

تحلیل حساسیت جامع پارامترهای گیاهی مدل WOFOST برای گیاهان ذرت و گندم در شبیه‌سازی عملکرد

محصول

مجتبی شفیع*^۱، بیژن قهرمان^۲، بهرام ثقیان^۳، کامران داوری^۴، مجید وظیفه‌دوست^۵

۱. استادیار پژوهش، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق (EWERI)، مشهد

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد گروه مهندسی عمران آب، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

۴. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۳)

چکیده

مدل شبیه‌سازی رشد محصول WOFOST به طور گسترده‌ای در تخمین عملکرد محصولات زراعی در مقیاس مزرعه‌ای و منطقه‌ای و شرایط مختلف اقلیمی بکار می‌رود. در فرآیند مدل‌سازی، همواره به سبب وجود تعداد زیاد پارامترها و از طرفی کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده نمی‌توان تمامی پارامترهای مدل را تخمین زد. بنابراین معمولاً در فرآیند مدل‌سازی پارامترهای حساس مدل شناسایی و سپس تخمین زده (واستجی) می‌شوند. روش‌های جامع تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت رتبه‌بندی پارامترهای مدل‌ها از لحاظ تأثیر آنها در خروجی‌ها و در نظر گرفتن تمام فضای پارامتری مدل‌ها می‌باشند. در این روش‌ها علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مدل به تنهایی، تأثیر ترکیب پارامترهای مختلف نیز در تحلیل حساسیت لحاظ می‌شود. در این مطالعه از روش تحلیل حساسیت منطقه‌ای یکی از روش‌های پرکاربرد تحلیل حساسیت جامع، جهت تحلیل حساسیت پارامترهای مدل WOFOST برای دو گیاه ذرت علوفه‌ای و گندم زمستانه استفاده شده است. شاخص حساسیت پارامترها بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و در سطح احتمال معنی‌داری ۹۵٪ بر اساس روش منطقه‌ای تحلیل حساسیت محاسبه شده و سپس نتایج تحلیل حساسیت در مزارع مورد مطالعه بررسی گردید. تغییرات شاخص حساسیت در دو مزرعه مورد مطالعه از حداقل ۰/۰۰۶ (غیر حساس) تا حداکثر ۰/۳۷ (حساسیت زیاد) بدست آمده است. برای گیاه ذرت نتایج نشان داد که تأثیرگذارترین پارامترها در شبیه‌سازی عملکرد مربوط به تأثیر دما (پارامترهای TSUMEA و TSUMAM) و فرآیند جذب نور (SLA، AMAX و EFF) در گیاه می‌باشند؛ اما برای گیاه گندم بیشتر پارامترهای مرتبط با جذب نور (SLA، RGLAI، AMAX، EFF و KDIF)، بیشترین اهمیت را در شبیه‌سازی عملکرد آن دارند.

واژه‌های کلیدی: تابع توزیع تجمعی، حساسیت، عملکرد محصول

مقدمه

شبیه‌سازی رشد گیاه، به ویژه میزان تولید محصول در انتهای فصل رشد می‌باشد. کفایت و قابلیت مدل گیاهی از طرفی بستگی به کیفیت داده‌های ورودی آن دارد و از طرف دیگر بستگی به ساختار مدل یعنی روابط و پارامترهایی که توسط آن مدل فرآیندهای رشد گیاه را شبیه‌سازی می‌کند (Fodor and Kovacs, 2003; Rivington et al., 2006). زمانی مدل می‌تواند سیستم واقعی را درست شبیه‌سازی کند که در سطح مشخصی از جزئیات، بین داده‌های ورودی مدل و ساختار مدل انسجام برقرار باشد. در اغلب مدل‌های گیاهی (مانند CropSyst، WARM و WOFOST) متغیرهای زیادی وجود دارد که مقادیر بیشتر آنها (به‌خصوص پارامترهای تجربی) با اطمینان مشخص

مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول ابزاری مناسب جهت تحلیل و ارزیابی سیستم‌های زراعی می‌باشند. این مدل‌ها می‌توانند اطلاعات زیادی را در مورد نحوه رشد و نمو گیاهان زراعی در طول فصل رشد فراهم نمایند. از مهمترین کاربرد آنها می‌توان به بررسی تأثیرات سناریوهای مدیریتی و اقلیمی در تولید محصولات، هم در مقیاس مزرعه (Droogers, 2000) و هم در مقیاس منطقه‌ای اشاره کرد (Ma et al., 2013). اما مسئله‌ای که هنوز باقی‌مانده است، اطمینان از برآوردهای این مدل‌ها در

