Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2018.259242.667928 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۳۹۸ (ص ۳۲۹-۳۳۸)

Calibration and Validation of WOFOST Model for Wheat in Qazvin Plain

MARYAM AHMADI[1], ABDUL RAHIM HOOSHMAND[2], SAEED BROOMAND NASAB[3*], MOHAMMAD ALI SHARIFI[4]

1.Phd student, Irrigation and drainage department, Water engineering faculty, Shaid Chamran University, Ahwaz, Iran
2. Associate professor, Irrigation and drainage department, Water engineering faculty, Shaid Chamran University, Ahwaz, Iran
3. Professor, Irrigation and drainage department, Water engineering faculty, Shaid Chamran University, Ahwaz, Iran
4. Associate professor Department of Urban-Regional Planning and Geo-Information Management, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, Enschede, Netherland
(Received: June. 20, 2018- Revised: Aug. 6, 2018- Accepted: Sep. 29, 2018)

ABSTRACT

This study was carried out to calibrate and validate the WOFOST model for winter wheat in Qazvin plain. Firstly, the model was calibrated based on the phenological data obtained from the field experiment during the year 2016-2017. Then the model was validated based on the four years field data. After that the model recalibrated in terms of physiological aspects using leaf area index, biomass and crop yield. The model simulated flowering and maturity dates with 11 and 4 days accuracy (RMSE). The simulation results showed an acceptable fitness with the observation data. After calibration, the root mean square errors (NRMSE) of simulated model were estimated to be 12.05, 11.1 and 15.4% for yield, biomass and leaf area index, respectively. Based on the obtained results, the model was estimated all the proposed parameters less than the field data (CRM<0). The highest model efficiency was obtained for leaf area index. After that the model efficiencies were 0.95 and 0.94 for crop yield and biomass, respectively. The lowest value for determination coefficient (CD) was obtained for biomass, showing the largest dispersion between simulation and measurements values.

Keywords: Crop Growth Simulation, Phenological Dates, Biomass, Crop Yield.

*Corresponding Author's Email: boroomand@scu.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

واسنجی و اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی WOFOST برای گندم در دشت قزوین

مریم احمدی[۱]، عبدالرحیم هوشمند[۲]، سعید برومند نسب[۳*] و محمدعلی شریفی[۴]

۱-دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲-دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳-استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۴-دانشیار گروه ITC دانشگاه توئنت، انچد، هلند

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۳۰- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۵/۱۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۷)

چکیده

این مطالعه با هدف واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST برای گندم زمستانه در دشت قزوین انجام گرفت. ابتدا مدل براساس تاریخ‌های فنولوژیکی برداشت‌شده در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ واسنجی شد. سپس براساس اطلاعات چهار سال زراعی اعتبارسنجی گردید. واسنجی مدل با استفاده از شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه ازنظر فیزیولوژیکی انجام گردید. مدل تاریخ گلدهی و رسیدن را با دقت ۱۱ و ۴ روز شبیه‌سازی کرد. نتایج شبیه‌سازی برازش قابل قبولی با داده‌های مشاهده‌ای نشان داد. پس از واسنجی، مدل عملکرد دانه، بیولوژیک و شاخص سطح برگ را به ترتیب با خطای ۱۲/۰۵، ۱۱/۱ و ۱۵/۴ درصد شبیه‌سازی کرد. بر اساس نتایج بدست آمده مدل کلیه مقادیر را کمتر از مقدار مزرعه‌ای برآورد نمود (CRM<0). مدل بیشترین کارایی (d) را در برآورد شاخص سطح برگ (d=۰/۹۸) داشت. پس از آن مدل عملکرد دانه و بیولوژیک را به ترتیب با کارایی ۰/۹۵ و ۰/۹۴ شبیه‌سازی کرد. کمترین مقدار ضریب تعیین (CD) برای عملکرد بیولوژیک بدست آمده که نشان‌دهنده بیشترین پراکندگی بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی رشد، تاریخ‌های فنولوژیکی، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه

مقدمه

غلات نقش بسزایی در تأمین امنیت غذایی دنیا دارند. در بین غلات گندم، ذرت و برنج با بالاترین مقدار تولید بیشترین سهم را در تأمین غذا به خود اختصاص داده‌اند. گندم به دلیل سازگاری گسترده با شرایط آب و هوایی مختلف، سهولت کاشت، امکان نگهداری طولانی‌مدت، ارزش غذایی زیاد و قابلیت مصرف در اشکال مختلف از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (Ahmadvand and Najafpur, 2010). علاوه بر این گندم غذای اصلی بسیاری از مردم را تشکیل داده و حدود ۴۰ درصد کالری مصرفی مردم از این محصول تأمین می‌شود. بنابراین استفاده از زمینه‌های تحقیقاتی برای افزایش تولید گندم به‌عنوان مهمترین محصول زراعی کشور ضروری به نظر می‌رسد (Amiri, 2016). این در حالی است که بر اساس پیش‌بینی فائو برای سال ۲۰۱۷ تولید گندم در ایران با افزایش ۱۰۰ هزار تنی نسبت به سال گذشته بالغ بر ۴ میلیون تن برآورد شده است (FAO, 2017).

