مجله علوم گیاهان زراعی ایران
دوره ۴۲، شماره ۴، ۱۳۹۰ (۸۰۸-۷۹۹)

پیش‌بینی پتانسیل تولید ذرت دانه‌ای رقم 704C در منطقه ماهیدشت کرمانشاه با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد محصول WOFOST

علیجان بافکار[1]*، سعید برومند نسب[2]، مجید بهزاد[3] و بهمن فرهادی بانسوله[4]
۱، ۲، ۳، دانشجوی دکتری و استادان گروه مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز
۴، استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه رازی، کرمانشاه
(تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۹۰/۷/۲۷)

چکیده

مدل WOFOST یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول است که عملکرد دانه و اجزاء عملکرد را در مراحل مختلف بیولوژیک رشد گیاهان یک ساله به صورت دینامیک بررسی و شبیه‌سازی می‌کند. بخشی از خروجی‌های این مدل (عملکرد و میزان آب مصرفی توسط گیاه) در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و مدیریت منابع آبی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه یک طرح در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری (آبیاری کامل، ۲۰ و ۴۰ درصد کم آبیاری) در مزرعه آزمایشی مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه واقع در ماهیدشت بر روی گیاه ذرت رقم 704C در کشت بهاره در سال ۱۳۸۹ اجرا گردید. مراحل مختلف فیزیولوزیکی رشد گیاه (زمان‌های جوانه‌زنی، گلدهی و رسیدن کامل) که جهت شبیه‌سازی رشد گیاه لازم است با مشاهدات عینی در مزرعه تعیین و براساس آن و با توجه به دمای هوا مقدار درجه-روز مورد نیاز برای رسیدن به این مراحل محاسبه گردید. در طول دوره رشد وزن خشک برگ، ساقه و اندام ذخیره‌ای و شاخص سطح برگ در ۸ مرحله اندازه‌گیری گردید و بر اساس آنها پارامترهای گیاهی مدل واسنجی گردید. مقدار شاخص‌های آماری ریشه دوم مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارائی (E)، شاخص سازگاری (d)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده (CRM) مربوط به عملکرد نهایی کل شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۱۷۴، ۰/۹۶، ۰/۹۹، ۱۶/۶۷و ۰/۰۲- به دست آمد که حاکی از مطابقت نسبتاً خوب نتایج شبیه‌سازی مدل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مراحل فنولوژیکی رشد گیاه، واسنجی، شاخص سطح برگ، بیوماس

مقدمه

کشاورزی یکی از بخش‌های بسیار مهم در اقتصاد ایران است و این بخش از نظر اشتغال‌زایی، استفاده از زمین و مصرف آب اهمیت ویژه‌ای دارد. بیشتر از ۱۷ میلیون هکتار از اراضی کشور زیر کشت محصولات کشاورزی است و در حدود ۹۴٪ از آب موجود به مصرف بخش کشاورزی می‌رسد (Alizadeh & Keshavarz, 2005). یکی از مشکلات پیش روی در بخش کشاورزی در واقع استفاده پایدار از منابع موجود مانند زمین، آب و نیروی کارگری برای افزایش تولید و توسعه کشاورزی است که نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مناسب می‌باشند (Farhadi Bansouleh, 2009). در طول دو دهه گذشته مدل‌های متعددی به منظور استفاده بهینه از منابع موجود در مقیاس‌های مختلف توسعه یافته است

* نویسنده مسئول: علیجان بافکار تلفن: ۰۹۱۸-۳۳۶۴۲۳۱ E-mail: alibafkar@yahoo.com

که برخی از اطلاعات مورد نیاز آنها از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی استخراج گردیده است (Farhadi Bansouleh, 2009). بطور کلی در تهیه مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی از تحلیل‌های کمی سیستماتیک استفاده شده و می‌توانند با توجه به اهداف محقق در زمینه‌های اقتصادی-اجتماعی و زیست محیطی به کار گرفته شوند (Hengsdijk et al., 1999). تغییرات زمانی و مکانی در منابع بیوفیزیکی باعث تغییر در تولیدات گیاهی و نهاده‌های مورد نیاز می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول ابزاری هستند که می‌توانند برای تخمین عملکرد، آب مورد نیاز و احتیاجات غذایی گیاه در شرایط مختلف به کار گرفته شوند (Van Ittersum et al., 2003). این مدل‌ها اثرات کمی منابع بیوفیزیکی مانند خاک و ویژگی های آب و هوایی، خصوصیات گیاهی و فاکتورهای مدیریتی را بر روی عملکرد محصول و میزان آب مورد نیاز مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهند (Richter, 2005; Kalra et al., 2007; Wu, 2008).