حساسیت (Hornberger and Spear, 1981; Mertens *et al.*, 2005) بر مبنای تئوری نمونه برداری مربع لاتین و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف به نام تحلیل حساسیت منطقه‌ای^۴ (RSA) در ارزیابی حساسیت پارامترهای گیاهی مدل WOFOST برای دو گیاه ذرت علوفه‌ای و گندم زمستانه در مزارع فاریاب در منطقه خشک اصفهان می‌باشد. مدل WOFOST یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول است که اجزاء عملکرد را در مراحل مختلف بیولوژیک رشد گیاهان یک ساله به صورت پویا شبیه‌سازی و بررسی می‌کند (Supit *et al.*, 2003; Kroes and van Dam, 1994). تا کنون مطالعات گسترده‌ای از کاربرد مدل WOFOST گزارش شده است. Boons-Prins *et al.* (1993) جهت پیش‌بینی عملکرد محصولات اصلی زراعی در مقیاس منطقه‌ای و ملی در بخش‌هایی از اروپا از این مدل استفاده کرده‌اند. ایشان در مطالعه خود از بین حدود ۳۰ پارامتر مدل، پنج پارامتر را برای واسنجی انتخاب کردند و سپس مقادیر آنها را برای گیاهان مختلف در اقلیم‌های متفاوت تخمین زدند. از جمله مهم‌ترین کاربردهای WOFOST در اتحادیه اروپا برای برآورد پتانسیل عملکرد گیاهان به عنوان تابعی از شرایط اقلیم و خاک می‌باشد. در این تحقیقات مدل WOFOST را در سیستم پایش رشد گیاهی (CGMS^۵) جهت تخمین عملکرد گیاهان مختلف نظیر گندم، پنبه، برنج و دانه‌های روغنی در تلفیق با سیستم اطلاعات جغرافیایی بکار بردند (Wolf and Diepen, 1994). Confatonieri *et al.* (2009) توسط روش تحلیل حساسیت، پارامترهای مدل WOFOST را برای شبیه‌سازی عملکرد محصول برنج بررسی کردند و تاثیرگذارترین پارامترهای گیاهی مدل را مشخص کردند. Zhou *et al.* (2012) نیز جهت مدل‌سازی رشد گندم، پنج پارامتر WOFOST را از حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی عملکرد دانه در گندم معرفی کردند. Kuchaki *et al.* (2006) نیز جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گندم در ایران از مدل WOFOST استفاده کرده‌اند. Amiri *et al.* (2011) مدل WOFOST را در شرایط مختلف مدیریت آبیاری برنج ارزیابی کرده‌اند. همچنین Bafkar *et al.* (2013) برای پیش‌بینی پتانسیل تولید ذرت مدل شبیه‌سازی WOFOST را استفاده کرده‌اند. در این تحقیقات کارایی مدل جهت شبیه‌سازی اجزاء عملکرد به اثبات رسیده است.

اما تاکنون در کمتر مطالعه‌ای به بررسی حساسیت

نیستند. برخی از پارامترهای مدل‌ها توسط آزمایش‌های مزرعه‌ای و اندازه‌گیری‌های محلی یا با استفاده از نتایج سایر تحقیقات گذشته انتخاب می‌شوند. برخی دیگر از پارامترهای گیاهی در مدل‌ها به نوع گیاه مربوط بوده که با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج خروجی مدل واسنجی می‌شوند (Makowski *et al.*, 2006). در تمامی این مراحل عدم اطمینان وجود دارد. بنابراین وجود خطا در پارامترهای مدل از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت بوده و شناخت واکنش مدل نسبت به اعمال تغییرات در مقادیر پارامترهای آن یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازها در استفاده از مدل‌ها به شمار می‌آید. تحلیل حساسیت مشخص می‌کند که نتایج خروجی مدل تا چه اندازه به ورودی‌های آن وابسته می‌باشد (Makowski *et al.*, 2006; Mertens *et al.*, 2005). به بیان دیگر تحلیل حساسیت از مهم‌ترین گام‌ها در شناسایی عدم قطعیت پارامترها بوده و به طور غیر مستقیم قابلیت مدل را برای تخمین نشان می‌دهد (Martorana and Bellocchi, 1999).

به طور کلی روش‌های تحلیل حساسیت به دو دسته روش‌های موضعی^۱ و روش‌های جامع^۲ تقسیم می‌شوند. روش‌های موضعی بر مبنای بررسی گرادبان خروجی مدل با توجه به تغییر مقادیر پارامترها در یک نقطه‌ی مشخص از فضای پارامتری مدل می‌باشد (Saltelli *et al.*, 2004). کاربرد روش‌های موضعی ساده است هرچند که کاربرد آنها برای مدل‌های غیرخطی پیچیده و با پارامترهای زیاد از دقت کمتری برخوردار است (Kucherenko *et al.*, 2009) و کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی روش‌های جامع، معیارهای سنجش حساسیت را با استفاده از نمونه‌گیری‌های^۳ انجام شده پارامترها از فضای پارامتری مدل بدست می‌آورند و برای هر نمونه (مجموعه) پارامتر مدل اجرا می‌شود و نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های جامع تحلیل حساسیت نتایج باثبات‌تری را فراهم می‌کنند زیرا معیارهای حساسیت در این روش‌ها اهمیت پارامترها را به صورت میانگینی از کل دامنه‌ی تغییرات پارامترها (فضای پارامتری) ارائه می‌دهند (Kroes and van Dam, 2003; Saltelli *et al.*, 2004). به عبارتی در این روش‌ها اثر ترکیب پارامترهای مختلف در شبیه‌سازی‌های مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این نوع تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت رتبه‌بندی پارامترهای مدل‌ها از لحاظ تأثیر آنها در خروجی‌ها می‌باشد. هدف از این تحقیق کاربرد یک روش جامع تحلیل

4. Regional Sensitivity Analysis
5. Crop Growth Monitoring System

1. Local
2. Global
3. Samples

میلیمتر می‌باشد. داده‌های مورد نیاز تحقیق در طول دوره رشد محصولات در طول فصل زراعی ۸۴-۱۳۸۳ جمع‌آوری شده (Vazifedoust, 2007). داده‌های اندازه‌گیری شده شامل: داده‌های اقلیمی، داده‌های رطوبت خاک، آبیاری و مشخصات گیاهی شامل ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و عملکرد محصولات می‌باشد. میزان کل ماده خشک تولیدی گیاه در طول دوره رشد برای هر محصول پنج بار اندازه‌گیری شده است و این مقادیر مهم‌ترین داده‌ها در تحلیل حساسیت و تخمین پارامترهای گیاهی مدل می‌باشند. بافت خاک در هر دو مزرعه رسی می‌باشد. مقدار چگالی ظاهری در خاک هر دو مزرعه ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد ذرات رس، سیلت و شن در آنها به ترتیب، مزرعه گندم ۴۶، ۳۶، ۱۸ و ۵۲، ۳۸، ۱۰ اندازه‌گیری شده است. همچنین طول دوره رشد ذرت علوفه‌ای از ۱۲ تیرماه تا ۵ آبان ۱۳۸۴ می‌باشد. در طول دوره رشد ۸ بار و هر بار با عمق ثابت ۱۶ سانتی‌متر آبیاری صورت گرفته است. طول دوره رشد گندم زمستانه از ۸ آبان ماه ۱۳۸۳ تا ۹ تیرماه ۱۳۸۴ می‌باشد. در طول دوره رشد ۶ بار و هر بار با عمق ثابت حدود ۱۷ سانتی‌متر آبیاری صورت گرفته است.