مدل‌های شبیه‌سازی رشد یکی از ابزارهای کارآمد جهت پایش رشد محصولات کشاورزی و بررسی محدویت‌های ممکن و مدیریت‌های مختلف در مزرعه است (Ahmadi *et al*., 2014). بدین منظور مدل‌های مختلفی با اهداف متفاوت توسعه یافته است. مدل WOFOST یک مدل دینامیک شبیه‌سازی رشد گیاهی است که در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واخنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واخنینگن ایجاد گردیده است (van Diepen *et al*., 1989). این مدل توسط ون دیپن در سال ۱۹۸۹ معرفی شد (Van Diepen *et al*., 1989) و پس از آن در نسخه‌های جدید به‌روزرسانی گردید. در این مطالعه از آخرین نسخه مدل که توسط آلارد دیوید در سال ۲۰۱۷ ارائه شده است، استفاده گردید (Wit, 2017). این مدل قادر است که رشد گیاهان زراعی یک‌ساله را در حالت پتانسیل، کم آبیاری و کمبود مواد مغذی شبیه‌سازی نماید. این مدل در طول سال‌های مختلف در زمینه‌های تحقیقات زیادی مثل تغییر اقلیم (Gilardelli *et al*., 2018)، تنش آبی (Kroes and Supit, 2011) و پیش‌بینی محصول (Ma *et al*., 2013) در سراسر جهان مورد استفاده قرار

* نویسنده مسئول: boroomand@scu.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

گرفت. از مهمترین آنها می‌توان به استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی گیاهی سیستم پایش رشد محصولات کشاورزی در اروپا (CGMS2) و بکارگیری این مدل به‌عنوان هسته شبیه‌سازی گیاهی مدل اگرواکولوژی SWAP نام برد (Kroes *et al*., 1999).

در یک مطالعه از مدل WOFOST[1] برای بررسی کاهش عملکرد گندم پاییزه در شرایط تنش آبی استفاده کردند. در این مطالعه که به‌صورت منطقه‌ای از مدل WOFOST استفاده شد مقدار کاهش محصول گندم در اروپا ۴ تن در هکتار برآورد گردید (Boogaard *et al*., 2013).

از ترکیب مدل WOFOST و تصاویر ماهواره مودیس برای پیش‌بینی محصول گندم استفاده شده است. در این مطالعه جهت بهبود واسنجی مدل از سری زمانی شاخص سطح برگ برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم استفاده شد (Ma *et al*., 2013).

در تحقیق دیگری برای مدل‌سازی ریاضی آبیاری گندم از مدل رشد گیاهی WOFOST و HYDRUS-1D استفاده کردند. در این مطالعه از ترکیب مدل WOFOST و HYDRUS یک‌بعدی برای بهبود دقت پیش‌بینی محصول گندم با استفاده از شبیه‌سازی دقیق تعرق استفاده شد. برای شبیه‌سازی رطوبت منطقه ریشه از حل معکوس معادله ریچاردز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل ترکیب‌شده می‌تواند برای بررسی تعامل بین رشد گیاه و شرایط بیلان رطوبتی خاک استفاده شود (Zhou *et al*., 2012).

همچنین توزیع مکانی پارامترهای مدل کالیبره شده WOFOST و تأثیر آن بر سیستم پیش‌بینی منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه دو مسئله مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا تعریف مجدد منطقه‌بندی بر اساس واریته در سلول‌های 10×10 کیلومتر انجام شد و سپس تأثیر پارامترهای کالیبره شده در مرحله قبل بر پیش‌بینی محصول گندم زمستانه و ذرت مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی منطقه‌ای با استفاده از سیستم پایش رشد CGMS انجام شد. مدل درنهایت گلدهی و رسیدن را با ضریب تبیین ۰/۲۲ تا ۰/۸۷ برای هر دو گیاه شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان‌دهنده افزایش همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بود (Djaby *et al*., 2013).

در مطالعه دیگری عملکرد گندم با استفاده از ترکیب مدل WOFOST و تصاویر ماهواره مودیس تخمین زده شد. در این بررسی از الگوریتم فیلتر کالمن گروهی استفاده شد. شاخص سطح برگ از تصاویر استخراج و سری زمانی شاخص سطح برگ به مدل معرفی و مقدار محصول برآورد شد. نتایج تحقیق حاکی از این بود که مقدار خطا (RMSE) از ۵۸۷ کیلوگرم بر هکتار به ۳۶۱ کیلوگرم بر هکتار کاهش یافت. بنابراین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای افزایش دقت برآورد محصول گندم مؤثر بوده است (Liyuan *et al*., 2017).

مدل WOFOST برای پیش‌بینی مقدار محصول گندم در سه فصل زراعی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مدل عملکرد گندم را با انحراف از معیار بین ۱۱ تا ۳۳ درصد پیش‌بینی کرد. با مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در این مطالعه مدل عملکرد دانه را بیشتر و عملکرد کاه را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شبیه‌سازی کرد. درحالی‌که شبیه‌سازی شاخص سطح برگ با دقت بالاتری (انحراف معیار ۴/۵) انجام گرفته است (Shekhar *et al*., 2008).

با توجه به بررسی منابع موجود تحقیقی درزمینه واسنجی فنولوژیکی و فیزیولوژیکی مدل WOFOST برای گندم در دشت قزوین انجام نشده است و با توجه به اهمیت این گیاه و سطح بالای زیر کشت این محصول در این دشت، هدف از این مطالعه واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST برای گندم در دشت قزوین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در دشت قزوین قرار دارد. منطقه موردمطالعه در دشت قزوین در محدوده کانال L7 در شمال غرب کشور در ناحیه‌ای بین عرض‌های جغرافیایی ″۴۲ ′۹ °۳۴ تا ″۱ ′۲۹ °۳۴ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″ ۲ ′۳۶ °۴۶ تا ″ ۳۲ ′۵۸ °۴۶ شرقی و در جوار استان البرز واقع شده است. دشت قزوین با متوسط بارندگی ۲۱۰ میلی‌متر و حداقل و حداکثر متوسط دمای هوای ۲ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار دارد. جدول (۱) پارامترهای هواشناسی مربوط به سال اجرای طرح را نشان می‌دهد. این مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی قزوین انجام گرفت. نمونه‌برداری‌ها از زمان گلدهی و در پنج نوبت انجام گردید.

