگردان (*Helianthus annuus L.*)، برنج، سویا (*Glycine max L.*)، سیب زمینی و دانه‌های روغنی در اتحادیه اروپا مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این سیستم مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[4] متصل می‌گردد (Boogaard et al., 2002). ایتزینگر و همکاران (Eitzinger et al., 2004) با بررسی سه مدل CERES، SWAP و WOFOST برای شبیه‌سازی رشد و نمو، جو و گندم در شرایط لایسیمتری در سه نوع خاک نشان دادند که مدل‌های CERES و SWAP نسبت به مدل WOFOST عملکرد را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند.

کاتالن و همکاران (Catalin et al., 2009) با بررسی سازگاری

1- Food and Agriculture Organization
2- World food studies
3- Crop Growth Monitoring System
4- Geographic Information System

مدل WOFOST برای شرایط رومانی نشان دادند که می‌توان از این مدل برای تحقیقات ویژه مثل بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی روی عملکرد استفاده کرد. همچنین WOFOST برای مطالعات ارزیابی اثر تغییر شرایط اقلیمی بر رشد محصول مورد استفاده قرار گرفته است (Wolf & Diepen, 1994).

علی‌رغم کاربردهای فراوان مدل مذکور در جهان متاسفانه این مدل در ایران چندان مورد استفاده قرار نگرفته و محدود به فعالیت‌های تحقیقاتی ارائه شده توسط کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2006) بر روی گندم دیم، امیری و همکاران (Amiri et al., 2011) بر روی برنج و بافکار و همکاران (Bafkar et al., 2011) بر روی ذرت و فرهادی بانسوله (Farhadi Bansouleh, 2009) بر روی جو می‌باشد. جهت استفاده کاربردی مدل در ایران نیاز مبرم به انجام مطالعات تحقیقاتی بیشتر در مناطق مختلف کشور می‌باشد. یکی از عوامل محدودکننده استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه در کشوری مثل ایران نیاز به فعالیت‌های مزرعه‌ای جهت اندازه‌گیری و یا واسنجی برخی پارامترهای گیاهی این مدل‌ها می‌باشد (Farhadi Bansouleh, 2009).

با توجه به اینکه تاکنون گزارشی در زمینه به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی رشد سیب‌زمینی مخصوصاً مدل WOFOST در ایران منتشر نشده است، لذا هدف از این مطالعه معرفی، بررسی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی WOFOST در شرایط مختلف اقلیمی ایران جهت پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد محصول سیب‌زمینی در شرایط پتانسیل می‌باشد تا بر اساس یافته‌های آن بتوان رشد و نمو گیاه سیب‌زمینی را در مناطق اصلی تولید آن با استفاده از این مدل شبیه‌سازی گردد.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها: به‌منظور واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST در شرایط پتانسیل از داده‌های روزانه فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی (ارقام نیمه دیررس نظیر آگریا، ساتینا، آئولا، باراکا و دیامانت) ثبت شده در ایستگاه‌های تحقیقات هواشناسی کشاورزی و گزارش نهایی طرح‌های تحقیقاتی مراکز تحقیقات کشاورزی و همچنین کشاورزانی که دارای عملکرد مطلوب بوده و سابقه کشت این محصول را به‌مدت ۱۵ سال داشتند در مناطق همدان، اردبیل، اصفهان، قروه، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاهرود و دزفول که مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی کشور (جدول ۱) محسوب می‌شوند، طی سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۹ و به‌مدت پنج سال جمع‌آوری و استفاده شد. بدین ترتیب بانکی از عملکردها، تاریخ‌های کاشت و مراحل فنولوژیکی کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گل‌دهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی برای هر منطقه مطالعاتی (۱۰ ایستگاه) تهیه و تنظیم گردید. انتخاب مناطق بر اساس میانگین درصد سطح زیر کشت و عملکرد هر استان از تولید سیب‌زمینی کشور طی سال‌های ۹۰-۱۳۷۴ بود. از ۱۰ استانی که بالاترین درصد تولید را داشتند مناطق (ایستگاه) مذکور انتخاب شدند (جدول ۱). داده‌های فنولوژی و عملکرد در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ به‌منظور واسنجی و داده‌های سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای اعتبارسنجی مدل به‌کار گرفته شدند. در این مطالعه، مجموع درجه حرارت روزانه از سبز شدن تا گل‌دهی ($TSUM_1$) و مجموع درجه حرارت گل‌دهی تا رسیدگی ($TSUM_2$) به‌طور مستقیم بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای، تحقیقات و گزارش‌های نهایی طرح‌های پژوهشی تعیین شد و مقادیر آن‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی که جزیی از داده‌های ورودی مدل است محاسبه و وارد مدل شدند.

در این مطالعه، منظور از عملکرد پتانسیل این است که آب و مواد غذایی بدون محدودیت در اختیار گیاه است و رشد و نمو در شرایط کنترل بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز صورت می‌گیرد، در این شرایط تولید محصول تابع شرایط آب و هوایی (درجه حرارت، تشعشع و غیره) و خصوصیات ژنتیکی گیاه می باشد.