در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی جهت شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب و خاک توسط پژوهشگران امور کشاورزی و خصوصاً محققین دانشگاه واگنینگن هلند توسعه داده شده است که تعدادی از آنها از قبیل SUCROS، ORYZA، INTERCOM و WOFOST[1] در مقاله ارائه شده توسط Van Ittersum et al. (2003) معرفی گردیده اند. در ایران، Zand-Parsa et al. (2006) مدل MSM را ارائه نموده است. در این مدل اثرات آب، کود، خاک و عوامل هواشناسی در پیش‌بینی محصول ذرت در نظر گرفته شده است. این مدل مقدار ماده خشک را با استفاده از تشعشع تابیده شده به برگ‌های گیاه شبیه‌سازی می‌کند. یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه که در در طول دو دهه گذشته بطور گسترده‌ای در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته مدل WOFOST می‌باشد (Hengsdijk et al., 1999; Wu, 2008). این مدل تکامل یافته مدل‌های مختلف در دانشگاه واگنینگن هلند می‌باشد. با توجه به قابلیت‌های مدل WOFOST، این مدل به عنوان بخش اصلی مدل‌های دیگر از جمله SWAP[2]، (Kroes & Van Dam, 2003) و سیستم CGMS[3]، (Van Diepen et al., 2004) به کار رفته است. SWAP مدلی است که جهت آنالیز حرکت آب در مجموعه آب، خاک، گیاه و اتمسفر و تأثیر آن روی رشد محصول توسعه داده شده است. سیستم CGMS سیستمی است که در اتحادیه اروپا توسط مؤسسه تحقیقاتی JRC[4] جهت پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی قبل از برداشت محصول در سطح اتحادیه اروپا و کشورهای مجاور توسعه یافته است. علیرغم کاربردهای فراوان مدل مذکور در اروپا متأسفانه این مدل در ایران چندان مورد استفاده قرار نگرفته است و محدود به کارهای تحقیقاتی ارائه شده توسط Amiri (2009) و Farhadi Bansouleh et al. (2009) می‌باشد. جهت استفاده کاربردی مدل در ایران نیاز به انجام کارهای تحقیقاتی بیشتری در مناطق مختلف کشور می‌باشد. یکی از عوامل محدودکننده استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه (در کشورهایی مثل ایران) نیاز به انجام مطالعات مزرعه‌ای جهت اندازه‌گیری و یا واسنجی برخی از پارامترهای گیاهی این مدل‌ها می‌باشد. Confatonieri et al. (2009) مدل‌های WARM، WOFOST و CropSyst را برای شالیزارهای برنج ارزیابی کردند. در این مطالعه بیوماس تخمین زده شده با مدل WARM ارزیابی و با نتایج مدل‌های WOFOST و CropSyst مقایسه شد. داده‌ها از ۶ محل از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴ از رشد گیاه برنج در شرایط غرقاب و بدون محدودیت برداشت شد و به دو بخش واسنجی (برای تخمین بعضی از پارامترهای مدل) و ارزیابی تقسیم شد. برای ارزیابی مدل‌ها از منطق فازی براساس شاخص چندبعدی (Multiple-metrics) استفاده شد. برآوردهای مدل WARM نسبت به دو مدل دیگر نزدیکتر به داده‌های واقعی بودند. سه مدل در ارزیابی تک بعدی مثل کارایی و ضریب همبستگی با هم مشابه بودند. حساسیت نتایج حاصل از مدل WOFOST و CropSyst بیشتر بود، ولی WARM آسان‌ترین مدل برای استفاده بود چون کمترین پارامترهای لازم جهت

1. WOrld FOod STudies

2. Soil Water Atmosphere Plant
3. Crop Growth Monitoring System
4. Joint Research Center

اجرا را نیاز داشت (۱۰پارامتر در برابر ۱۵ و ۳۴ پارامتر به ترتیب برای مدل‌های CropSyst و WOFOST). Farhadi Bansouleh (2009) جهت واسنجی و اعتبار سنجی پارامترهای گیاهی مدل WOFOST برای محصول جو در کبوترآباد اصفهان از آمار ۵ ساله جمع‌آوری شده در مطالعات هواشناسی کشاورزی استفاده نمود و مدل را به گونه‌ای کالیبره نمود تا جواب‌های نسبتاً قابل قبولی در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری کسب گردد. بعد از اطمینان از صحت نسبی واسنجی، حساسیت اجرای مدل WOFOST نسبت به روش‌های برآورد تابش خورشیدی روزانه در ایران را تحلیل نمود (Farhadi Bansouleh et al., 2010). Catalin et al. (2009) سازگاری مدل WOFOST را برای شرایط رومانی بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که می‌توان از این مدل برای تحقیقات ویژه مثل بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی روی عملکرد استفاده کرد. براساس تحقیقی که بر روی شبیه‌سازی رشد برنج در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور واقع در رشت در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۶ مدیریت آبیاری به عنوان تیمار، در سه تکرار طی سال زراعی ۱۳۸۴ بر روی رقم هاشمی اجرا گردید، با استفاده از مدل WOFOST به طور متوسط مقادیر جذر میانگین مربعات خطای مدل بیوماس کل ۳۸۹ تا ۵۵۳ کیلوگرم بر هکتار، بیوماس پانیکول ۱۳۹ تا ۴۲۰ کیلوگرم بر هکتار و شاخص سطح برگ ۰/۴۶- تا ۰/۵۸ مترمربع سطح برگ در هر مترمربع سطح زمین بدست آمد. مدل WOFOST مقدار شاخص سطح برگ را در مطالعه مذکور بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن شبیه‌سازی نمود (Amiri, 2009). با توجه به اینکه تا کنون گزارشات زیادی در زمینه به کار گیری مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول مخصوصاً مدل (WOFOST) و گیاه ذرت در ایران منتشر نشده است، لذا هدف از انجام این مطالعه در واقع معرفی، بررسی و ارزیابی مدل شبیه‌سازی رشد گیاه (WOFOST) در شرایط ایران می‌باشد. برای این منظور تحقیقی در دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی تعریف گردیده است که بر اساس یافته‌های آن بتوان رشد محصولات عمده زراعی در استان کرمانشاه با استفاده از مدل WOFOST شبیه‌سازی گردد. مقاله کنونی حاصل بخشی از این مطالعه می‌باشد که مربوط به شبیه‌سازی رشد گیاه ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ در حالت پتانسیل در منطقه ماهیدشت کرمانشاه به عنوان یکی از مناطق حاصلخیز استان می‌باشد. قبل از پرداختن به بخش مواد و روش‌ها این مدل به طور مختصر معرفی می‌گردد.