پارامترهای مدل WOFOST در داخل کشور پرداخته شده است و اغلب یا از مقادیر میانگین آنها با توجه به تحقیقات گذشته استفاده شده است و یا با توجه به نتایج تحلیل حساسیت سایر مطالعات پیشین فقط چند پارامتر حساس مدل مورد واسنجی قرار گرفته است (مانند Amiri et al., 2011; Bafkar et al., 2013). در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل حساسیت جامع RSA، پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای و گندم زمستانه در یک منطقه خشک (دشت قیام در اصفهان) محاسبه و ارزیابی شده است. در نهایت نتایج این تحقیق منجر به شناسایی و رتبه‌بندی پارامترهای گیاهی تأثیرگذار در شبیه‌سازی عملکرد در دو محصول مهم ذرت و گندم خواهد شد.

مواد و روش‌ها

مزارع مورد مطالعه

مزارع مورد مطالعه دو مزرعه ذرت علوفه‌ای و گندم زمستانه در واحد کشت و دام قیام، در شبکه آبیاری برخوار واقع در شمال شهر اصفهان و در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشد. این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک تا خشک با متوسط بارندگی سالانه ۱۶۵

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ و عملکرد برای محصول ذرت و گندم در دوره رشد

محصول	تاریخ	عملکرد (kh/ha)	شاخص سطح برگ (ha/ha)
ذرت	۱۳۸۴/۴/۳۱	۳۳۶/۰	۰/۰۴۸
	۱۳۸۴/۶/۵	۱۲۸۱۱/۷	۶/۵۶۰
	۱۳۸۴/۶/۱۶	۱۳۷۵۶/۰	۶/۴۵۰
	۱۳۸۴/۷/۲	۲۳۳۵۵/۹	۸/۷۰۰
گندم	۱۳۸۴/۱/۱۹	۱۰۲۴۰/۰	-
	۱۳۸۴/۲/۱	۱۱۳۴۹/۳	۶/۸۸
	۱۳۸۴/۲/۱۷	۱۹۴۶۴/۰	۵/۹۱
	۱۳۸۴/۳/۱	۲۸۸۷۲/۰	۵/۹۴
	۱۳۸۴/۳/۱۷	۳۳۴۹۶/۰	۲/۸۴

شبیه‌سازی است. در شکل (۱) ساختار مدل به همراه مراحل شبیه‌سازی فرآیندها نشان داده شده است. انرژی تابشی توسط پوشش گیاهی جذب می‌شود که تابعی از تابش دریافتی و سطح برگ گیاه است. پتانسیل فتوسنتز ناخالص برگ با استفاده از تابش جذب شده و محاسبه خصوصیات فتوسنتزی برگ محاسبه می‌شود. سپس میزان آن براساس تنش خشکی یا شوری (بیان شده توسط نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل) کاهش یافته و فتوسنتز ناخالص واقعی محاسبه می‌شود. بخشی از کربوهیدرات (CH_2O) تولید شده در فتوسنتز صرف تامین

مدل WOFOST

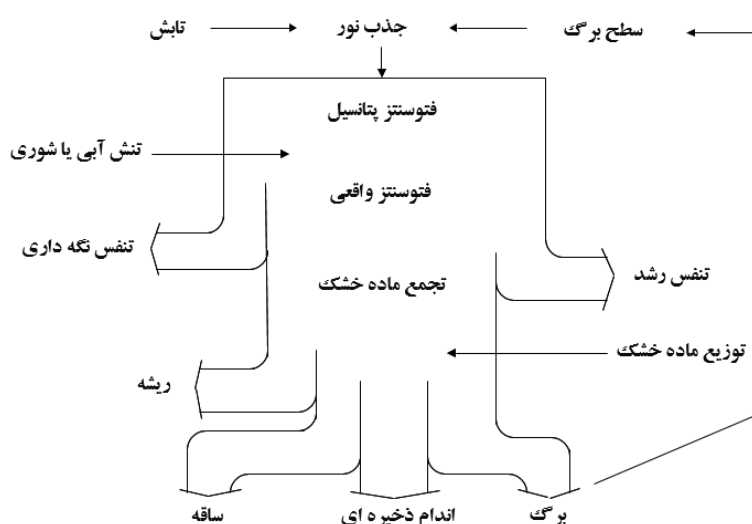
مدل WOFOST (World Food Studies)، مدل پویا و فرآیندمحور جهت شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی یک ساله در طول فصل رشد (از کاشت تا برداشت) با گام محاسباتی یک روزه می‌باشد (Supit et al., 1994; Eitzinger et al., 2004). در این مدل فرآیندهای اصلی رشد شامل: فتوسنتز، تنفس و سرعت تولید ماده خشک می‌باشد. مدل WOFOST برای سه شرایط شامل شرایط پتانسیل (بدون محدودیت)، شرایط محدودیت آبی و شرایط محدودیت عناصر غذایی قادر به

برگ و در نهایت پویا برای جذب نور^۳ می‌باشند. وزن خشک گیاه گیاه برابر با مجموع شدت رشد آنها در طول زمان بدست می‌آید. در طول دوره رشد گیاه، بخشی از زیست‌توده زنده گیاه به سبب پیری^۴ می‌میرد. جذب نور و جذب CO₂ فرآیندهای اصلی رشد گیاه می‌باشند. برخی از فرآیندهای رشد محصول مانند حداکثر شدت فتوسنتز و تنفس نگهداری تحت تأثیر دما هستند. سایر فرآیندها، مانند تخصیص مواد یا پیر شدن بافت‌های گیاه، تابعی از مراحل رشد فنولوژیکی است.