داده‌های اقلیمی: پارامترهای روزانه هواشناسی (بارندگی، درجه حرارت حداکثر، درجه حرارت حداقل، ساعات آفتابی، سرعت باد و رطوبت نسبی) طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک شهرستان‌های مذکور (جدول ۱) از بانک داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. این ایستگاه‌ها پوشش کاملی از شرایط اقلیمی شهرهای تولیدکننده سیب‌زمینی در کشور را فراهم ساخته و معرف وضعیت عمومی هر منطقه می باشند. جهت برآورد میزان تشعشع روزانه در ایستگاه‌های مختلف هواشناسی کشور از روش خودریان (Goudriaan, 1993) استفاده شد. لازم به ذکر است این روش تشعشع روزانه و طول روز را بر اساس عرض جغرافیایی منطقه محاسبه می‌کند.

جدول ۱- میانگین درصد سطح زیر کشت و سهم تولید سیب‌زمینی در مهم‌ترین استان‌های تولیدکننده (ایستگاه) درکشور طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۷٤

Table 1- Mean percentage of cultivated area and production share in the most important potato producing provinces (station) in Iran from 1995-2011

ردیف No.	استان Province (station)	سطح Area (percentage)	عملکرد Yield (percentage)	ردیف No.	استان Province (station)	سطح Area (percentage)	عملکرد Yield (percentage)
1	همدان (همدان) Hamedan (Hamedan)	12.2 (6.8)	16.9 (9.8) *	6	جنوب کرمان (جیرفت) South Kerman (Jiroft)	5.6 (3.2)	4.8 (2.8)
2	اردبیل (اردبیل) Ardabil (Ardabil)	12.5 (10.9)	15.1 (11.5)	7	خراسان رضوی (مشهد) Khorasan Razavi (Mashhad)	3.3 (0.5)	3.6 (0.5)
3	اصفهان (اصفهان) Isfahan (Isfahan)	11.5 (0.6)	11.1 (1)	8	گلستان (گرگان) Golestan (Gorgan)	4.3 (3.2)	3.3 (2.5)
4	کردستان (قروه) Kordestan (Ghorveh)	5.5 (4.3)	6.5 (5.1)	9	سمنان (شاهرود) Semnan (Shahrood)	3.5 (2.8)	2.7 (2.2)
5	فارس (شیراز) Fars (Shiraz)	5.7 (0.7)	4.9 (1)	10	خوزستان (دزفول) Khouzastan (Dezful)	2.9 (1)	2.3 (1)

منبع: بانک اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی

Reference: Database of the Ministry of Agriculture

*مقادیر داخل پرانتز مربوط به ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد.

The amount in parentheses is the studies stations.

معرفی مدل: WOFOST یک مدل شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی بوده و قادر است رشد گیاهان زراعی یک ساله را به‌صورت روزانه در شرایط پتانسیل، محدویت آبیاری و محدودیت مواد غذایی بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه‌سازی کند (Boogaard et al., 1998). این مدل نمو فنولوژیکی و رشد گیاه را از آغاز جوانه‌زنی تا زمان رسیدگی بر اساس خصوصیات ژنتیکی گیاه و شرایط محیطی توصیف، و ماده خشک گیاه را به‌عنوان تابعی از تشعشع، دما و خصوصیت‌های گیاه در مراحل زمانی یک روز شبیه‌سازی می کند. اصول محاسبه تولید ماده خشک، سرعت ناخالص جذب CO_2 توسط کانوپی است که به انرژی تابشی جذب شده بستگی دارد و تابع تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب خاموشی نور در کانوپی است. WOFOST میزان جذب CO_2 ناخالص را بر پایهٔ تشعشع فعال فتوسنتز (PAR)[1] (۵۰ درصد از کل تشعشع خورشیدی با طول موج ۴۰۰–۷۰۰ نانومتر) جذب شده توسط گیاه شبیه‌سازی می‌کند. CO_2 با استفاده از انرژی تامین شده بوسیله نور به کربوهیدرات (CH_2O) تبدیل می‌شود (Goudriaan, 1986). قسمتی از کربوهیدرات‌های تولید شده (CH_2O) در تنفس نگهداری مصرف شده و کربوهیدرات‌های باقی‌مانده در مسیر تنفس رشد به ماده خشک تبدیل می‌شوند (Spitters et al., 1986). مقدار ماده خشک تولید شده به بخش‌های ریشه، برگ، ساقه و ارگان‌های ذخیره تقسیم می‌گردد. این نسبت در مراحل مختلف نمو گیاه متفاوت است. افزایش ماده خشک برگ نشان‌دهنده توسعه سطح برگ است. سطح برگ در پایان هر روز به‌عنوان سطح فتوسنتزکننده روز بعد در نظر گرفته می‌شود.

برای توصیف نمو فنولوژیکی گیاه در مدل از متغیر DVS[2] استفاده شده است که برای جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی به‌ترتیب مقادیر صفر، یک و دو در نظر گرفته شد که تابعی از درجه–روز می‌باشد (Van Keulen, 1986). دوره زندگی سیب‌زمینی در مدل WOFOST به دو مرحله رویشی (از جوانه‌زنی (DVS= 0) تا زمان گل‌دهی (DVS= 1)) و زایشی (از گل‌دهی (DVS= 1) تا زمان رسیدگی فیزیولوژیکی (DVS= 2)) تقسیم می‌شود.