مدل شبیه‌سازی رشد

مدل WOFOST انرژی خورشیدی جذب‌شده توسط کانوپی را به‌عنوان تابعی از تابش دریافتی و شاخص سطح برگ محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از تابش جذب شده مشخصات

1. WOrld FOod STudies

www.SID.ir

Archive of SID

فتوسنتزی برگ را محاسبه کرده و سپس مقدار بالقوه ناخالص فتوسنتز را محاسبه می‌کند. این مقدار ممکن است به دلیل تنش آبی یا شوری کاهش یابد همان‌طور که مقداری به علت تعرق کسر می‌گردد. مقداری از کربوهیدرات تولیدشده برای نگهداری زیست‌توده زنده مصرف می‌شود و مابقی آن به ماده خشک تبدیل می‌گردد. در حین تبدیل، مقداری نیز برای تنفس رشد کاهش می‌یابد. درنهایت مقدار ماده خشک باقیمانده بین ریشه، برگ، ساقه و اندام زایشی تقسیم می‌گردد که مقدار تعلق یافته به هر بخش بستگی به مرحله فنولوژیکی رشد گیاه دارد. در واقع اساس شبیه‌سازی رشد در این مدل متغیرهای فیزیولوژیکی و محیطی برای شبیه‌سازی رشد و محاسبه عملکرد و ماده خشک تولیدشده در شرایط پتانسیل یا کمبود آب یا ماده مغذی می‌باشد (Supit *et al*., 1994; Boogaard *et al*., 1998, van Diepen *et al*., 1989).

جدول ۱- مشخصات هواشناسی محل اجرای آزمایش در سال زراعی ۹۵-۹۴ (http://www.irimo.ir)

ماه	آبان ۹۴	آذر ۹۴	دی ۹۴	بهمن ۹۴	اسفند ۹۴	فروردین ۹۵	اردیبهشت ۹۵	خرداد ۹۵
حداکثر درجه حرارت (°C)	۱۵/۱	۹/۷	۹/۷	۱۰/۲	۱۷	۱۷	۲۷	۳۲
حداقل درجه حرارت (°C)	۵/۶	-۰/۷	-۱/۳	-۱/۸	۳/۹	۴/۳	۱۰	۱۳
ساعات آفتابی (hr)	۵	۵	۶	۷	۷	۶	۸	۱۱
سرعت باد (m/s)	۱/۷	۱/۸	۲/۲	۱/۸	۲/۴	۱/۹	۱/۹	۲/۱
میزان بارندگی (mm)	۱۰۷	۳۱	۲۱	۲۳	۲۲	۹۱	۲۴	۲/۸
متوسط رطوبت نسبی (%)	۷۴	۷۱	۶۸	۶۲	۵۳	۶۸	۵۶	۳۶

برای شروع فرآیند شبیه‌سازی باید سه فایل ورودی اعم از فایل گیاهی، هواشناسی و خصوصیات فیزیکی و شیمیای خاک تهیه و به مدل معرفی گردد. فایل گیاهی به‌صورت آماده در فایل‌های ورودی وجود دارد و نیاز هست که در ابتدا بر اساس دوره رشد گیاه مقدار درجه روز-رشد محاسبه و مقدار آن کالیبره و جایگزین شود، سپس در مراحل بعدی ضرایب گیاهی واسنجی گردد. ورودی بعدی مدل فایل هواشناسی است که بر اساس داده‌های روزانه نزدیک‌ترین ایستگاه به محل کشت تکمیل و به مدل معرفی می‌گردد. شبیه‌سازی رشد گیاه در مدل WOFOST بر اساس پارامترهای هواشناسی اعم از دما (C)، تابش خورشیدی، فشار بخار (kpa)، سرعت متوسط باد در ۲ متری (m/s) و بارش (mm) انجام می‌شود. مشخصات خاک شامل رطوبت حجمی در حالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی (PWP)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K0)، عمق خاک و در صورت نیاز پارامترهای شیمیای خاک است. پس از تکمیل متغیرهای ورودی، مدل رشد گیاه را در گام‌های زمانی یک‌روزه شبیه‌سازی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی شامل پارامترهای گیاهی (مثل شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک (بیومس)، عملکرد دانه، وزن خشک اندام‌های گیاهی، تعرق از گیاه، تبخیر از خاک و مرحله رشد گیاه)، بیلان رطوبتی خاک و شرایط املاح در خاک است. لازم به ذکر است که بیلان رطوبتی و مقدار املاح در صورت اجرای مدل در حالت کم‌آبیاری و کمبود مواد مغذی قابل‌مشاهده است.

تحقیقات نشان داده است که استفاده از مدل‌های گیاهی بدون واسنجی اغلب منجر به تولید نتایج غلط و ناامیدکننده می‌شود بنابراین هر محقق قبل از استناد به نتایج مدل باید از صحت واسنجی و اعتبارسنجی مدل اطمینان حاصل کند (Farhadi, 2009). در این مطالعه جهت تکمیل فایل هواشناسی مدل از پارامترهای روزانه هواشناسی ایستگاه هواشناسی قزوین استفاده گردید. فایل مشخصات خاک با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده در مزرعه برای منطقه توسعه ریشه در سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتیمتر تکمیل گردید و به‌عنوان ورودی به مدل معرفی شد. جدول (۲) پارامترهای فیزیکی خاک مزرعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک محل آزمایش.