انرژی لازم برای نگهداری زیست‌توده می‌شود (تنفس نگهداری^۱) و باقی‌ماندهی کربوهیدرات تبدیل به تولید زیست‌توده و دانه می‌شود. در این فرآیند تبدیل، بخشی از وزن مواد خشک به عنوان تنفس رشد^۲ مصرف می‌شوند. مواد خشک تولید شده با استفاده از ضرایب تخصیص که تابعی از مراحل رشد فنولوژیکی گیاه است بین ریشه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و اجزاء ذخیره‌ای تقسیم می‌شوند (Eitzinger *et al.*, 2004). بخشی از مواد خشک تخصیص داده شده به برگ‌ها، تعیین‌کننده‌ی گسترش سطح

3. Light interception
4. Senescence

1. Maintenance respiration
2. Growth respiration



شکل ۱. ساختار فرآیندهای اصلی شبیه‌سازی رشد محصول در مدل WOFOST (Supit *et al.*, 1994)

خشکی و شوری از طریق نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل بر $A_{p\ gross}$ محاسبه می‌گردد. بخشی از انرژی حاصل از جذب CO₂ گیاه در فرآیندهای گیاهی تنفس مصرف می‌شوند. بخش باقی‌مانده‌ی شدت جذب خالص در طول زمان، به عبارتی در دوره رشد گیاه با استفاده از شاخص وزنی تبدیل C_e (kg kg⁻¹) به عملکرد واقعی محصول Y (kg ha⁻¹) تبدیل می‌شود:

$$Y = C_e \sum_{t=1}^N \left(\frac{30}{44} T_a T_p^{-1}(t) A_{p\ gross}(t) - R_m(t) \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

ضریب ۳۰/۴۴ جهت تبدیل شدت جذب CO₂ واقعی گیاه به وزن خشک عملکرد استفاده شده است، R_m شدت تنفس نگهداری واقعی (kg ha⁻¹ d⁻¹) و N کل طول مدت دوره رشد می‌باشد. برای اطلاعات و جزئیات بیشتر در مورد تئوری مدل به Eitzinger *et al.* (2004) مراجعه شود.

در این تحقیق از مدل WOFOST 6.0 که به مدل آب-

خاک-اتمسفیر-گیاه SWAP متصل شده (Kroes and van Dam, 2003) استفاده شده است. چون شبیه‌سازی تغییرات

فرآیند فتوسنتز تابعی از تابش جذب شده و CO₂ جذب شده توسط گیاه است. شبیه‌سازی پتانسیل عملکرد تولید (Y_p) محصول توسط محاسبه شدت جذب^۵ پتانسیل CO₂ گیاه با استفاده از تابش فعال جذب شده گیاه (PAR^c) و خصوصیات فتوسنتزی برگ‌ها صورت می‌گیرد (Eitzinger *et al.*, 2004):

$$A_{p\ gross} = A_{max} \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon_{PAR} PAR_{L,a}}{A_{max}}} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که $A_{p\ gross}$ پتانسیل شدت جذب CO₂ (kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹)،

ε_{PAR} شیب اولیه یا راندمان مصرف نور (kg CO₂ J⁻¹) و $PAR_{L,a}$ شدت جذب تابش (J m⁻² leaf d⁻¹) در عمق L در پوشش گیاه می‌باشد. تغییرات آنی شدت جذب به ازای هر لایه از برگ در طول شاخص سطح برگ پوشش گیاه و واحد روز جمع می‌شوند. در نهایت عملکرد واقعی محصول با در نظر گرفتن اثر تنش‌های

5. Assimilation
6. Photosynthetic Active Radiation

در این تحقیق تعداد ۱۸ پارامتر مدل جهت انجام تحلیل حساسیت پارامترها نسبت به شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت و گندم انتخاب شدند (جدول ۲).

رطوبت در مدل WOFOST به صورت مدل مخزنی و ساده می‌باشد، به طوری که یکی از ضعف‌های آن به شمار می‌رود. با توجه به منابع مختلف و مطالعاتی که در مورد انتخاب پارامترهای مدل WOFOST برای واسنجی آن تاکنون انجام شده است (Boons-Prins *et al.*, 1993; Kroes and van Dam, 2003; Zhou *et al.*, 2012; Confatonieri *et al.*, 2009) در این

جدول ۲. پارامترهای مدل WOFOST به همراه دامنه‌ی تغییرات مقادیر آنها برای محصول ذرت و گندم*

