نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۳، ص. ۹۳۹-۹۳۰

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 5, Nov.-Dec. 2014, p. 930-939

شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل گیاهی آکواکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم سیساب، خراسان شمالی

نجمه خلیلی[1*]- کامران داوری[2]- امین علیزاده[3]- محمد کافی[4]- حسین انصاری[5]

تاریخ دریافت:۱۳۹۳/۲/۱۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۳/۷/۷

چکیده

مدل‌سازی رشد گیاه ابزار مهمی در ارزیابی اثرات تنش خشکی بر روی عملکرد محصول دیم و در نتیجه آن، انتخاب تاریخ کشت بهینه و تصمیم-گیری برای روش‌های مدیریتی مناسب می‌باشد. یکی از جدیدترین مدل‌های گیاهی مدل AquaCrop (آکواکراپ) است که توسط سازمان فائو توسعه داده شده و اساس آن عکس‌العمل عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی می‌باشد و با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌نماید. مدل مذکور بایستی برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی گردد. در این تحقیق، مدل گیاهی آکواکراپ در ایستگاه تحقیقات دیم سیساب واقع در خراسان شمالی و برای گیاه گندم تحت کشت دیم واسنجی و ارزیابی شد. برای واسنجی مدل، از داده‌های هواشناسی روزانه و داده‌های برداشت محصول دو سال زراعی (۸۷-۸۶ و ۸۸-۸۷) در ایستگاه سیساب استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل نیز از داده‌های هواشناسی مستقل از مرحله واسنجی و داده‌های عملکرد واقعی محصول در پنج سال زراعی ۸۲-۸۱ الی ۸۶-۸۵ استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل آکوکراپ با دقت بالایی قابلیت مدل‌سازی عملکرد محصول را دارا می‌باشد. بطوری که ضریب تعیین، میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد و نرمال شده، راندمان مدل و شاخص توافق بین مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۰۶۲، ۵/۲۳۵، ۰/۹۱۷ و ۰/۸۷۷ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آکواکراپ، سیساب، عملکرد محصول، گندم دیم، مدل‌سازی گیاه

مقدمه

ایران کشوری است که متوسط بارندگی آن حدود یک سوم متوسط بارش جهانی است و از نظر منابع آب به شدت در تنگنا می-باشد. لذا بهبود کارآیی مصرف آب مبتنی بر تولید بیشتر در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه و در نتیجه پیش‌بینی عملکرد محصول، منجر به برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کاراتر در روند تولید محصول خواهد شد. در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی جهت شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب خاک ارائه شده است و محققین در تحقیقات مختلف از این مدل‌ها استفاده می‌کنند (۱۱).

یکی از اهداف مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، استفاده از آنها برای پیش‌بینی عملکرد محصول می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده و توسط محققین مختلف بکار رفته‌اند. مدل‌هایی چون CERES[6] (۱۵)، EPIC[7] (۲۱)، WOFOST[8] (۲۲)، CropSyst[9] (۲۰) و غیره که البته مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی می‌باشند و متغیرهای ورودی آنها زیاد و اندازه‌گیری آنها سخت می‌باشد.

چون در کشت دیم، مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد، خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، میزان آب قابل دسترس گیاه است. لذا برای دستیابی به مقادیر عملکرد با دقت مناسب، بایستی مدل‌هایی انتخاب شوند که در آنها عملکرد بر اساس تابعی از آب در دسترس گیاه محاسبه شود. اخیراً در سال ۲۰۰۹، فائو مدل شبیه‌سازی

۱، ۲، ۳ و ۵- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشیار، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(* - نویسنده مسئول: Email: najmehkhalili@gmail.com)
۴- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

6- Crop Environment REsource Synthesis
7- Environmental Policy Integrated Climate
8- WOrld FOod STudies
9- Cropping Systems Simulation Model

AquaCrop[1] (آکواکراپ) را بر اساس معادله دورنباس و کاسام (۶) و به همراه تصحیحاتی بر آن ارائه داد که مقیاس محاسبات در آن بر اساس گام روزانه می‌باشد (۱۹). در طراحی این مدل جدید سعی شده است که دقت بالا در نتایج، سادگی و نیاز به تعداد کمتر متغیرها در مقایسه با سایر مدل‌های موجود، در کنار هم مورد ملاحظه قرار گیرد (۹). این مدل می‌تواند برای حداقل نمودن ریسک‌های کشاورزی بکار رود، زیرا می‌تواند جایگزین‌های لازم برای بهبود عملکرد و نیز بهره‌وری آب را پیدا کند (۵).