1- Photosynthetically Active Radiation
2- Development stage of crop

رشد در مدل به‌صورت دینامیک با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود. مدل WOFOST دارای نسخه‌های مختلفی است که در طول سال‌های مختلف ایجاد شده است (Hijmans et al., 1994; Rappoldt, 1986; Supit et al., 1994; Van Diepen et al., 1988). در این تحقیق از نسخه WOFOST ۷،۱،۷ (February ۲۰۱۴) که برای شبیه‌سازی سالانه محصولات در اروپا توسعه یافته بود، استفاده شد.

معیارهای ارزیابی نتایج مدل: در ارزیابی مدل WOFOST از مقایسه مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی و عملکرد غده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، آزمون تی P(t)، جذر میانگین مجذور خطا (RMSE)[3]، جذر میانگین مجذور خطای نرمال‌شده (RMSEn)[4]، حداکثر خطا (ME)[5] و ضریب کارآیی (E)[6] (معادلات ۱ تا ۴) استفاده گردید (Bouman & Van Laar, 2006).

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

معادله (۲)

$$E = 1-(\sum_{i=1}^{n}(M_i - Si)/\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M})^2)$$

$$ME = Max\,|Si - Mi|.\frac{100}{\overline{M}} \quad \text{معادله (۳)}$$

$$RMSEn = 100\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - Mi)^2}}{\overline{M}} \quad \text{معادله (۴)}$$

که در این معادلات، Si و Mi: به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، n: تعداد مشاهدات و $\overline{M}$: میانگین مقادیر Mi می‌باشد. RMSE: میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده اطمینان مدل می‌باشد. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده آن است که شبیه‌سازی بهتر صورت گرفت است. ضریب E: بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از میانگین می‌باشد. مقدار E بین $-\infty$ تا ۱+ متغیر

3- Root mean square error
4- Normalized Root mean square error
5- Maximum error
6- Coefficient of efficiency

است. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر هستند. مقدار زیاد ME نشانگر عدم دقت مدل است. در حالت ایده‌آل که مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند، مقادیر عددی RMSE و ME برابر با صفر و مقدار E برابر با یک خواهند بود. چنانچه مقدار نتیجه آزمون (t)بیشتر از ۰/۰۵ باشد، بدان مفهوم است که مقادیر شبیه‌سازی شده در سطح احتمال ۹۵ درصد با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری ندارند، لذا مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی برخوردار است.

نتایج و بحث

واسنجی و تعیین اعتبار

یکی از اهداف مطالعه کنونی به‌دست آوردن پارامترهای گیاهی سیب‌زمینی برای شرایط مختلف اقلیمی کشور می‌باشد. بر این اساس، تشکیل فایل گیاهی که حساس‌ترین قسمت واسنجی مدل WOFOST بود، در طی دو مرحله انجام شد، در مرحله اول برای طول دوره رشد و مراحل فنولوژیکی و در مرحله دوم برای عملکرد غده انجام گرفت.

طول دوره رشد و مراحل فنولوژیکی

مدل به‌منظور برآورد مدت زمان مراحل کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا آغاز گل‌دهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی واسنجی شد و $TSUM_1$ و $TSUM_2$ به‌ترتیب ۳۵۰ و ۱۷۸۰ درجه روز (°Cd) محاسبه گردید (جدول ۲). بر اساس مطالعات پارامترهای جوی بر روی محصول سیب‌زمینی در ارقام آگریا، مارفونا، دراگا، ساتینا و آئولا به‌مدت ۱۸ سال در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی اکباتان $TSUM_1$ بین ۳۱۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و $TSUM_2$ بین ۱۶۵۰ تا ۱۸۵۰ درجه سانتی‌گراد با توجه به تاریخ کاشت، زمان برداشت و نوع رقم متغیر بود (Meteorological Organization of Hamedan, 2012).

بر اساس نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده در طی پنج سال با تاریخ‌های کاشت مرسوم (جدول۳) میانگین طول دوره کاشت تا سبز شدن ۱۷/۴ روز، میانگین دوره سبز شدن تا آغاز گل‌دهی ۲۷/۵ روز و میانگین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی ۱۱۲/۸ روز، به‌طور متوسط برای ۱۰ ایستگاه مطالعاتی محاسبه و تعیین گردید.

مدل در مرحله واسنجی طول دوره سبز شدن را ۱۶/۷ روز، دوره شروع گل‌دهی را ۲۷/۰ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۱۲/۰ روز، به‌طور متوسط برای ۱۰ ایستگاه مطالعاتی شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود. همچنین مدل در زمان اعتبارسنجی به‌طور متوسط طول دوره سبز شدن را ۱۶/۹ روز، دوره شروع گل‌دهی را ۲۸/۳ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۱۳/۸ روز برای کلیه مناطق مورد مطالعه شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود.