دامنه تغییرات		تعریف	واحد	پارامتر
گندم	ذرت			
۱۱۰۰-۱۵۰۰	۷۰۰-۱۰۰۰	دمای تجمعی از جوانه‌زنی تا گل‌دهی (بیش‌تر از صفر فیزیولوژیک)	°C	TSUMEA
۶۰۰-۹۰۰	۶۰۰-۹۰۰	دمای تجمعی از گل‌دهی تا بلوغ (بیش‌تر از صفر فیزیولوژیک)	°C	TSUMAM
۰/۱-۰/۳	۰/۰۵-۰/۲	شاخص سطح برگ در ابتدای دوره رشد	(ha ha ⁻¹)	LAIEM
۰/۰۰۴-۰/۰۱	۰/۰۱-۰/۰۴	حداکثر افزایش نسبی در شاخص سطح برگ	(ha ha ⁻¹ d ⁻¹)	RGRLAI
۲۸-۴۵	۲۵-۴۰	طول دوره رشد برگ‌ها در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد	(d)	SPAN
۰/۰۰۱-۰/۰۰۴	۰/۰۰۱۵-۰/۰۰۴	سطح ویژه برگ	(ha kg ⁻¹)	SLA
۰/۴۵-۰/۷	۰/۴-۰/۷	ضریب خاموشی	(-)	KDIF
۰/۵-۰/۷۵	۰/۴-۰/۷	ضریب روشنایی	(-)	KDIR
۰/۴-۰/۶۵	۰/۴-۰/۶۵	راندمان مصرف نور	kg CO ₂ J ⁻¹	EFF
۲۵-۵۰	۵۰-۹۰	حداکثر شدت جذب CO ₂	(kg ha ⁻¹ hr ⁻¹)	AMAX
۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به برگ	(kg kg ⁻¹)	CVL
۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به اندام‌های ذخیره‌ای	(kg kg ⁻¹)	CVO
۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به ریشه	(kg kg ⁻¹)	CVR
۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به ساقه	(kg kg ⁻¹)	CVS
۰/۰۲۵-۰/۰۴	۰/۰۲-۰/۰۴	تنفس نگهداری نسبی برگ‌ها	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	RML
۰/۰۰۵-۰/۰۱۵	۰/۰۰۵-۰/۰۲	تنفس نگهداری نسبی اندام ذخیره‌ای	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	RMO
۰/۰۱-۰/۰۲۵	۰/۰۱-۰/۰۳	تنفس نگهداری نسبی ریشه‌ها	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	RMR
۰/۰۱۳-۰/۰۳	۰/۰۱-۰/۰۳	تنفس نگهداری نسبی ساقه‌ها	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	RMS

(Boons-Prins *et al.*, 1993; Kroes and van Dam, 2003; Confatonieri *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2012) *

روش تحلیل حساسیت (Martorana and Bellocchi, 1999). در روش RSA، با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی مربع لاتین^۱ از فضای پارامتری مدل نمونه‌گیری می‌شود. به طوری که مجموعه پارامترهای مختلفی به صورت تصادفی تولید شده و سپس خروجی‌های مدل متناسب با آنها بعد از اجرای مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. روش مربع لاتین در واقع همان روش نمونه‌گیری مونت کارلو است با این تفاوت که در آن نمونه‌گیری در فواصل مساوی از دامنه منطقی هر متغیر صورت گرفته که باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو می‌شود (McKay *et al.*, 1979). روش‌های مونت کارلو یک روش عددی جهت تولید متغیرهای تصادفی است به گونه‌ای که خصوصیات تابع توزیع

روش تحلیل حساسیت هدف اصلی از تحلیل حساسیت شناخت این موضوع است که چگونه اجزاء مختلف یک مدل (پارامترها) بر نتایج خروجی مدل تأثیرگذار بوده و نتایج آن برای واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت مدل بسیار مؤثر است (Sobol, 2001). همچنین تحلیل حساسیت امکان رتبه‌بندی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر فرایند مورد شبیه‌سازی را فراهم می‌کند. همان‌طور که در مقدمه مقاله ذکر شد، روش‌های تحلیل حساسیت به دو دسته روش‌های موضعی و روش‌های جامع تقسیم می‌شوند. یکی از انواع پرکاربرد روش‌های جامع تحلیل حساسیت، روش تحلیل حساسیت منطقه‌ای (RSA) است (Freer *et al.*, 1996;)

شده، $Y_{i,sim}$ میزان عملکرد محصول شبیه‌سازی شده و n تعداد داده‌های مورد مقایسه می‌باشند.

نتایج و بحث

روش تحلیل حساسیت RSA در برنامه Matlab تهیه و به مدل WOFOST متصل گردید. در برنامه تهیه شده، دامنه‌ی اولیه پارامترها به صورت یکنواخت مشخص شد (جدول ۲) و سپس برای تولید ۲۰۰۰۰ مجموعه پارامتر، توسط روش مربع لاتین از پارامترها نمونه‌گیری شد. در ادامه برنامه، مدل اجرا شده و خروجی آن با توجه به روش شرح داده شده در بخش قبل مورد تحلیل قرار گرفت. در شکل (۲) نتایج تحلیل حساسیت برای ذرت و گندم (به ترتیب از پارامتر غیرحساس تا حساس‌ترین پارامتر) نشان داده شده است. حساس‌ترین پارامتر برای هر دو گیاه، SLA (شاخص ویژه سطح برگ) می‌باشد. همچنین به عنوان نمونه در شکل (۳)، تابع توزیع تجمعی (یا CDF) برای مجموعه پارامتر خوب (F1) و بد (F2) برای پارامترهای گیاهی TSUMEA (پارامتر با حساسیت زیاد)، CVL (پارامتر با حساسیت متوسط) و RMR (پارامتر با حساسیت کم) از مزرعه ذرت نشان داده شده است. در جدول (۳) نتایج محاسبه شاخص شدت حساسیت (T) و طبقه‌بندی شدت حساسیت پارامترها برای هر دو گیاه ذرت و گندم آورده شده است. پارامترهایی که مقدار $T \geq 0.1$ می‌باشد به عنوان پارامتر با حساسیت زیاد، $0.05 \leq T < 0.1$ حساسیت متوسط و $T < 0.05$ با حساسیت کم طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین برخی پارامترهای گیاهی مدل (جدول ۲) غیرحساس می‌باشند به طوری که آماره T در سطح احتمال ۹۵٪ معنی‌دار نبوده است (یعنی با احتمال ۹۵٪ دو توزیع تجمعی تفاوت معنی‌داری ندارند).