چندین تحقیق در مورد کاربرد مدل AquaCrop و شبیه سازی تولید محصول در مقابل آب مصرفی برای محصولات مختلف انجام شده است. هسیائو و همکاران (۱۲)، تحقیقی برای پارامتری نمودن و آزمون مدل بر روی گیاه ذرت در مزارع دیویس ایالت کالیفرنیا انجام دادند. بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ۲۲درصد برای توده گیاهی و۲۴درصد برای دانه تولیدی بود. گارسیا ویلا و همکاران (۸)، مدل AquaCrop را برای بهینه کردن مقدار آبیاری در پنبه در جنوب اسپانیا بکار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل مذکور عملکرد، توده گیاهی و کارایی مصرف آب را برای پنبه به خوبی شبیه‌سازی کرده است. فراهانی و همکاران (۷)، ارزیابی مدل AquaCrop را برای پنبه تحت شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری در منطقه گرم و خشک سوریه انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل مذکور تبخیر–تعرق را با خطای ۱۳درصد و مقدار محصول در شرایط کم آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد را با خطای ۳۲درصد برآورد کرده است. اندرزیان و همکاران (۴)، AquaCrop را برای شبیه‌سازی مراحل رشد و میزان آب مصرفی بر عملکرد گندم تحت سناریوهای مختلف آبیاری در اقلیم گرم و خشک اهواز بکار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل مذکور قادر بوده به خوبی میزان رطوبت منطقه ریشه، توده گیاهی و عملکرد دانه را شبیه‌سازی کند. علیزاده و همکاران (۳) نیز برای مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج از مدل AquaCrop استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل در پیش بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است. حیدری‌نیا و همکاران (۱) از این مدل برای برنامه‌ریزی کم‌آبیاری پنبه در ایستگاه هاشم‌آباد گرگان استفاده کردند. در تحقیق ایشان، برنامه AquaCrop با استفاده از داده‌های زراعی دو سال متناوب واسنجی گردید. ضریب تعیین در شبیه سازی محصول در دو سال، به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۶ بدست آمد.

واضح است که برای کاربرد این مدل نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی آن برای هر محصول و منطقه مورد نظر می‌باشد. استدیوتو و همکاران (۱۹)، مدل آکواکراپ را برای گندم بطور مقدماتی واسنجی کرده‌اند. اما، برای واسنجی کامل آن به داده‌های مراحل رشد و شرایط خاک منطقه مورد نظر نیاز است. هدف از این تحقیق، واسنجی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم دیم و اعتبارسنجی آن از طریق بررسی و مقایسه نتایج مدل با نتایج حاصل از برداشت محصول در خراسان شمالی بوده است. با توجه به اینکه استان خراسان شمالی دارای مرکز تحقیقات دیم واقع در سیساب با کشت عمده گندم می‌باشد، داده‌های هواشناسی و زراعی این مرکز برای این تحقیق انتخاب گردید. از نتایج این تحقیق می‌توان در برنامه‌ریزی کشت گندم دیم و اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب برای افزایش عملکرد محصول در منطقه مذکور بهره برد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و ویژگی‌های آب و هوایی

موقعیت مورد مطالعه در این تحقیق، ایستگاه تحقیقات دیم سیساب واقع در ۳۵ کیلومتری شهر بجنورد در استان خراسان شمالی می‌باشد. مختصات جغرافیایی این ایستگاه، ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی می‌باشد و در ارتفاع ۱۳۵۹ متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱).

اقلیم این منطقه طبق روش آمبرژه، خشک و سرد و بر طبق روش دومارتن، نیمه‌خشک است. میانگین بارندگی در این ایستگاه ۲۵۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (۱۳). جدول ۱، توزیع بارش ماهانه و درجه حرارت متوسط ماهانه را بطور میانگین در این ایستگاه نشان می‌دهد.

مدل AquaCrop

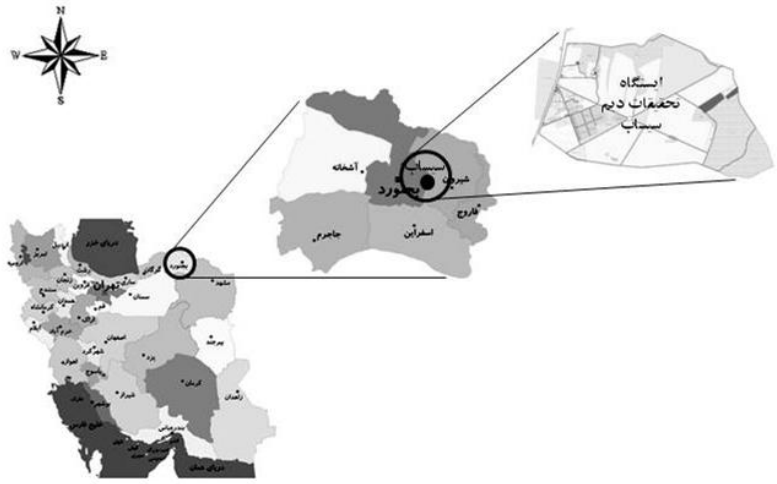
یکی از مهم‌ترین توابع عکس‌العمل بازده به آب در نشریه ۳۳ آبیاری و زهکشی سازمان خوار و بار جهانی (فائو) توسط دورنباس و کاسام (۶) مطرح شد. معادله اساسی به کار رفته در این نشریه به شکل رابطه ۱ می‌باشد.

$$(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}) = K_y\,(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}) \qquad (۱)$$

که درآن، Y_x و Y_a، به ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_x و ET، تبخیر–تعرق حداکثر و واقعی و K_y، ضریب تناسب بین افت عملکرد نسبی و کاهش تبخیر–تعرق نسبی می‌باشد.