جدول ۲- پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در مرحله واسنجی در شرایط پتانسیل برای مهم‌ترین مناطق تولیدکننده سیب‌زمینی

Table 2- Parameters of model WOFOST for calibration under potential conditions in major production regions of potato

پارامتر Parameter	توصیف پارامتر Parameter description	مقدار Amount	واحد Unit
$TSUM_1$	مجموع درجه روز از سبز شدن تا شروع گل‌دهی Thermal time from emergence to initiation of flowering	350	°Cd
$TSUM_2$*	مجموع درجه روز از شروع گل‌دهی تا رسیدن Thermal time from initiation of flowering to maturity	1780	°Cd
SLATB	سطح ویژه برگ Specific leaf area as a function of development stage	0.0020	$h_a.kg^{-1}$
TBASE	حداقل آستانه دما برای پیری برگ Lower threshold temperature for ageing of leaves	4	°Cd
AMAXTB	حداکثر سرعت جذب CO_2 Maximum leaf CO_2 assimilation rate as a function of development stage of the crop	35	$kg.ha^{-1}.hr^{-1}$
TMPFTB	دامنه درجه حرارت هوا مؤثر بر سرعت فتوسنتز Air temperature affecting photosynthetic rate	30.00, 1.00 35.00, 0.75 39.00, 0.01	°Cd

برای اردبیل و سراب (۱۵۸۰) درجه روز تعیین شد.

* For Ardabil and Sarab (1580) °Cd were estimated.

جدول ۳- پیش‌بینی طول دوره مراحل فنولوژیکی بر اساس تاریخ کاشت (روز از اول ژانویه) در مهم‌ترین شهرهای تولیدکننده سیب‌زمینی در کشور طی سال‌های ۹۰-۱۳۷٤

Table 3- Prediction during the period of phenological stages according to planting date (Julian day) in the most important potato production regions of Iran from 1995-2011

شهر City	مرحله فنولوژیکی Phenological stage			
	تاریخ کاشت Sowing date	کاشت تا سبز شدن Sowing to emergence	سبز شدن تا گل‌دهی Emergence to flowering	سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی Emergence to physiological maturity
همدان Hamedan	100	19	27	111
اردبیل Ardabil	140	14	23	120
اصفهان Isfahan	70	22	27	108
قروه Ghorveh	100	20	27	107
شیراز Shiraz	60	19	27	108
جیرفت Jiroft	345	15	31	126
مشهد Mashhad	100	13	21	93
گرگان Gorgan	65	23	26	105
شاهرود Shahroud	100	13	22	96
دزفول Dezful	360	17	35	127

نتایج معیارهای آماری ارزیابی مدل (جدول ۴) نشان‌دهنده دقت بالای در واسنجی و اعتبارسنجی مدل می‌باشد. به‌طوری‌که با اجرای مدل به تاریخ کاشت دی ماه سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ برای دشت گرگان زمان سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی و عملکرد غده منطبق با مراحل اندازه‌گیری شده در مطالعه سرپرست و مشایخی (Sarparast & Mashayekhi, 2014) بود.

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله فنولوژی کاشت تا سبز شدن ۱/۵ روز، سبز شدن تا گل‌دهی ۲/۵ روز و سبز شدن تا رسیدن غده ۵/۷ روز در واسنجی مدل و در شرایط اعتبارسنجی جذر میانگین مربعات خطای مدل در مرحله سبز شدن ۱/۶ روز، گل‌دهی ۲/۳ روز و رسیدن ۶/۴ روز به‌دست آمد (جدول ۴). حداکثر انحراف (RMSEn) در مرحله سبز شدن ۹/۱ درصد، آغاز گل‌دهی ۹/۲ درصد و رسیدن غده ۵/۱ درصد در شرایط واسنجی مدل به‌دست آمد و مقادیر حداکثر انحراف مدل در زمان اعتبارسنجی بترتیب برای مراحل سبز شدن، گل‌دهی و رسیدن ۹/۵ ، ۸/۳ و ۵/۶ درصد محاسبه شد (جدول ۴). همچنین نتایج آزمون P(t) در سطح احتمال ۹۵ درصد نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده کلیه پارامترها نزدیک به مقادیر واقعی می‌باشد. مقدار ضریب تبیین برای مرحله سبز شدن ۰/۸۸، گل‌دهی ۰/۷۲ و رسیدن غده ۰/۸۰ در زمان واسنجی مدل محاسبه گردید. در اعتبارسنجی مدل مقدار ضریب تبیین برای مرحله سبز شدن ۰/۸۱، گل‌دهی ۰/۷۶ و رسیدن غده ۰/۷۷ به‌دست آمد (جدول ۴). نتایج ارزیابی ضریب کارایی هم در شرایط واسنجی و هم در شرایط اعتبارسنجی حاکی از موفقیت مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. مقادیر شاخص ME (جدول ۴) نشان‌دهنده دقت و اطمینان مدل در پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی در حد مطلوب بود.