معرفی مدل شبیه‌سازی رشد گیاه WOFOST

WOFOST یک مدل شبیه‌سازی رشد محصول بوده و قادر است رشد گیاهان زراعی یک ساله را به صورت روزانه در شرایط پتانسیل و آبیاری محدود (کم آبیاری) بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه‌سازی کند (Boogaard et al., 1998). مدل WOFOST در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واگنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واگنینگن ایجاد گردیده است. مدل WOFOST یک عضو از خانواده مدل‌هایی است که در دانشگاه واگنینگن توسط دی‌ویت پایه‌گذاری گردید (Farhadi Bansouleh, 2009). این مدل در واقع از مدل دیگری به نام SUCROS مشتق شده است. اصول اولیه آن توسط Van Keulen & Wolf (1986) نوشته شده است. مدل WOFOST در ابتدا به عنوان مدل شبیه‌سازی رشد محصول به منظور ارزیابی عملکرد پتانسیل محصولات مختلف در کشورهای استوایی توسعه یافته است. همچنین از دیگر قابلیت های این مدل ارزیابی عملکرد پتانسیل نسبت به فاکتورهای مؤثر بر رشد گیاه، تعیین فاکتورهای حساس، پیش‌بینی عملکرد محصول و نیاز آبی گیاه با توجه به پیش‌بینی‌های هواشناسی است. بطورکلی مراحل شبیه‌سازی رشد گیاه با استفاده از مدل WOFOST با توجه شکل ۱ صورت می‌گیرد (Supit et al., 1994).

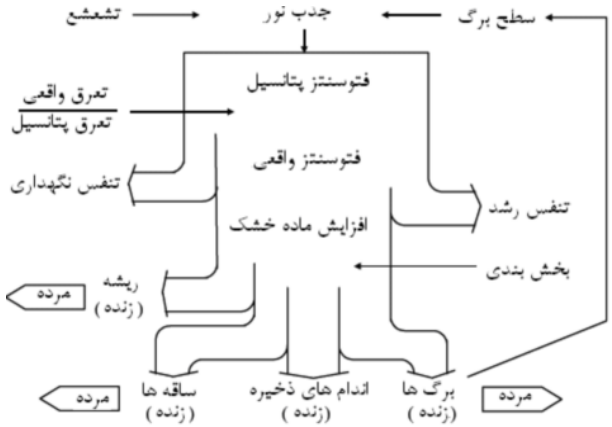
همچنان که در شکل ۱ مشخص می‌باشد، عملکرد پتانسیل گیاه به تشعشع خورشیدی، درجه حرارت هوا و ویژگی‌های گیاهی بستگی دارد. در حدود ۵۰٪ از کل تشعشع ورودی خورشیدی با طول موج ۳۰۰۰-۳۰۰ نانومتر یعنی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر به منظور فتوسنتز گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دامنه از طول

موج تشعشع خورشیدی را تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR)[1] می‌نامند. تولید پتانسیل در واقع سطحی از تولید حداکثری است که به شرایط کاملاً بهینه نیازمند می‌باشد. در این حالت از نظر آب و کود تنشی برای گیاه وجود نداشته و در خصوص آفات و امراض و همچنین مدیریت علف‌های هرز وضعیت بهینه در نظر گرفته می‌شود. مدل WOFOST سرعت سوخت‌وساز CO_2 گیاه را به PAR ورودی جذب شده توسط کانوپی گیاه و خصوصیات فتوسنتزی برگ ربط می‌دهد. این عمل با تنش آبی و کودی کاهش می یابد. نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل، میزان تأثیر تنش رطوبتی روی تولید گیاه را نشان می‌دهد. مقدار ماده خشک تولیدشده به بخش‌های ریشه، برگ، ساقه و ارگان‌های ذخیره تقسیم می‌گردد. این نسبت‌ها در مراحل مختلف رشد گیاه متفاوت است. افزایش ماده خشک برگ نیز نشان‌دهنده توسعه سطح برگ است. سطح برگ در پایان هر روز به عنوان سطح فتوسنتزکننده روز بعد در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه کنونی از نسخه ۷.۱ نرم‌افزار WOFOST استفاده گردیده است (Boogaard et al., 1998).