حاکم بر آن‌ها را حفظ کند (Tung and Yen, 2005). پس از انجام نمونه‌گیری از فضای پارامتری، مجموعه پارامترهای تولید شده براساس مقادیر تابع هدف (معیاری از تفاوت بین خروجی مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده) بدست آمده متناظرشان مرتب می‌شوند و به دو دسته مجموعه پارامتر خوب (X1) و بد (X2) تقسیم می‌شوند. سپس تابع توزیع تجمعی^۱ (CDF) پارامترهای مدل توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند:

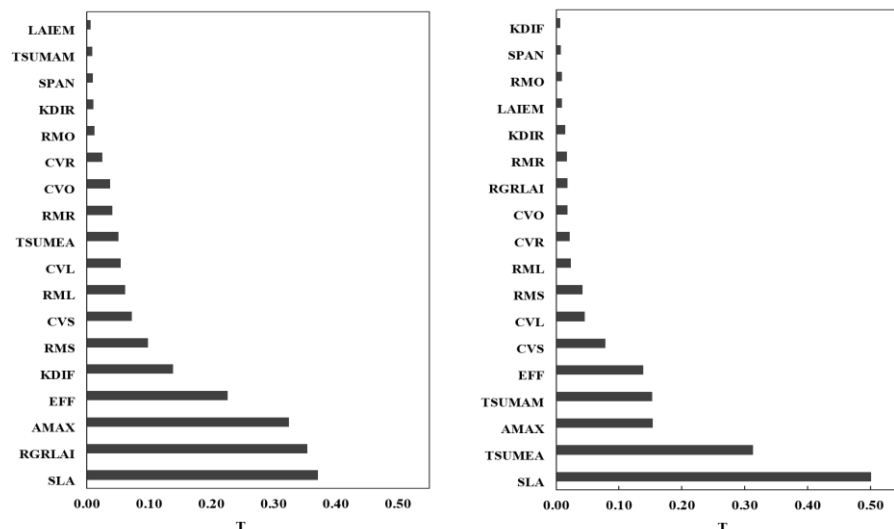
$$T = \max \left(|F1(x) - F2(x)| \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه فوق F1 و F2، CDF مجموعه پارامتر اول و دوم می‌باشد. همچنین در این آزمون هر چه میزان آماره T بیشتر باشد، احتمال اینکه دو توزیع متفاوت باشند بیشتر بوده و نشان دهنده‌ی حساسیت بیشتر پارامتر مربوطه می‌باشد. همچنین با بررسی آماره آزمون در سطح احتمال مورد نظر (به طور مثال ۹۵٪) می‌توان معنی‌داری آن را بررسی کرد (Martorana and Bellocchi, 1999). در این مطالعه تعداد نمونه‌گیری اولیه پارامترها بر اساس پیشنهاد Martorana and Bellocchi (1999) برابر ۲۰۰۰۰ انتخاب شد که موجب اطمینان از همگرایی توزیع پارامترها می‌شود. همچنین از معیار مجموع مربعات خطا^۲ (RMSE) به عنوان تابع هدف استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

به طوری که $Y_{i,obs}$ میزان عملکرد محصول اندازه‌گیری

1. Cumulative distribution function
2. Root Mean Square Error

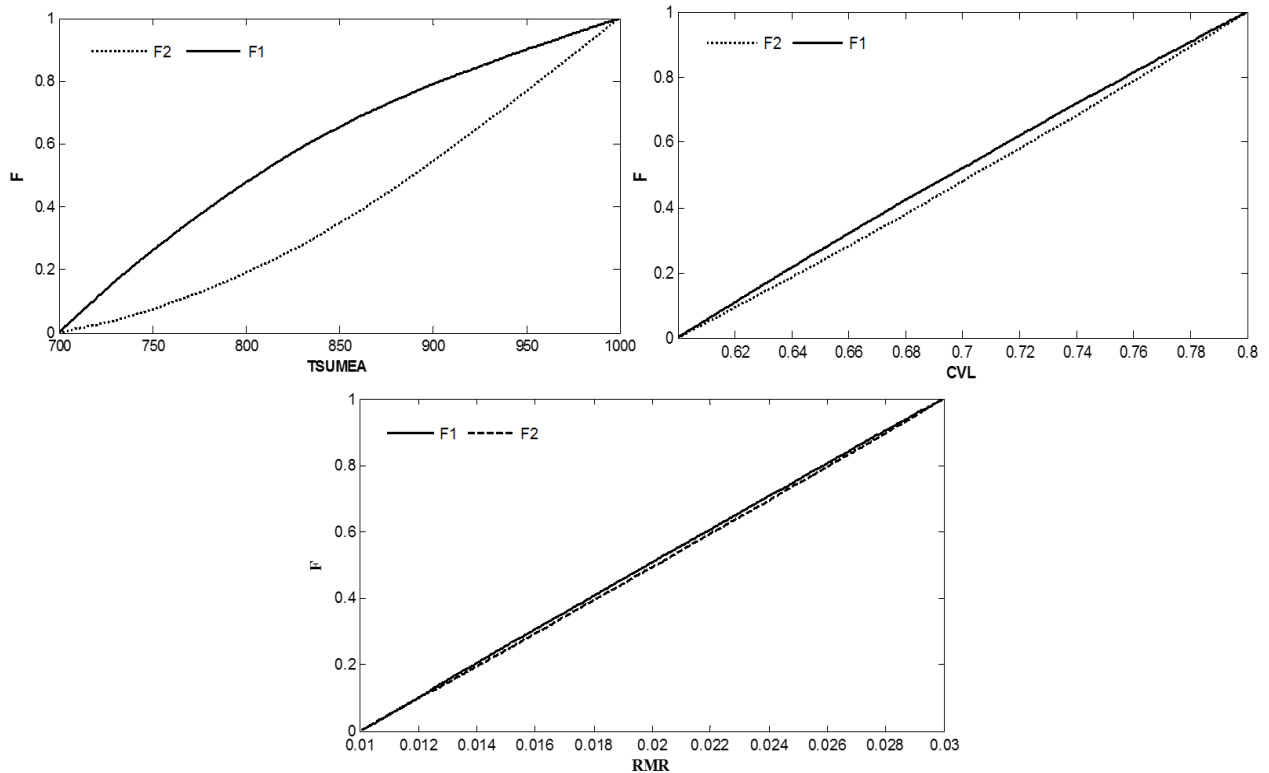


شکل ۲. مقایسه حساسیت پارامترهای گیاهی ذرت (راست) و گندم (چپ)