عملکرد غده: واسنجی و تعیین ضرایب مدل به نحوی که عملکرد غده مورد انتظار توسط مدل شبیه‌سازی شود، انجام شد. پارامترهایی (SLATB)[1] سطح ویژه برگ، (TBASE)[2] حداقل آستانه

1- Specific leaf area
2- Lower threshold temperature for leaf senescence

دما برای پیری برگ، (AMAXTB)[1] حداکثر سرعت جذب دی اکسید کربن برگ و (TMPFTB) دامنه درجه حرارت هوا مؤثر بر سرعت فتوسنتز که برای شبیه‌سازی عملکرد غده لازم بودند، بر اساس حد مجاز دامنه تغییرات ضرایب مدل و با استفاده از منابع، مطابق جدول ۲ واسنجی و تعیین گردید. برخی از پارامترهای گیاهی که مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیشتری داشت (Vazifedoust, 2007)، بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده واسنجی شد. برای این منظور از زیر برنامه FSEOPT (Stol et al., 1992) استفاده شد. این زیر برنامه مقادیر پارامترهای مورد واسنجی را در محدوده‌ای که برای آن تعریف می‌گردد، به‌گونه‌ای تعیین می‌نماید که تفاوت بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد (وزن برگ، وزن غده، وزن عملکرد بیولوژیکی و شاخص سطح برگ) با مقادیر شبیه‌سازی شده این پارامترها حداقل باشد. در مدل برای تعیین و محاسبه ضرایب SLATB، AMAXTB (Dua et al., 2014)، TBASE (Iranian Meteorological Organization, 1974) و TMPFTB (Griffin et al., 1993) استفاده شد. لازم به توضیح است پارامتر TMPFTB در مدل WOFOST و مدل‌های گروه واگنینگن تابعی از درجه حرارت بوده و با تغییر دمای روزانه در طول دوره شبیه‌سازی مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد، البته حداکثر مقدار آن بر اساس پیش‌فرضی مدل برای ارقام مناطق مختلف اروپا در ۲۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود که این مقدار برای شرایط ایران بر اساس نتایج واسنجی به ۳۰ درجه سانتی‌گراد تغییر یافت.

با توجه به روند شبیه‌سازی عملکرد غده، جهت تخمین مناسب عملکرد در مناطقی مانند اردبیل و نظیر آن (سراب و ارومیه) که دارای تابستان‌های خنک می‌باشند، مقدار پارامتر TSUM2 برابر ۱۵۸۰ درجه سانتی‌گراد (جدول ۲) تعیین گردید تا عملکرد غده با دقت بیشتری پیش‌بینی گردد. این پارامتر نیز نقش مهمی در تولید ماده خشک در گیاه دارد. مدل برای هر ۱۰ منطقه و هر پنج سال و با تاریخ کاشت مرسوم (جدول ۳) و نیز با دامنه‌ای از تاریخ‌های کاشت (سه تاریخ) به‌طور جداگانه و در مجموع، ۲۰۰ بار اجرا شد. که نتایج ارزیابی شاخص‌های آماری (جدول ۴) بیانگر دقت مدل می‌باشند. به‌طور کلی، با توجه به نتایج عملکرد پتانسل غده سیب‌زمینی به‌دست آمده از کشاورزان پیشرو در مناطق تحت مطالعه به‌طور متوسط در طی پنج سال اطلاعات جمع‌آوری شده ۵۰۰۶۹ کیلوگرم در واسنجی و ۵۰۶۵۰ کیلوگرم برای داده‌های اعتبارسنجی به‌دست آمد، در اجرای مدل نتایج شبیه‌سازی ۵۱۴۴۸ کیلوگرم برای واسنجی و ۵۲۰۶۱ کیلوگرم برای اعتبارسنجی به‌طور متوسط در طی این مدت برای این مناطق توسط مدل پیش‌بینی شد که بسیار نزدیک مقادیر مزرعه‌ای می‌باشد. بنابراین، با بررسی شاخص‌های آماری (جدول ۴)، مدل مذکور از دقت بالایی برای پیش‌بینی عملکرد در تمام مناطق برخوردار می‌باشد. دو و همکاران (Dua et al., 2014) نیز به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST برای سیب‌زمینی در هند از پارامترهای TSUMEM، $TSUM_1$، $TSUM_2$، DTSMTB و TMNFTB استفاده نمودند و مقادیر $TSUM_1$ را ۳۸۰ درجه روز، $TSUM_2$ را ۱۰۶۰ درجه روز و مقدار AMAXTB را ۴۰ کیلوگرم در هکتار در ساعت برای واریته‌های دیررس تعیین کردند که در نهایت، عملکرد ماده خشک غده را ۸۸۷۴ کیلوگرم در هکتار شبیه‌سازی نمودند که ۱۸۴ کیلوگرم بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود.

بر اساس نتایج پارامترهای آماری، جذر میانگین مجذور خطای عملکرد غده در شرایط واسنجی ۲۸۲۳ کیلوگرم بر هکتار و در اعتبارسنجی ۲۹۳۳ کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد (جدول ۴) که نشان‌دهنده خطای ناچیز مدل بود. مدل بخوبی و با اعتماد زیاد عملکرد غده شبیه‌سازی نمود، به‌طوری‌که حداکثر انحراف (جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده) عملکرد غده در واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۵/۶ و ۵/۷ درصد بود. ضریب کارایی هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی برابر یک به‌دست آمد. ضریب حداکثر خطا در حالت واسنجی و اعتبارسنجی ۱۲/۷ و ۱۳/۹ بود. همچنین مقدار ضریب تبیین عملکرد غده در محدوده ۰/۹۰-۰/۸۷ محاسبه گردید. که بیان‌کننده اطمینان مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. در شکل ۱ مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مراحل سبز شدن، گل‌دهی، رسیدن و عملکرد غده نشان داده شده است. نتایج آزمون (t) نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده کلیه پارامترهای گیاهی در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی مدل در مناطق مختلف در سطح احتمال ۹۵ درصد شبیه مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای گیاهی می‌باشد.