عمق خاک(cm)	هدایت هیدرولیکی اشباع(cm/hr)	آب قابل‌دسترس (mm/ m)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد حجمی)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	بافت خاک
۰-۳۰	۸۶	۱۲۰	۵۳	۲۹	۴۱	Silty Clay
۳۰-۶۰	۷۸	۱۵۰	۵۳	۳۳	۴۸	Silty Clay
۶۰-۹۰	۴۳	۱۳۰	۵۴	۳۰	۴۳	Silty Clay

www.SID.ir

Archive of SID

واسنجی و اعتبارسنجی

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها در ابتدا نیاز است که آنالیز حساسیت انجام گیرد تا پارامترهای حساس مدل مشخص شود. مسئله‌ای که مدل WOFOST نیز از آن مستثنا نمی‌باشد. بر اساس بررسی منابع پیشین چندین تحقیق آنالیز حساسیت را برای مدل WOFOST انجام داده‌اند که در این تحقیق از نتایج بدست آمده آنها برای انتخاب پارامترهای واسنجی استفاده شد (Vazifehdoust, 2007; Confalonieri, 2006; Ahmadi *et al.*, 2018). برای بررسی دقت شبیه‌سازی مدل از شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه استفاده شد و بر همین اساس ضرایبی واسنجی گردید که تغییرات آنها تأثیر زیادی بر مقدار پارامترهای موردبررسی داشته باشد.

در این مطالعه واسنجی و اعتبارسنجی مدل در دو مرحله انجام گرفت. واسنجی فنولوژیکی مدل سبب بهبود شبیه‌سازی مدل می‌گردد (Boogaard *et al.*, 2013). بدین معنا که در ابتدا باید مدل مراحل رشد گیاه (جوانه‌زنی، گلدهی و بلوغ) را به‌درستی و با دقت بالا شبیه‌سازی کند به‌طوری‌که اختلاف زیادی بین تاریخ‌های برداشت‌شده در مزرعه و تاریخ‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل نباشد. سپس واسنجی فیزیولوژیکی مدل باید انجام گیرد. بنابراین، مرحله اول واسنجی فنولوژیکی گیاه بود که بر اساس تاریخ‌های فنولوژیکی برداشت‌شده در مزرعه انجام گرفت. پس از آن برای اعتبارسنجی مدل واسنجی شده از داده‌های فنولوژیکی موجود در بولتن‌های کشاورزی برای گندم در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی کرج برای سال‌های زراعی ۱۳۸۶-۱۳۸۵، ۱۳۸۷-۱۳۸۶، ۱۳۸۸-۱۳۸۷ و ۱۳۸۹-۱۳۸۸ استفاده شد. لازم به ذکر است که شروع شبیه‌سازی در این مطالعه از جوانه‌زنی صورت گرفته و برای واسنجی فنولوژیکی از تاریخ‌های گلدهی و رسیدن استفاده شد.

مرحله دوم، واسنجی فیزیولوژیکی است. واسنجی مدل بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای انجام شد که بر اساس ۵ مرحله نمونه‌برداری و عملکرد نهایی مزرعه انجام گردید. نهایتاً مقدار خطای شبیه‌سازی مدل با استفاده از روابط موجود تخمین زده شد. در مدل شبیه‌سازی WOFOST طول دوره رشد گیاه (مدت زمان بین گلدهی تا رسیدن یا پیری) به دو قسمت تقسیم می‌شود. دوره قبل از گلدهی که به دوره زمانی بین جوانه‌زنی تا گلدهی گفته می‌شود. توسعه فنولوژیکی در این دوره برای برخی گیاهان اعم از گندم و جو زمستانه تحت تأثیر طول روز[1] (F(P)) و درجه روز رشد (TSUM1) است. دوره دوم دوران پس از گلدهی است که برای تمام گیاهان تنها وابسته به درجه روز رشد (TSUM2) می‌باشد. بنابراین برای کالیبراسیون در ابتدا بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای مقدار درجه روز رشد از جوانه‌زنی تا گلدهی (TSUM1) و از گلدهی تا رسیدن (TSUM2) محاسبه گردید. سپس با توجه به اینکه گندم جزء گیاهانی است که تحت تأثیر طول روز (فتوپریودیک) می‌باشد یک عامل طول روز (photoperiod reduction) بر اساس مقدار بهینه و بحرانی طول روز (factor F(p)) برای دوره رشد قبل از گلدهی باید در نظر گرفته شود (معادلات شماره ۱ الی ۵).

مقادیر TSUM1 و TSUM2 بر اساس درجه روز رشد در دوره رشد گیاه محاسبه شد که برابر است با متوسط درجه حرارت شبانه‌روز منهای مقدار دمای پایه (صفر جه سانتیگراد).

$$TSUM = T - T_{base} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$DVR = \frac{f(P).f(T)}{TSUM1} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$DVS = \sum_{em}^{ma} DVR \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$f(T) = T_{avg} - T_{base} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$f(P) = \frac{(P - P_c)}{(P_0 - P_c)} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در این روابط T متوسط دمای شبانه‌روز برحسب°C، T_{base} دمای پایه که در دمای کمتر از آن رشد گیاه متوقف می‌گردد (°C). این مقدار برای گندم صفر درجه سانتی‌گراد می‌باشد. F(P)فاکتور کاهش طول روز و P طول روز، Pc مقدار بحرانی و P مقدار بهینه طول روز است (مقدار بحرانی و بهینه طول روز برای گندم به ترتیب ۸ و ۱۳/۵ در نظر گرفته شد (Wolf, 2003).

مشاهدات مزرعه‌ای

در این مطالعه از داده‌های گیاهی گندم رقم پیشتاز استفاده شد. بدین منظور برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در طول دوره رشد گیاه استفاده گردید. مزرعه موردمطالعه در مرکز تحقیقات کشاورزی استان قزوین واقع در اسماعیل‌آباد قرار داشت. تاریخ‌های فنولوژیکی گندم اعم از جوانه‌زنی، گلدهی و برداشت ثبت گردید و در هر مرحله نمونه‌برداری از مزارع در تاریخ‌های مختلف انجام گرفت.