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت در مزرعه ذرت و گندم

پارامتر گیاهی	واحد	ذرت		گندم	
		T	حساسیت	T	حساسیت
TSUMEA	°C	۰/۳۱۳	زیاد	۰/۰۵۱	متوسط
TSUMAM	°C	۰/۱۵۳	زیاد	۰/۰۰۹*	غیر حساس
LAIEM	(ha ha ⁻¹)	۰/۰۱۰*	غیر حساس	۰/۰۰۶*	غیر حساس
RGRLAI	(ha ha ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۰۱۸	کم	۰/۳۵۵	زیاد
SPAN	(d)	۰/۰۰۸*	غیر حساس	۰/۰۱۰*	غیر حساس
SLA	(ha kg ⁻¹)	۰/۵۰۱	زیاد	۰/۳۷۲	زیاد
KDIF	(-)	۰/۰۰۶*	غیر حساس	۰/۱۳۹	زیاد
KDIR	(-)	۰/۰۱۴	کم	۰/۰۱۱*	غیر حساس
EFF	(kg ha ⁻¹ hr ⁻¹ J ⁻¹ m ² s)	۰/۱۳۹	زیاد	۰/۲۲۶	زیاد
AMAX	(kg ha ⁻¹ hr ⁻¹)	۰/۱۵۳	زیاد	۰/۳۲۵	زیاد
CVL	(kg kg ⁻¹)	۰/۰۴۶	متوسط	۰/۰۵۴	متوسط
CVO	(kg kg ⁻¹)	۰/۰۱۹	کم	۰/۰۳۷	کم
CVR	(kg kg ⁻¹)	۰/۰۲۱	کم	۰/۰۲۵	کم
CVS	(kg kg ⁻¹)	۰/۰۷۸	متوسط	۰/۰۷۳	متوسط
RML	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۰۲۳	کم	۰/۰۶۱	متوسط
RMO	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۰۱۰*	غیر حساس	۰/۰۱۲*	غیر حساس
RMR	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۰۱۷	کم	۰/۰۴۱	کم
RMS	(kg CH ₂ O kg ⁻¹ d ⁻¹)	۰/۰۴۲	متوسط	۰/۰۹۰	متوسط

* پارامترهایی که آماره T (یا تفاوت بین دو توزیع احتمال تجمعی، رابطه ۳) در سطح احتمال ۹۵٪ برای آنها معنی دار نبوده است.



شکل ۳. تابع توزیع تجمعی مجموعه پارامتر خوب (F1) و مجموعه پارامتر بد (F2) در روش RSA. برای پارامتر TSUMEA، CVL و RMR در مزرعه ذرت

باشد، نتایج روش RSA از اعتبار بالایی برخوردار خواهند بود. محاسبه همبستگی بین پارامترها در این مطالعه کمتر از ۰/۱ بدست آمده است. بنابراین نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در این تحقیق برای گیاهان ذرت و گندم را می‌توان با اطمینان در ادامه مراحل بعدی مدل‌سازی (واسنجی، تحلیل عدم قطعیت و سناریوسازی) استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه به طور گسترده‌ای در تخمین عملکرد محصولات زراعی در مقیاس نقطه‌ای (مزرعه‌ای) و منطقه‌ای و شرایط مختلف اقلیمی بکار می‌روند. مدل گیاهی WOFOST از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی گیاه و اجزا عملکرد آن می‌باشد. اما از آنجایی که دارای تعداد نسبتاً زیادی پارامتر می‌باشد همواره کاربرد آن با مشکلاتی به خصوص در مرحله واسنجی مواجه می‌باشد. یکی از ابزارهای شناخت پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند واسنجی، کاربرد روش‌های تحلیل حساسیت می‌باشد. روش‌های جامع تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن تمام فضاهای پارامتری، امکان شناخت بهتر و دقیق‌تری را نسبت به عوامل و پارامترهای حساس مدل فراهم می‌نماید. بنابراین استفاده از آنها می‌تواند موجب افزایش دقت کاربرد مدل در شبیه‌سازی‌ها شود. هدف از این مقاله انجام تحلیل حساسیت مدل پویا شبیه‌سازی رشد محصول WOFOST توسط روش جامع تحلیل حساسیت RSA بود. روش RSA به صورت برنامه در نرم‌افزار Matlab تهیه گردیده و سپس به مدل WOFOST متصل گردیده است. در نهایت با بررسی پارامترهای مدل WOFOST، پارامترهای تأثیرگذار در برآورد عملکرد محصول ذرت و گندم شناسایی و رتبه‌بندی گردید. نتایج برای دو مزرعه تحت کشت ذرت و گندم نشان داد که حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت مربوط به تأثیر فرآیند دما و فرآیند جذب نور در رشد گیاه می‌باشد و برای گندم حساس‌ترین پارامترها فقط مربوط به فرآیند جذب نور در رشد گیاه می‌باشد. بنابراین داشتن دانش لازم در مورد فرآیندهای تأثیرگذار و پارامترهای حساس مدل این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان رفتار واقعی مدل را در مزرعه ارزیابی کرد و واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی را با دقت بیشتری انجام داد.