1- Maximum leaf CO2 assimilation rate

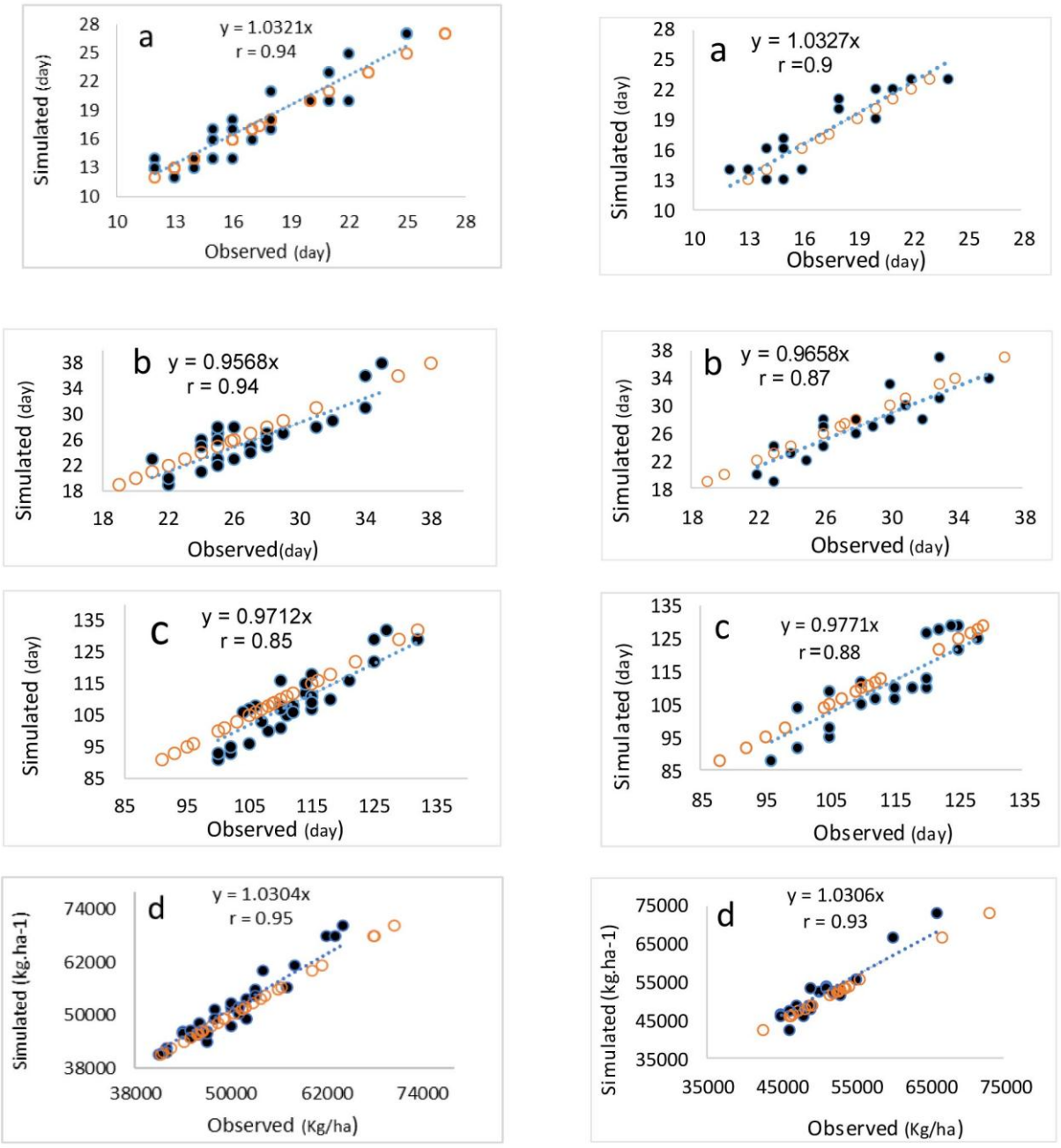
جدول ٤- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی و عملکرد غده سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف

Table 4- Evaluation of WOFOST model for simulating the phenological stages and tuber yield of potato using different statistical criteria

	پارامترهای گیاهی Crop parameters	مشاهده شده* Observed	شبیه‌سازی شده* Simulated	تفاوت Difference	جذر میانگین مجذور خطا RMSE	جذر میانگین مجذور خطای نرمال‌شده RMSE-N (%)	ضریب کارآیی E	حداکثر خطا ME	ضریب تبیین R^2	آزمون تی P(t)
واسنجی Calibration	عملکرد غده Tuber yield ($kg.ha^{-1}$)	50069	51448	1378	2823	5.7	1.00	12.7	0.90	0.64
	سبز شدن Emergence (d)	16.9	17.4	0.5	1.5	9.1	1.03	17.7	0.88	0.68
	گل‌دهی Flowering (d)	27	25.8	1.2	2.5	9.2	0.91	11.1	0.72	0.67
	رسیدگی Maturity (d)	112.1	108.7	3.3	5.7	5.1	0.94	8.1	0.80	0.78
اعتبارسنجی Validation	عملکرد غده Tuber yield ($kg.ha^{-1}$)	50650	52061	1410	2933	5.8	1.00	13.9	0.87	0.73
	سبز شدن Emergence (d)	16.9	17.5	0.6	1.6	9.5	1.05	17.8	0.81	0.78
	گل‌دهی Flowering (d)	28.3	27.3	1	2.3	8.3	0.92	14.1	0.76	0.77
	رسیدگی Maturity (d)	113.8	111	3.8	6.4	5.6	0.96	8.7	0.77	0.83

*مقادیر میانگین مناطق مورد مطالعه می‌باشند

Amounts indicate the mean of studied regions.