1. Photosynthesis Active Production

مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی عملکرد و روند ماده خشک و شاخص سطح برگ در شرایط پتانسیل در مراحل مختلف رشد ذرت دانه‌ای هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه واقع در ماهیدشت در سال ۱۳۸۹ اجرا گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی بر اساس نتایج آزمایشگاه آب و خاک مرکز مذکور به شرح جدول ۱ می‌باشد.



شکل ۱- مراحل شبیه‌سازی رشد گیاه با استفاده از مدل WOFOST (Supit et al., 1994)

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

خصوصیات خاک	پارامتر	واحد	مقدار
شیمیایی	اسیدیته	-	۷/۸ – ۸/۲
	کربن آلی	g/kg	۱/۲ – ۱/۳
	نیتروژن	g/kg	۰/۵ – ۱
	فسفر	mg/kg	-
	پتاسیم	cmol/k	۲۶/۵ – ۲۸
فیزیکی	شن	درصد	۲۵
	سیلت	درصد	۳۵
	رس	درصد	۴۰
	ظرفیت زراعی	درصد حجمی	۴۱
	نقطه پژمردگی	درصد حجمی	۲۳
	چگالی ظاهری	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۱/۲۳

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم در پائیز و شخم مجدد در بهار، ایجاد جوی و پشته بود. هر کرت آزمایشی شامل چهار خط کاشت به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (تراکم بوته ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار). سطح هر کدام از کرت‌ها ۹ مترمربع انتخاب گردید. کاشت در بیست و هشتم اردیبهشت ماه ۱۳۸۹ با دست انجام گرفت. تمام کود فسفر (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل) و کود پتاس (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم) و یک سوم کود نیتروژن (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) در هنگام کاشت و مابقی کود نیتروژن (۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) طی دو مرحله به صورت کود سرک در فصل رشد مورد استفاده قرار گرفت. عامل اصلی سه سطح آبیاری (آبیاری کامل، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد کم آبیاری) بوده است[1]. میزان آب آبیاری براساس نمونه‌گیری از خاک در تیمار آبیاری کامل و تعیین رطوبت خاک در آزمایشگاه محاسبه گردید. روش آبیاری شیاری و حجم آب ورودی به هر خط کاشت با کنتور حجمی با دقت ۰/۱ لیتر اندازه‌گیری شد. در هر مرحله تعداد سه بوته به آزمایشگاه منتقل شده و اندام‌های مختلف آن از همدیگر جدا گردید. سطح برگ سه بوته با استفاده از سطح برگ‌سنج[2] در آزمایشگاه اندازه‌گیری و با توجه به مقدار سطح کانوپی گیاه، شاخص سطح برگ[3] (LAI) اندازه‌گیری و ثبت گردید. اندام‌های گیاه به صورت جداگانه به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا رطوبت آنها گرفته شود و پس از خشک شدن وزن شده و وزن خشک این اندام‌ها محاسبه گردید. این روند تا رسیدن و برداشت گیاه استمرار پیدا کرد. در هنگام برداشت وزن دانه و وزن دیگر اندام‌ها نیز جداگانه اندازه‌گیری گردید که با استفاده از آنها عملکرد نهایی دانه و بیوماس بدست آمد. مراحل فنولوژیکی گیاه که برای مدل مورد نیاز است (جوانه‌زنی، گلدهی و رسیدن کامل) یادداشت برداری گردید. جدول ۲ شماره روز از ابتدای سال میلادی را نشان می‌دهد که در آن ۵۰ درصد بوته‌ها در آن مرحله قرار دارند. با توجه به اینکه مدل براساس سال میلادی طراحی شده لذا کلیه تاریخ های به کار رفته در مدل و در این مقاله به صورت میلادی ذکر شده است.

جدول ۲- زمان وقوع مراحل فنولوژیکی براساس شماره روز از ابتدای سال میلادی (Julian day)

مرحله فنولوژیکی	کاشت	جوانه‌زنی	گلدهی	رسیدگی فیزیولوژی
شماره روز	۱۴۰	۱۵۰	۲۱۸	۲۸۰

نتایج مطالعات مزرعه‌ای جهت واسنجی کردن پارامترهای گیاهی مورد استفاده قرار گرفت. جهت واسنجی کردن و اجرای مدل، فایل‌های مربوط به هواشناسی، خاک و گیاه به شرح زیر تشکیل گردید.