نمونه‌برداری‌ها شامل شاخص سطح برگ (LAI)، عملکرد دانه (kg/ha)، عملکرد بیولوژیک (Kg/ha)، وزن خشک برگ (kg/ha)، وزن خشک ساقه (kg/ha) بوده است. نمونه‌های برداشت‌شده بلافاصله در آزمایشگاه توزین و شاخص سطح برگ

۱. فتوپریودیک

www.SID.ir

Archive of SID

اندازه‌گیری شده و سپس به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۴۵ درجه سیلسیوس قرار داده شدند. عملکرد نهایی مزرعه نیز پس از برداشت کل محصول مزرعه اندازه‌گیری و ثبت گردید.

بررسی دقت برآورد مدل

جهت بررسی کارایی مدل WOFOST در برآورد ماده خشک و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد از شاخص‌های آماری شامل میانگین مجذور مربعات خطا نرمال شده (RMSE)، ضریب کارآمدی (EF)، ضریب باقیمانده (CRM) و شاخص سازگاری (d) استفاده شد (روابط ۶ تا ۱۰). در تمام شاخص‌ها O_i، P_i، $\overline{O}$، $\overline{P}$ و N به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای، مقادیر شبیه‌سازی‌شده، میانگین مقادیر مشاهده‌ای، میانگین مقادیر شبیه‌سازی توسط مدل و N تعداد مشاهدات است (Willmott, 1981).

(رابطه ۶)
$$RMSE=\left[\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2 \Big/ n\right]^{0.5}\cdot\frac{100}{\overline{O}}$$

(رابطه ۷)
$$d=1-\left[\sum_{i=1}^{N}(P_i-O_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{N}\left(\left|P_i'\right|+\left|O_i'\right|\right)^2\right] \quad 0\le d\le 1$$

$$O'=(O_i-\overline{O})$$

$$P'=(P_i-\overline{P})$$

شاخص سازگاری (d) یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد مدل کاراتر است و مقادیر شبیه‌سازی‌شده قابل‌اطمینان‌تر هستند. در حالت ایده‌ال این شاخص برابر یک است.

ضریب کارآمدی یکی دیگر از شاخص‌های آماری است که برای ارزیابی مدل بکار رفته است (معادله ۷).

(رابطه ۸)
$$EF=\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2-\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2$$

ضریب کارآمدی (EF[1]) در حالت ایده‌ال برابر ۱ است. مقدار این شاخص مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. شاخص EF می‌تواند منفی هم باشد. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، برآورد بهتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده دارد.

ضریب باقیمانده (CRM[2]) نشان‌دهنده مقادیر شبیه‌سازی‌شده خیلی بزرگ یا خیلی کوچک نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. در حالت ایده‌ال چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند مقدار این شاخص برابر صفر می‌شود.

$$CRM=\frac{\sum_{i=1}^{n}Oi-\sum_{i=1}^{n}Pi}{\sum Oi}$$

(رابطه ۹)

ضریب CD[3] نسبت پراکندگی را بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. حداقل مقدار این شاخص صفر است. در حالت ایده‌ال چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند مقدار این شاخص برابر یک می‌شود (Loague and Green, 1991).

$$CD=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\overline{O})}{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\overline{O})}$$

(رابطه ۱۰)

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی فنولوژیکی مدل

مدل بر اساس داده‌های فنولوژیکی برداشت‌شده در مزرعه واسنجی گردید. بدین‌صورت که مدل برای گیاه گندم با استفاده از داده‌های خاک و هواشناسی اجرا شد و مقدار TSUM1 و TSUM2 (همان‌طور که پیش‌ازاین ذکر شد این مقادیر بر اساس تاریخ‌های جوانه‌زنی، گلدهی و رسیدن بدست می‌آیند) در هر اجرا تغییر پیدا کرد. این کار تا زمانی که تاریخ‌های فنولوژیکی شبیه‌سازی‌شده و برداشت‌شده یکی شدند ادامه پیدا کرد. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای مزرعه مقدار TSUM1 و TSUM2 به ترتیب ۹۲۰ و ۱۰۸۰ بدست آمد. پس از آن مدل کالیبره شده با استفاده از بولتن‌های کشاورزی موجود برای گندم در استان البرز واسنجی شد. شکل (۱) نتایج واسنجی را نشان می‌دهد.

تاریخ گلدهی به تاریخی گفته می‌شود که ۵۰ درصد گیاهان مزرعه به گلدهی رسیده باشند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داد شده است بین تاریخ‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در سال‌های مختلف به‌طور متوسط ۱۱ روز اختلاف وجود دارد که بیشترین آن برای سال زراعی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ و کمترین آن ۹ روز برای سال ۱۳۸۶-۱۳۸۵ است. در مطالعه شخر و همکاران که در سال ۲۰۰۸ انجام شده مقدار خطای برآورد زمان گلدهی ۸/۹ روز بدست آمد.

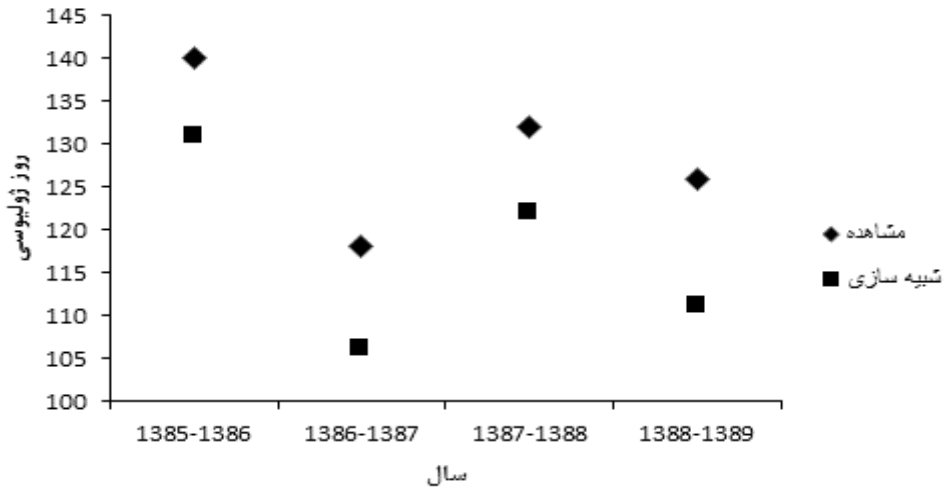
با توجه به مقادیر موجود در شکل (۲) مدل تاریخ‌های رسیدن را در سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۸ زودتر و در سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۸۸ دیرتر از مشاهدات مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرده

1. Modeling Efficiency
2. Coefficient of Residual Mass
3. Coefficient of Determination

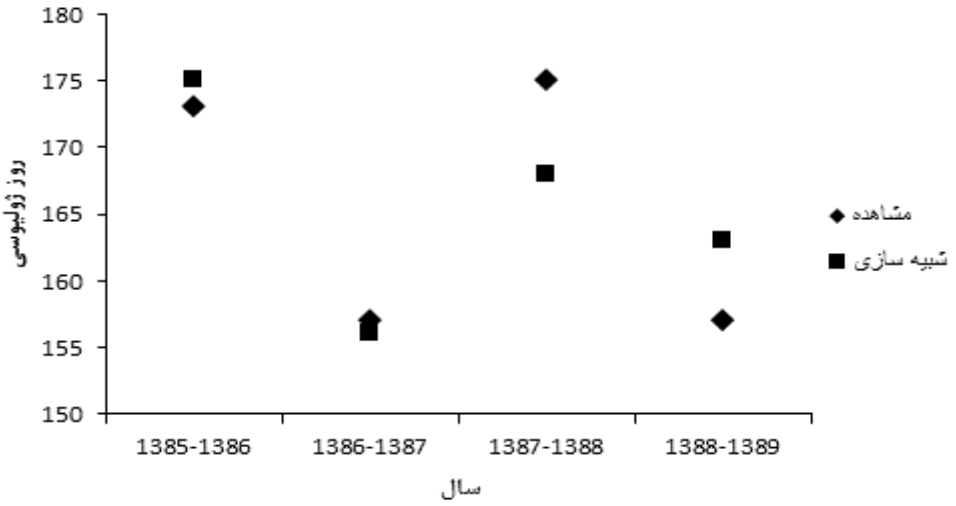
www.SID.ir

Archive of SID

است ولی در سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۸۵ و ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تاریخ‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای بر هم منطبق است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است اختلاف بین تاریخ‌های گلدهی مدل و مقادیر مشاهده‌ای بیشتر از تاریخ رسیدن می‌باشد که با مطالعه Boogaard et al., (2013) مطابقت دارد.



شکل ۱ - تاریخ‌های گلدهی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای گندم



شکل ۲- تاریخ‌های رسیدن فنولوژیکی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای گندم

در میان تحقیقات انجام‌گرفته، بهترین دقت در شبیه-سازی تاریخ‌های فنولوژیکی در مطالعه میشا و همکاران (۲۰۱۳) به ترتیب ۲ و ۴ روز برای گلدهی و رسیدن گزارش شده است (MISHRA *et al*., 2013). در مطالعه روتر و همکاران (۲۰۱۲) برای جو بهاره مقدار انحراف معیار برای شبیه‌سازی تاریخ‌های گلدهی و رسیدن به ترتیب ۵ و ۷ روز و در مطالعه پالوسو و همکاران ۷ و ۱۱ روز بدست آمده (Rötter *et al*., 2012; Palosou *et al*., 2011) درحالی‌که مقدار انحراف معیار در این مطالعه ۱۱ و ۴/۷ برای گلدهی و رسیدن بدست آمده است. بنابراین تفاوت‌ها بین تاریخ‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای قابل‌قبول بوده و میزان اختلاف موجود می‌تواند به دلیل خطا در تشخیص دقیق تاریخ‌های مذکور اتفاق افتاده باشد.

واسنجی فیزیولوژیکی مدل

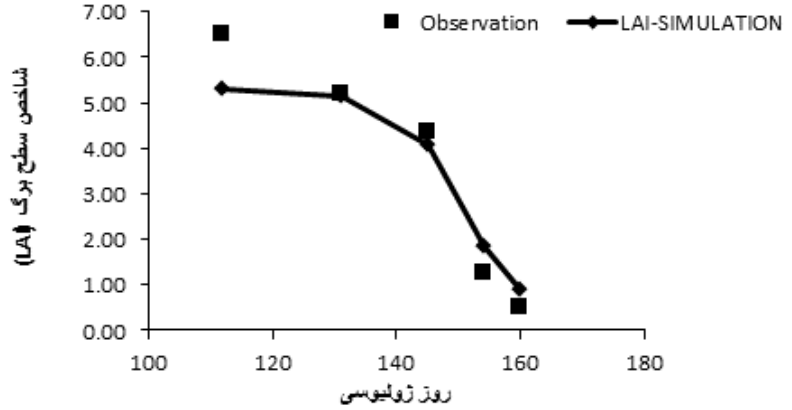
واسنجی مدل بر اساس شاخص سطح برگ (LAI)، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه برحسب وزن خشک (کیلوگرم بر هکتار) انجام گرفت. شکل (۳) مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ را نشان می‌دهد.