شکل ۱- مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی مدل(چپ) و تعیین اعتبار مدل (راست) برای مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده در سیب‌زمینی

Fig. 1- Simulated data vs measured values in calibration (left) and validation (right) for phenological stages and yield of potato tubers

a، b، c و d: به‌ترتیب نشان‌دهنده مرحله سبز شدن، گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیکی و عملکرد غده می‌باشند. دایره‌های توپر مقادیر مشاهده شده و دایره‌های توخالی مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشند.

a, b, c, d: indicate emergence, flowering, physiological maturity and tuber yield respectively. Solid circles observed values and simulated values are hollow circles.

نتیجه‌گیری

درصد سطح زیر کشت و عملکرد هر استان از تولید سیب‌زمینی کشور طی سال‌های ۹۰-۱۳۷۴ تعیین گردید. استان‌های همدان، اردبیل، اصفهان، کردستان، فارس، کرمان، خراسان رضوی، گلستان، سمنان و خوزستان ۱۰ استانی بودند که بیشترین تولید سیب‌زمینی کشور را داشتند. مدل WOFOST بر اساس تاریخ‌های مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده سیب‌زمینی برای ارقام نیمه‌دیررس تا دیررس برای مناطق مختلف کشور با شرایط آب و هوایی متنوع واسنجی و تعیین اعتبار شد. پارامترهای مدل برای پیش‌بینی وقوع مراحل نمو و نیز عملکرد غده تعیین و نهایی شدند. سپس در شرایط پتانسیل (بدون محدودیت) بر اساس نتایج حاصله، مدل مراحل رشد و عملکرد غده را با دقت عالی پیش‌بینی نمود. تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل معنی‌دار نبود. مدل واسنجی شده با دقت مطلوب توانست عملکرد سیب‌زمینی را در طرح استمرار تولید در مناطق جیرفت و دزفول شبیه‌سازی نماید. می‌توان نتیجه گرفت، مدل WOFOST در شبیه‌سازی تمام مناطق از دقت عالی برخوردار است، امّا به‌منظور افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد غده در منطقه اردبیل به‌علت تابستان‌های خنک تغییر مقدار $TSUM_2$ به ۱۵۸۰ درجه سانتی‌گراد روز نتایج دقیق‌تری به‌همراه خواهد داشت.

سپاسگزاری

داده‌های مربوط به عملکرد سیب‌زمینی از وزارت جهاد کشاورزی، داده‌های عملکرد پتانسیل از کشاورزان پیشرو و اطلاعات مراحل فنولوژی سیب‌زمینی و پارامترهای اقلیمی از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شده است که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

Refrences

Amiri, E., 2009. Application of WOFOST model for predict growth of rice in dry condition. In: Proceedings of the Second national seminar on the effects of drought and its management strategies. Isfahan Agricultural Research Center, 25-26 May, Isfahan, Iran. (In Persian)

Amiri, E., Rezaei, M., Motamed, M.K., and Emami, S., 2011. Evaluation of the crop growth model WOFOST under irrigation management. Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi) (90): 9-17. (In Persian with English Summary)

Bafkar, A., Boroumandnasab, S., Behzad, M., andFarhadi Bansouleh, S., 2011. Estimation of potential yield of grain maize in Mahidasht, Kermanshah using WOFOST, a crop growth simulation model. Iranian Journal of Field Crop Sciences 42(4): 799-808. (In Persian with English Summary), https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084811.1390.42.4.15.7

Boogaard, H.L., Diepen, C.A., Van, Eerens, H., Kempeneers, P., Piccard, I., Verheijen, Y., and Supit, I., 2002. Description of the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). METAMP (Methodology Assessment of MARS Predictions), Report 1/3, Alterra, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Supit Consultancy, Wageningen, Mol, Houten.

Bouman, B.A.M., and Van Laar, H.H., 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen limited conditions. Agricultural Systems 87: 249–273, https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.09.011.

Catalin, L., Bettina, B., Fabio, M., and Doniela Anca, L., 2009. Adaptation of WOFOST model from CGMS to Romanian condition. Journal of Plant Development 16: 97- 102, https://www.researchgate.net/publication/41506387.

Dua, V.K., Govindakrishnan, P.M., and Singh, B.P., 2014. Calibration of WOFOST Model Potato in India. Potato Journal 41(2): 105-112, https://www.researchgate.net/publication/292250301.

Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and Dubrovsky, M., 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecological Modeling 171: 223-246, https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2003.08.012 .