فایل هواشناسی

پارامترهای هواشناسی (بارندگی، درجه حرارت حداکثر، درجه حرارت حداقل، تشعشع روزانه (ساعات آفتابی، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، رطوبت نسبی و فشار بخارصبحگاهی هوا) در طول دوره رشد به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی ماهیدشت در مجاورت مزرعه تحقیقاتی اخذ و بعد از تبدیل واحد وارد فایل هواشناسی گردید. با توجه به اینکه این مدل آبیاری را مستقیماً در نظر نمی‌گیرد، لذا مقدار آبیاری به عنوان بارندگی در نظر گرفته شد و به بارندگی روزانه اضافه گردید.

فایل خاک

پارامترهای مورد نیاز مدل مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک می‌باشد (رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، رطوبت اشباع، مجموع آب قابل دسترس و هدایت هیدرولیکی اشباع). اطلاعات مورد نیاز از نتایج آزمایش‌های خاکشناسی انجام شده در مزرعه آزمایشی استخراج و وارد فایل خاک گردید.

فایل گیاهی

تشکیل فایل گیاهی یکی از حساس‌ترین قسمت‌های مدل WOFOST می‌باشد. فایل گیاهی از تعدادی زیادی پارامتر تشکیل گردیده است که برخی از آنها در طول دوره رشد متغیر می‌باشند. یکی از اهداف مطالعه کنونی

۱. با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی عملکرد در حالت پتانسیل می‌باشد، فقط نتایج در حالت پتانسل ذکر گردیده است. نتایج مربوط به تنش آبی نیاز به بررسی بیشتر دارد و در مقاله دیگری ارایه می‌گردد.

2. Leaf Area Meter

3. Leaf Area Index

به دست آوردن پارامترهای گیاهی برای ذرت در منطقه مورد مطالعه بوده است. در این مطالعه برخی از این پارامترها از قبیل مجموع درجه حرارت روزانه از جوانه زدن تا گلدهی (TSUM1)، مجموع درجه حرارت روزانه از گلدهی تا رسیدن (TSUM2) و سطح برگ ویژه (SLA) مستقیماً بر اساس آزمایش صورت گرفته محاسبه و وارد مدل گردید. تعدادی از پارامترها از فایل‌های گیاهی موجود برای محصول ذرت در مطالعات قبلی (Farhadi Bansouleh, 2009; Vazifedoust, 2007; Boons-Prins et al., 1993; Van Heemst, 1988) استفاده گردید. برخی از پارامترهای گیاهی که مدل نسبت به آنها حساسیت بیشتری دارد (Vazifedoust et al., 2008) با استفاده از نتایج مطالعه کنونی واسنجی گردید. 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 به گونه‌ای تعیین می‌نماید که تفاوت بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد (وزن برگ، وزن دانه، وزن عملکرد بیولوژیکی و شاخص سطح برگ) با مقادیر شبیه‌سازی شده این پارامترها حداقل باشد. نتایج مربوط به واسنجی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده و یا واسنجی شده روی ذرت دانه‌ای

پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار	واحد
TSUM1	مجموع درجه حرارت از جوانه زدن تا گلدهی (بالای صفر فیزیولوژیکی)	۱۳۰۰	°C
TSUM2	مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدن (بالای صفر فیزیولوژیکی)	۱۰۱۰	°C
SLA	سطح برگ ویژه	۰/۰۰۲۳	$h_a kg^{-1}$
RGRLAI	حداکثر افزایش نسبی در شاخص سطح برگ	۰/۰۲۹۴	$m^2 m^{-2} d^{-1}$
KDIF	ضریب روشنایی نور	۰/۶	-
EFF	راندمان مصرف نور	۰/۴۵	-
AMAX	حداکثر شدت جذب CO_2	۷۰	$kg\, ha^{-1}\, hr^{-1}$

کارائی مدل WOFOSTدر برآورد عملکرد، روند ماده خشک و شاخص سطح برگ گیاه ذرت در مراحل رشد با استفاده از به کارگیری شاخص‌های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[1]، ضریب کارائی (E)[2]، شاخص سازگاری (d)[3] (Willmott, 1982)، حداکثر خطا (ME)[4] و ضریب باقیمانده (CRM)[5] که به صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی گردید (معادله‌های ۱ تا ۵):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_I - M_i)^2} \quad (۱)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M})^2} \quad (۲)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=}^{n}(S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \overline{M}| + |M - \overline{M}|)^2} \quad (۳)$$

$$ME = Max|S_i - M_i| \times \frac{100}{\overline{M}} \quad (۴)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}M_i - \sum_{i=1}^{n}S_i}{\sum_{i=1}^{n}M_i} \quad (۵)$$

که در آنها:

S_i و M_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\overline{M}$ میانگین مقادیر M_i می‌باشد. RMSE میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مدل می‌باشد. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیکتر باشد شبیه‌سازی بهتر صورت گرفته است. ضریب E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد.