مدل برآورد قابل قبولی از شاخص سطح برگ داشته است. در نمونه‌گیری اول اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی‌شده و اندازه-گیری‌شده زیاد است که می‌تواند به دلیل خطا در نمونه‌برداری

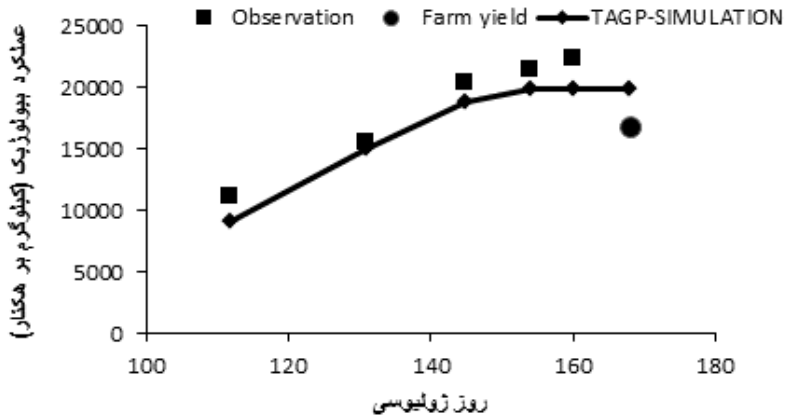
www.SID.ir

Archive of SID

باشد. اختلاف در مابقی نقاط بسیار کم و برازش بسیار خوبی بین نقاط وجود دارد.



شکل ۳- مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ.



شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده عملکرد کل

شکل (۴) مقادیر عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی و اندازه-گیری را نشان می‌دهد. به‌جز مقدار عملکرد نهایی مزرعه، مدل مقدار عملکرد بیولوژیک را کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است درصورتی‌که در مطالعه Palosuo et al., (2011) مدل عملکرد را بیشتر برآورد کرده است این در حالی است که نتایج بدست آمده با نتایج Boon-prins (1993) همخوانی دارد.

شکل (۵) مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای عملکرد دانه را نشان می‌دهد. مقدار شبیه‌سازی‌شده در برخی نقاط بیشتر و در برخی نقاط کمتر از مقدار اندازه‌گیری بوده است. به‌طورکلی بر اساس مطالعات انجام‌شده برازش قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری وجود دارد (Boogaard *et al.*, ; 2013; Palosuo *et al.*, 2011 Rötter *et al.*, 2012).

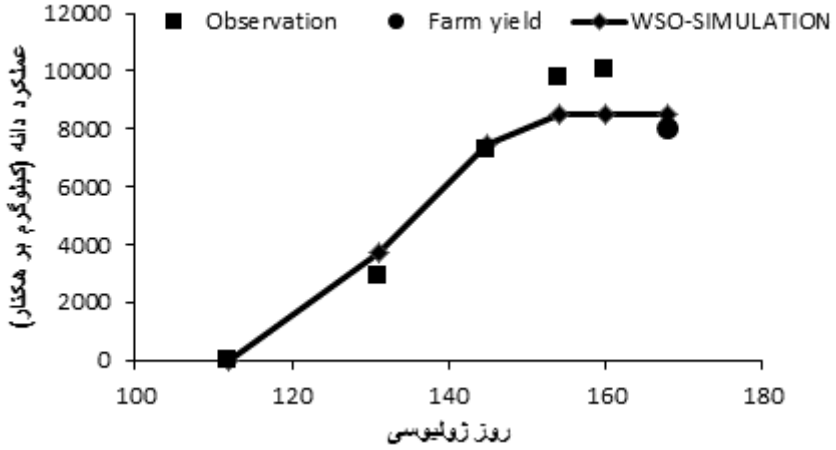
برای بررسی بیشتر نتایج مقدار خطای برآورد مدل مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

براساس نتایج بدست آمده در جدول (۳) میزان خطای برآورد مدل برای شاخص سطح برگ از عملکرد دانه و بیولوژیک بیشتر بوده است که با توجه به مقدار بدست آمده برای شاخص پراکندگی علت آن واریانس بین داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. به زبان ساده‌تر این اختلاف بخاطر خطا در نمونه‌برداری ایجاد شده است. با توجه به مقدار شاخص کارآیی بدست‌آمده، نتایج مدل در برآورد هر سه پارامتر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص سطح برگ قابل‌قبول بوده است و بیشترین کارایی را در برآورد عملکرد کل داشته است. شاخص ضریب باقیمانده (CRM) بین نتایج مدل و مشاهده برای تمام پارامترها منفی است که نشانگر این مطلب است که مدل برای تمام پارامترها مقادیر را کمتر از مقدار اندازه‌گیری برآورد کرده است. مقادیر ضریب کارایی (d) نیز نشان‌دهنده کارایی خوب مدل برای شبیه‌سازی است که طبق این شاخص نیز مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ بیشترین کارایی (تقریباً برابر یک) را داشته است. در شاخص تعیین (CD)، کمترین مقدار برای عملکرد بیولوژیک است. این بدین معنی است که پراکندگی نتایج پیش-بینی مدل و نتایج مزرعه برای مقادیر عملکرد بیولوژیک کمترین

www.SID.ir

Archive of SID

بوده است و پس از آن برای عملکرد دانه و بیشترین مقدار هم مربوط به شاخص سطح برگ است.



شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده عملکرد دانه

جدول ۳. مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های آماری برای بررسی کارایی مدل

شاخص آماری	مقدار شاخص		
	شاخص سطح برگ	عملکرد بیولوژیک	عملکرد دانه
NRMSE (%)	۱۵/۴	۱۱/۱	۱۲/۰۵
EF	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۸۵
CRM	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۷
d	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۵
CD	۱/۴۸	۰/۹۳	۱/۸۶