بر اساس شکل (۲) و شکل (۳)، نتایج نشان می‌دهد که برای گیاه ذرت تأثیرگذارترین (حساس‌ترین) پارامترها به ترتیب SLA، TSUMEA، AMAX، TSUMAM و EFF می‌باشند. پارامترهای TSUMEA و TSUMAM مربوط به تأثیر فرآیند دما در رشد گیاه و عملکرد محصول می‌باشد و سایر پارامترها (SLA، AMAX و EFF) مربوط به فرآیند جذب نور در گیاه می‌باشند. همین‌طور برای گیاه گندم تأثیرگذارترین پارامترها به ترتیب SLA، RGRLAI، AMAX، EFF و KDIF می‌باشند. این نتیجه نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم پارامترهای مرتبط با جذب نور بیشترین اهمیت را دارند. عوامل مؤثر در تفاوت بین شدت حساسیت پارامترهای مدل برای دو مزرعه می‌تواند شامل: دوره رشد متفاوت گندم (زمستانه) و ذرت (تابستان) و ویژگی‌های متفاوت ژنوتیپی این گیاهان باشد. از جمله تحقیقات اخیر، (Confatonieri et al., 2009) برای محصول برنج پارامترهای CVO، CVS، CVR و AMAX را به عنوان حساس‌ترین پارامترها نسبت به تغییرات عملکرد محصول با استفاده از یک روش جامع تحلیل حساسیت موریس (Morris, 1991) بدست آوردند. در تحقیق دیگری Ma et al. (2013)، سه پارامتر SPAN، AMAX و CVO را به عنوان حساس‌ترین پارامترها در برآورد عملکرد گندم زمستانه با استفاده از روش سبل^۱ (Sobol, 2001) بدست آورده‌اند. همچنین Zhou et al. (2012) برای گندم زمستانه در چین پارامترهای AMAX، TSUMEA، EFF، CVO و SLA را به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها در برآورد عملکرد دانه گندم با کاربرد روش موریس (Morris, 1991) ارائه کرده‌اند.

بنابراین یک عامل دیگر که در نتایج تعیین پارامترهای حساس می‌تواند مؤثر باشد، روش تحلیل حساسیت است. هر چند که در کمتر مطالعه‌ای در مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه، مقایسه روش‌های تحلیل حساسیت انجام شده است. Mertens et al. (2005) با مقایسه روش‌های مختلف تحلیل حساسیت در مدل‌سازی جریان آب در خاک ذکر کرده‌اند که روش RSA روشی نسبتاً ساده و کاربردی در تحلیل حساسیت مدل‌ها است و ذکر کرده‌اند در صورتی که بین مقادیر مجموعه پارامترهای نمونه‌گیری شده (مجموعه F1 و F2) همبستگی وجود نداشته

1. Sobol

REFERENCES

- Amiri, A., Rezaie, M., Motamed, M. and Emami, S. (2011). Evaluation of WOFOST crop model in irrigation management. *Agronomy Journal*. 90: 9-18. (In farsi)
- Bafkar, A., Borumandnasab, S., Behzad, M., Farhadi Bansule, B. (2013). Potential production prediction of maize in Mahidasht region with

- WOFOST. Iranian Journal of Field Crop Science. 42(4):484-494. (In farsi)
- Boons-Prins E. R., De Koning G.H.J., Van Diepen C.A. and Penning de Vries F.W.T. (1993). Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European community. Simulation Reports CABO-TT No. 32, CABO and Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen, the Netherlands.
- Confatonieri R., Bellocchi G. and Donatelli M. (2009). Multi-metric evaluation of the model WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. Ecological Modeling. 220: 1395-1410.
- Droogers P., (2000). Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. Journal of Hydrology, 229: 50-58.
- Eitzinger J., Trnka J. Hösch Z. and Dubrovský 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.
- Fodor N., Kovács G.J. (2003). Sensitivity of 4M maize model to the inaccuracy of weather and soil input data. Applied Ecology and Environmental Research. 1: 75-85.
- Freer J., Beven K. and Ambrose B. (1996). Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach, Water Resources Research, doi: 10.1029/95WR03723.
- Hornberger G., and Spear R. (1981). An approach to the preliminary analysis of environmental systems. Journal of Environmental Management. 12 (1): 7-18.
- Kroes J.G., and van Dam J.C. (2003). Reference Manual SWAP version 3.0.3, Alterra-rapport 773, ISSN 1566-7197. 367, 93-103.
- Kuchaki, A., Nasiri, M., Badagh Jamali, J., and Marashi H. (2006). Evaluation of the effects of climate change on growth characteristics and yield of rainfed wheat in Iran. Water and Soil Journal. 20(7):83-94. (In farsi)
- Kucherenko, S., Rodriguez-Fernandez, M. Pantelides, C., and Shah N. (2009). Monte Carlo evaluation of derivative-based global sensitivity measures, Reliability Engineering & System Safety, 94 (7): 1135-1148.
- Ma, G., Huang J., Wu W., Fan J., Zou J., and Wu S. (2013). Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield. Mathematical and Computer Modelling, 58(3), 634-643.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., 1979. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 21, 239-245.
- Makowski, D., Hillier J., Wallach D., Andrieu B., Jeuffroy M. H., (2006). Parameter estimation for crop models. In Wallach, D., Makowski, D. Jones, J. W., (eds.), (2006). Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization and applications. Elsevier, Amsterdam, 447 pp.
- Martorana, F., Bellocchi G. (1999). A review of methodologies to evaluate agro-ecosystem simulation models. Italian Journal of Agronomy, 3: 19-39.
- Mertens, J., Madsen, H., Kristensen, M., Jacques D. and Feyen J. (2005). Sensitivity of soil parameters in unsaturated zone modelling and the relation between effective, laboratory and in situ estimates. Hydrological processes, 19(8): 1611-1633.
- Morris, M.D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, Technometrics, 33 (2): 161-174.
- Rivington M., Matthews K.B., Bellocchi G., Buchan K. 2006. Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data. Agricultural Systems, 88: 451-471.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., and Ratto M. 2004. Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Sobol' I. M. 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. Mathematics and computers in simulation, 55(1-3): 271-280.
- Supit I., Hooyer A.A., Van Diepen C.A. (Eds.). (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 pp.
- Tung, Y. K., & Yen, B. C. (2005). Hydrosystems engineering uncertainty analysis. McGraw-Hill Civil Engineering. 298 pp.
- Vazifedoust M., 2007. Development of an agricultural drought assessment system: integration of agro-hydrological modelling, remote sensing and geographical information. Dissertation PhD thesis. Wageningen University.
- 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: 33-60.
- 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.