1. Root Mean Square Error
2. Coefficient of efficiency
3. Index of agreement
4. Maximum Error
5. Coefficient of Residual Mass

مقدار E بین ∞- تا ۱+ متغیر است. هرچه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد مدل کاراتر است و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر است. d یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن ∞- تا ۱+ تغییر می‌کند (Eitzinger, 2004; Singh et al., 2008). هرچه مقدار d به یک نزدیک‌تر باشد مدل کاراتر است و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر هستند. مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارائی مدل است. شاخص CRM نشانگر مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. در حالت ایده‌آل که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند مقادیر عددی RMSE، ME، CRM برابر با صفر و مقدار E و d برابر با ۱ خوهند بود.

نتایج و بحث

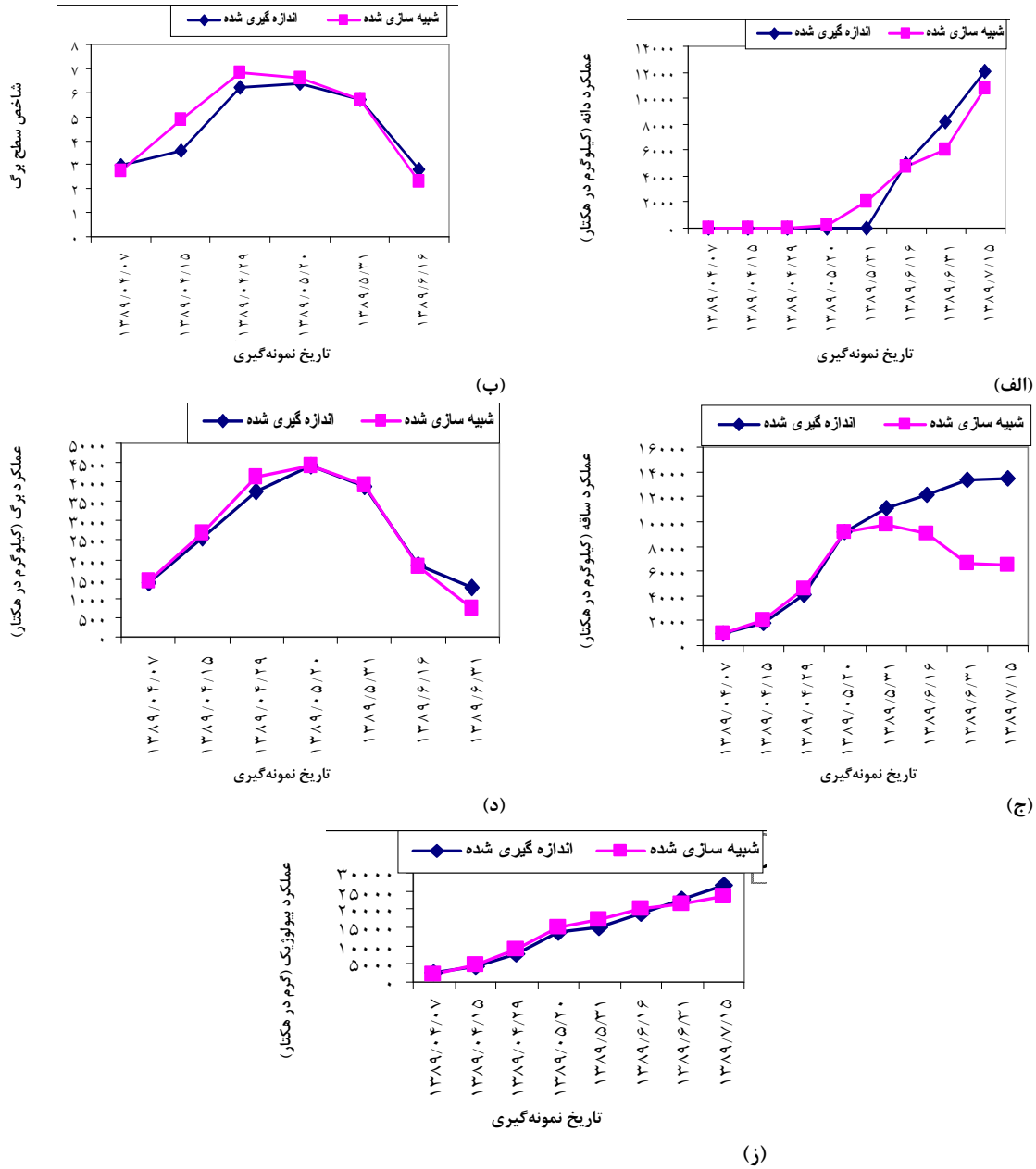
وزن اندام‌های گیاهی و شاخص سطح برگ در دوره رشد ذرت به صورت روزانه توسط مدل مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مقدار شبیه‌سازی شده این پارامترها در زمان‌های نمونه‌گیری با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است.

نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل بطور نسبی با دقت خوبی عملکرد اندام‌های گیاهی را در مراحل مذکور شبیه‌سازی نموده است. در خصوص شاخص سطح برگ می‌توان گفت که مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی را نشان می‌دهند (شکل ۳-ب). تفاوت بین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در اوایل دوره تشکیل دانه به علت این است که در این دوران وزن دانه اندک بوده و اندازه‌گیری آن مشکل می‌باشد، در حالی که مدل مقدار آن را برآورد نموده است. در صورتی که مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بعد از پر شدن کامل دانه ها تفاوت زیادی با هم ندارند (شکل ۳-الف). وزن خشک برگ در تمامی مراحل اندازه‌گیری با مقادیر شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی را از خود نشان می‌دهد (شکل ۳-د).

مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده ساقه و شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده تفاوت قابل ملاحظه بین این مقادیر می‌باشد (شکل ۳-ج). علت این موضوع به تفاوت در نحوه اندازه‌گیری وزن ساقه با نحوه در نظر گرفتن آن توسط مدل می‌باشد. در این مطالعه وزن بقایای گیاهی غیر از دانه و برگ‌های زنده به عنوان وزن ساقه در نظر گرفته شده بود. حال آنکه در مدل وزن برگ‌های مرده جداگانه محاسبه می‌گردد. همانگونه که از شکل (۳-ج) مشاهده می‌گردد در ابتدای دوره رشد که وزن برگ‌های مرده اندک است تفاوت بین وزن ساقه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کمتر است، لذا در انتهای دوره این تفاوت بیشتر شده است. لذا پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی وزن ساقه و برگ مرده به صورت جداگانه اندازه‌گیری شود. البته از آنجا که وزن ساقه در واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفته است خللی در نتایج به دست آمده وارد نمی‌نماید. اختلاف بین عملکرد اندام‌های هوایی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مراحل اولیه رشد (یعنی در زمان رشد رویشی) اندک می‌باشد حال آنکه در مراحل آخر رشد بعلت خطاهایی که درنحوه در نظر گرفتن اندام‌های مرده وجود داشته است اختلاف اندکی بیشتر گردیده است (شکل ۳- ز). لازم به ذکر است که منظور از عملکرد اندام هوایی مجموع عملکرد دانه، ساقه، برگ و اندام‌های مرده می‌باشد. به همین علت مشاهده می‌گردد که بین مجموع عملکرد دانه، ساقه و برگ با عملکرد اندام هوایی تفاوت وجود دارد (جدول ۴) و این تفاوت مربوط به وزن اندام‌های مرده می‌باشد.

کارایی مدل در برآورد میزان عملکرد نهایی محصول در زمان برداشت با استفاده از شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ذکر گردیده است. نتایج این آنالیز نشان‌دهنده تطابق خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. به عنوان مثال مقدار RMSE برای کلیه پارامترها کمتر از ۱۰٪ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است. بقیه شاخص‌های آماری نیز به همین صورت در رابطه با وزن خشک برگ در دامنه مورد انتظار قرار گرفته اند، که این مقدار از نظر آماری قابل قبول بوده و می‌توان به داده‌های شبیه‌سازی شده از طریق مدل اعتماد کرده و در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی از آن استفاده نمود.

نتیجه کلی از این تحقیق این است که عملکرد دانه،



شکل ۳- مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در تولید ذرت دانه‌ای

جدول ۴- مقایسه عملکرد دانه و عملکرد اندام‌های مختلف گیاه ذرت دانه‌ای در هنگام برداشت

پارامتر	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	تفاوت	RMSE	E	ME	d	CRM
عمکرد دانه	۱۰۸۲۱	۱۲۰۱۶	۱۱۹۵	۶۵۶	۰/۹۴	۶۶/۹۱	۰/۷۷	-۱/۴۲
عملکرد خشک ساقه	۶۵۲۴	۱۳۴۴۸	۶۹۲۴	۱۴۸۰	۰/۵۳	۸۸/۳	۰/۸۴	۰/۲۷
عملکرد خشک برگ	۷۴۵	۱۲۷۳	۵۲۸	۱۶۷	۰/۹۷	۲۲/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰
عملکرد خشک کل	۲۳۴۵۷	۲۵۴۶۴	۲۰۰۷	۱۱۷۴	۰/۹۶	۱۶/۶۷	۰/۹۹	-۰/۰۲

عملکرد کل اندام هوایی گیاه و شاخص سطح برگ در دو حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برازش خوبی با همدیگر دارند. در این رابطه مقدار CRM در بیشتر موارد نزدیک صفر بوده که این نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور و نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. شاخص سازگاری d نیز نزدیک به

۱ بوده است. در حالی که در بقیه پارامترها از قبیل ساقه و برگ عمل شبیه‌سازی به خوبی صورت نگرفته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به مطابقت نسبتاً خوب بین نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل به شکل رضایت بخشی واسنجی گردیده است هرچند برای جمع‌بندی نهایی نیاز به تکرار آزمایش می‌باشد. برای اینکه بتوان نتایج واسنجی مدل‌های گیاهی مورد اعتماد باشد نیاز به انجام مطالعات مزرعه‌ای در چند سال متوالی می‌باشد. بخشی از اطلاعات بایستی برای واسنجی و بخش دیگر بایستی برای اعتبارسنجی به کار رود. برای این منظور پیشنهاد می‌گردد که دانشگاه‌ها و سازمان‌های تحقیقاتی کشور اعتبارات ویژه‌ای برای انجام چنین مطالعاتی تخصیص دهند و برای جمع‌بندی نهایی صبور باشند.