Fabeiro, C., Martin De Santa, Olalla, F., and De Juan, J.A., 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. Agricultural Water Management 48: 255–266.

FAOSTAT, 2012. Food and agricultural commodities production. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx.

Farhadi Bansouleh, B., 2009. Development of a spatial planning support system for agricultural policy formulation related to land and water resources in Borkhar and Meymeh District, Iran. Ph.D. Thesis in ITC/ Wageningen University, Enschede, Wageningen, The Netherlands.

Goudriaan, J., 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of canopy photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology 43: 251–255.

Griffin, T.S., Johnson, B.S., and Ritchie, J.T. 1993. A Simulation Model for Potato Growth and Development: SUBSTOR-Potato, Version 2.0, 5 p.

Hengsdijk, H., Bouman, B.A.M., Nieuwenhuyse, A., and Jansen, H.G.P., 1999. Quantification of land use systems using technical coefficient generators: A case study for the Northern Atlantic zone of Costa Rica. Gricultural Systems 61(2): 109-121

Hijmans, R.J., Guiking-Lens I.M., and Van Diepen, C.A., 1994. WOFOST 6.0; User's guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model. Technical Document 12. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.

Hoogenboom, G., Wilkens, P., and Tsuji, G., 1999. DSSAT v3, Vol.4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Kalra, N., Chander, S., Pathak, H., Aggarwal, P.K., Gupta, N.C., Sehgal, M., andChakarborty, D., 2007. Impact of climate change on agriculture. Outlook on Agriculture 36: 109-118, https://doi.org/10.5367/000000007781159903.

Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Bodagh Jamali, J., and Marashi, H., 2006. Evaluation of the effects of climate change on growth characteristics and yield of rainfed wheat in Iran. Iranian Journal of Agricultural Sciences and Industries 20(7): 83-95. (In Persian with English Summary)

Meteorological Organization of Hamedan. 2012. Annual studies of agricultural meteorological bulletins, Study of weather condition effects on potato varieties such as Pashandi, Draga, Marfuma and Agria during years of 1991-2011 Meteorological Organization of Hamedan Bulletins of Agricultural Meteorological (In Persian).

Parvizi, K., 2008. Evaluation of quantitative and qualitative traits of late and early ripening advanced potato cultivars. Pajouhesh and Sazandegi (79): 80-90. (In Persian with English Summary)

Rappoldt, C., 1986. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 3.0. CWFS, Amsterdam, Wageningen. http://www.wageningenur.nl/wofost

Richter, G.M., and Semenove, M.A., 2005. Modeling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. Agricultural Systems 84(1): 77-97, https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.011.

Sarparast, R., and Mashayekhi, K., 2014. Heat unit evaluation of potato genotypes for determining different maturity groups in Gorgan region. Electronic Journal of Crop Production 7(3): 123-143. (In Persian with English Summary) https://doi.org/ 10.22069/EJCP.2022.6092.

Singh, J.P., Lal, S.S., Govindakrishnan, P.M., Dua, V.K., and Pandey, S.K., 2010. Impact of climate change on potato in India. In: Challenges of Climate Change: Indian Horticulture. Singh, H.P., Singh, J.P., and Lal, S.S. (Eds.). Westville Publishers, New Delhi, India. p. 90-99.

Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M., and Goudriaan, J., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I: Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteorology 38: 217-229.

Stol, W., Rouse, D.I., Van Kraalingen, D.W.G., and Kiepper, O., 1992. FSEOPT, a FOTRAN Program for Calibration and Uncertainly analysis of Simulation Models. Simulation Reports CABO-TT 24. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen.

Supit, I., Hooyer, A.A., and Van Diepen, C.A., 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and algorithms. EUR publication 15956, Agricultural series, Luxembourg, 146 p.

Tsuji, G., Hoogenboom, G., and Thornton, P., 1998. Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publication, 399 pp.

Van Diepen, C.A., Rappoldt, C., Wolf, J., and Van Keulen, H., 1988. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1, Centre for world food studies, Wageningen. https://www.wur.nl › wageningen-university.

Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., and Goudriaan, J., 2003. On applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy 18(3-4): 201-234, https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5.

Van Keulen, H., 1986. The collection and treatment of basic data. Plant data. In: Van Keulen and Wolf, p. 235-247.

Van Keulen, H., and Van Diepen, C.A., 1990. Crop Growth Models and Agroecological Characterization. In: Scaife, A. (Ed.): Proceedings of the First Congress of the European Society of Agronomy, 5-7 December 1990, Paris. CEC, ESA, INRA. Session 2: 1-16. Paris

Vazifedoust, M., 2007. Development of an agricultural drought assessment system: Integration of agrohydrological modelling, remote sensing and geographical information. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

Wolf, J., 2003. Calibration of WOFOST crop growth simulation model for use within CGMS. Wageningen University. http://www.wofost.wur.nl

Wolf, J., and Oijen, M.V., 2002. Modelling the dependence of European potato yields on changes in climate and CO_2. Agricultural and Forest Meteorology 112: 217-31, https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00061-8.

Wolf, J., and Van Diepen, C.A., 1994. Effects of climate change on silage maize production potential in the European Community. Agricultural Forest Meteorology 71(1/2): 33-60.

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. ISSN: 1735-6814 (Print), 1735-8043 (Online).