نتیجه‌گیری کلی

ازآنجایی‌که واسنجی فنولوژی مدل بر دقت شبیه‌سازی تأثیرگذار است و درواقع مراحل فنولوژیکی گیاه را مشخص می‌کند. در ابتدا واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST بر اساس تاریخ-های فنولوژیکی موجود در بولتن‌های کشاورزی انجام گردید و با توجه به مطالعات انجام شده نتایج قابل قبولی داشت. پس از آن در مرحله بعد واسنجی مدل گیاهی مجدداً بر اساس پارامترهای برداشت‌شده در مزرعه نیز انجام گرفت که نتایج حاکی از برازش مناسب مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای بود. با توجه به شاخص‌های کارایی ضریب باقیمانده و ضریب تعیین، مدل کارایی زیادی در شبیه‌سازی پارامترهای گیاهی داشته است. در این میان مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ بهترین کارایی را داشته و پس از آن برآورد مناسبی از مقدار عملکرد بیولوژیک و دانه داشته است. نتایج این مطالعه حاکی از کارآیی مناسب این مدل برای شبیه‌سازی رشد گندم زمستانه است. در نهایت پس از حصول اطمینان از نتایج مقدار نیاز آبی گندم ۴۴۳ میلی‌متر برآورد گردید با توجه به اهمیت مباحث نوین در کشاورزی و سهولت استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی اگر کالیبراسیون دقیق برای گیاهان مختلف و واریته های مختلف انجام شود، استفاده از این مدل‌ها جهت بررسی استراتژی‌های مختلف و پیش‌بینی مقدار محصول می‌تواند مفید واقع شود.

REFERENCES

Ahmadi, M., Farhadi Bansouleh, B. and Ghobadi, M.(2014). Spatial and Temporal Variations of Barley Yield under Deficit Irrigation Management (Case study: Kermanshah province, Mahidasht region). *Water and Soil Science*, 23(4), 19-32.(In Farsi)

Ahmadi, M., Hooshmand, A.R., Nasab, S.B. and Sharifi, M.A. (2018). Sensitivity analysis of crop growth simulation model performance to crop and weather input data. *Internashional Journal Agronony Agricalture Research*. , 12(5), 72-84.

Ahmadvand, M.r. and Najafpur, Z.a. (2010). Investigation of cultivation surface, , production and supportive policies of wheat During the first to fourth development plans. 2Quarterly *Journal of Economic Research and Policies*, 18(53): 59.

www.SID.ir

Archive of SID

76.

Amiri, E. (2016). Assessment of CERES-Wheat Model in simulation of varieties of wheat yield under different irrigation treatments. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 5(3): 73-85.

Boogaard, H., Wolf, J., Supit, I., Niemeyer, S. and van Ittersum, M. (2013). A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union. *Field Crops Research*, 143: 130-142.

Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rötter, R.P., Cabrera, J.M.C.A. and 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, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.

Boon-Prins, E.R. (1993). Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community.

Confalonieri, R. (2006). Exploratory sensitivity analysis of cropsyst, warm and wofost: a case-study with rice biomass simulations Italian Journal of Agrometeorology 17(25(3)): 17-25.

Djaby, B., Wit, A.d., Kouadio, L., Jarroudi, M.E. and Tychon, B.(2013). Spatial Distribution of Calibrated WOFOST Parameters and Their Influence on the Performances of a Regional Yield orecasting System. 2013, 2(4).

FAO (Food and Agriculture Organization) (2017). Country Analysis. Jouly 04, 2018, from http://www.fao.org.

Farhadi, B.B. (2009). Development of a spatial planning support system for agricultural policy formulation related to land and water resources in Borkhar & Meymeh district, Iran. Wageningen University, Phd Thesis: 279.

Gilardelli, C., Confalonieri, R., Cappelli, G.A. and Bellocchi, G. (2018). Sensitivity of WOFOST-based modelling solutions to crop parameters under climate change. Ecological Modelling, 368: 1-14.

Kroes, J., van Dam, J., Huygen, J. and Vervoort, R. (1999). User's guide of SWAP version 2.0: Simulation of water, solute transport, and plant growth in the soil–atmosphere–plant environment. Rep.

Kroes, J.G. and Supit, I. (2011). Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. Agriculture, *Ecosystems & Environment*, 144(1): 370-381.

Liyuan, W., Jingfeng, H., Ping, G. and Hongyan, W. (2017). Estimating winter wheat yield by assimilation of MODIS LAI into WOFOST model with Ensemble Kalman Filter, 6th *International Conference on Agro-Geoinformatics*. IEEE, Fairfax, VA, USA.

Loague, K. and Green, R.E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7(1): 51-73.

Ma, G. *et al*., 2013. Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield. Mathematical and Computer Modelling, 58(3): 634-643.

Mishra, , S.K., Shekh, A. M., Yadav, S.B., Kumar, A., Patel, G.G., Pandey, V. and Patel, H. R.(2013). Simulation of growth and yield of four wheat cultivars using WOFOST model undermiddle Gujarat region. *Journal of Agrometeorology*, 15(1): 43-50.

Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J. and Trnka, M. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*, 35(3): 103-114.

Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C. and Olesen, J.E. (2012). Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Research*, 133: 23-36.

Shekhar, C., Singh, D., Singh, R. and Rao, V. (2008). Prediction of wheat growth and yield using WOFOST model. *Journal of Agrometeorology (Special issue-Part 2)*, 400: 402.

Supit, I., Hooijer, A.A., Diepen, V. and (Eds.), C.A. (1994) .System Description of the WOFOST0.6 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, European Communities (EUR15956EN), Luxembourg.

van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H. and Rappoldt, C.(1989). WOFOST: a simulation model of crop production. Soil Use and Management, 5(1): 16-24.

Vazifedoust, M. (2007). Development of an agricultural drought assessment system: integration of agrohydrological modelling, remote sensing and geographical information. Wageningen University, Phd Thesis: 171.

Willmott, C.J.(1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2): 184-194.

Wit, A.d., 2017. PCSE Documentation Release 5.3, wageningen university and research, Netherland.

Wolf, J., 2003. Calibration of WOFOST crop growth simulation model for use within CGMS. Modified by Allard de Wit (2010), Wageningen university and research (http:// www. wofost. wur. nl): 38.

Zhou, J., Cheng, G., Li, X., Hu, B.X. and Wang, G.(2012). Numerical Modeling of Wheat Irrigation using Coupled HYDRUS and WOFOST Models. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2): 648-662.

www.SID.ir