سپاسگزاری

از ریاست محترم مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه به خاطر در اختیار گذاشتن زمین و ادوات کشاورزی و همکاری در اجرای طرح و نیز اداره هواشناسی استان کرمانشاه به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های هواشناسی روزانه تقدیر و تشکر می‌گردد. لازم به ذکر است که بخشی از اطلاعات این مقاله از طرح پژوهشی شماره ۸۹/۲۸۶۰۳ دانشگاه رازی جمع‌آوری گردیده است.

REFERENCES

1. Alizadeh, A. & Keshavarz, A. (2005). Status of agriculture water use in Iran. Water Conservation, Reuse, and Recycling. In: Proceedings of *an Iranian-American workshop*. The National Academic Press, Washington D.C., USA, pp. 94-105.
2. Amiri, E. (2009). Application of WOFOST model for predict growth of rice in dry condition. In: Proceedings of the *Secound national seminar on the effects of drought and its management strategies*. Isfahan Agricultural Research Center, 25 to 26 May. (In Farsi)
3. Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Roetter, R. P. Cabrera, J. M. C. A. & Van Laar, H. H. (1998). *WOFOST 7.1; User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 DLO Winand Staring Center*. Wageningen, The Netherlands.
4. Boons-Prins, E. R., De Koning, G. H. J., Van Diepen, C. A. & 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.
5. Catalin, L., Bettina, B., Fabio, M. & Doniela Anca, L. (2009). Adaptation of WOFOST model from CGMS to Romanian condition. *Journal of Plant Development*, 16, 97- 102.
6. Confatonieri, R., Bellocchi, G. & Donatell, M. (2009). Multi-metric evaluation of the model WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Modeling*, 220, 1395-1410.
7. Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. & Dubrovsky, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modeling*, 171, 223-246.
8. Farhadi Bansouleh, B. (2009). *Development of a spatial planning support system for agricultural policy formulation related to land and water resources in Borkhar & Meymeh district, Iran.* Ph.D. Thesis, ITC/Wageningen University, Enschede/Wageningen. The Netherlands, 267 pp.
9. Farhadi Bansouleh, B., Sargordi, F., Sharifi, M. A. & Van Keulen, H. (2010). Point-based simulation of barley production using the crop growth simulation model WOFOST. In: Proceedings of the *first international conference on plant, water, soil & weather modeling*. Kerman, Iran.
10. Hengsdijk, H., Bouman, B. A. M., Nieuwenhuyse, A. & 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. *Agricultural Systems*, 61(2), 109-121.
11. Kalra, N., Chander, S., Pathak, H., Aggarwal, P. K., Gupta, N. C., Sehgal, M. & Chakarborty, D. (2007). Impact of climate change on agriculture. *Outlook on Agriculture*, 36, 109-118.
12. Kroes, J. G. & Van Dam, J. C. (2003). *Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra-Report 773*. Alterra, Wageningen. The Netherlands.
13. Richter, G. M. & 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.

14. Singh, A. K., Tripathy, R. & Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERES Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultral Water Management*, 95, 776-786.
15. Stol, W., Rouse, D. I., Van Kraalingen, D. W. G. & Kiepper, O. (1992). *FSEOPT, a FOTRAN Program for Calibration and Uncertaintly analysis of Simulation Models*. Simulation Reports CABO-TT 24. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen.
16. Supit, I., Hooijer, A. A. & van Diepen (eds.), C. A. (1994). *System description of the WOFOST 6.0 crop growth simulation model*. Joint Research Center, Commission of the European Communities. Brussels, Luxemborg.
17. Van Diepen, K., Boogaard, H. L., Supit, I., Lazar, C., Orlandi, S., Van der Goot, E. & Schapendonk, A. H. C. M. (2004). *Methodology of the MARS crop yield forecasting system*. Vol. 2: Agrometeorological data collection, processing and analysis. European Commission (EC), Luxembourg, Luxembourg.
18. Van Heemst, H. D. J. (1988). *Plant data values required for simple crop growth simulation models: review and bibliography*. Simulation Reports CABO-TT, CABO and Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University. Wageningen. The Netherlands, 100 pp.
19. Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. & Goudriaan, J. (2003). On applications of the Wageningen crop models. *European Jounal of Agronomy*, 18(3-4), 201-234.
20. Van Keulen, H. & Wolf, J. (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Simulation Monographs, Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
21. 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.
22. Vazifedoust, M., Van Dam, J. C., Feddes, R. A. & Feizi, M. (2008). Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95(2), 89-102.
23. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bullrin. Amrican. Meteorological. Society*, 63, 1309-1313.
24. 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.
25. Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A. R. & Ronaghi, A. (2006). Development and evaluation of intergrated water and nitrogen for maize. *Agricultural Water Management*, 81, 227-256.