معادله فوق، به مدت دو دهه، مرجعی کلیدی برای تخمین عکس‌العمل بازده محصولات زراعی، باغی و صیفی به آب بود. تا اینکه، مدل AquaCrop توسط سازمان خواربار جهانی (فائو) (۱۹) و بر اساس تصحیحاتی بر روی معادله ۱ ارائه گردید، که دارای تفاوت‌هایی با این معادله می‌باشد.

1 -AquaCrop - FAO Crop Water Productivity Model



شکل ۱- موقعیت ایستگاه مورد مطالعه

جدول ۱- توزیع میانگین بارش (میلی‌متر) و میانگین درجه حرارت ماهانه (سانتی‌گراد) درایستگاه سیساب

متغیر هواشناسی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
درجه حرارت	۱۴/۱	۸/۸	۳/۶	۰/۵	۰/۳	۴/۶	۱۰/۲	۱۵/۴	۲۰/۱	۲۳/۲	۲۳/۶	۱۹/۹
بارش	۱۱/۲	۲۳/۱	۲۷/۷	۲۴/۱	۳۱/۶	۴۲/۱	۴۷/۱	۴۳/۸	۱۷/۴	۵/۹	۸/۵	۶

مدل آکواکراپ، بین تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه، تفاوت قایل شده و برای این جداسازی، از تئوری ریچی (۱۸) استفاده می‌کند. به جای استفاده از شاخص سطح برگ[1]، از پوشش کانوپی[2] گیاه استفاده می‌شود.

توده گیاهی[3] (B) با توجه به تعرق تجمعی گیاه ($\sum T_r$) و بهره‌وری آب (WP) طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$B = WP.\sum T_r \qquad (۲)$$

عملکرد نهایی محصول(Y)، طبق رابطه ۳ پس از تأثیر شاخص برداشت (HI) در توده گیاهی (B) تعیین می‌شود.

$$Y = B.HI \qquad (۳)$$

تعرق گیاه (T_r) با توجه به مقدار تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) نرمال می‌گردد. بطور کلی، مدل AquaCrop بر اساس رابطه ۴ عملکرد محصول را برآورد می‌کند.

$$WP_{adj}^{*} = \frac{B}{\sum_{i=1}^{n}(\frac{T_r}{ET_o})_i} \quad \Rightarrow \quad B = WP_{adj}^{*}\sum_{i=1}^{n}(\frac{T_r}{ET_o})_i \qquad (۴)$$

که در آن، WP_{adj}^{*}، بهره‌وری آب است که توسط تبخیر-تعرق مرجع و غلظت دی اکسید کربن اصلاح و نرمال شده است ($g\,m^{-2}\ or\ t\,ha^{-1}$) و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. برای آشنایی با جزئیات بیشتر این مدل می‌توان به مراجع ۱۷ و ۱۹ مراجعه کرد.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم دیم، از مدل گیاهی AquaCrop استفاده گردید. برای این منظور، ورودی‌های لازم به مدل شامل داده‌های هواشناسی، گیاهی، مدیریت آبیاری، مدیریت مزرعه، ویژگی‌های خاک، دوره زمانی شبیه‌سازی مورد نظر و همچنین شرایط اولیه در مزرعه می‌باشند، که در ادامه شرح داده شده‌اند.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز در مدل AquaCrop، شامل بارش، حداقل و حداکثر درجه حرارت، تبخیر-تعرق مرجع و غلظت دی اکسید کربن موجود در جو می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های بارش و درجه حرارت ایستگاه سیساب استفاده گردید. برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، روش هارگریوز-سامانی (۱۰) بکار رفت. میزان دی اکسید کربن موجود در اتمسفر در مدل به صورت پیش فرض از سال ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ موجود می باشد.

1 - Leaf Area Index
2 - Canopy cover
3 - Biomass

داده‌های گیاهی

داده‌های گیاهی و ویژگی‌های محصول شامل پارامترهای ثابت[1] و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت، با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و برای گیاهان زراعی مهم از جمله گندم به عنوان پیش فرض در مدل وجود دارند. این پارامترهای ثابت، با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده و کاربرد آنها در شرایط وجود تنش آبی، از طریق ضریب پاسخ به تنش صورت می‌گیرد. علاوه بر پارامترهای ثابت، برخی دیگر از اطلاعات مورد نیاز برای اجرای شبیه-سازی، بستگی به گونه و محصول زراعی دارند و یا طبق شرایط مدیریتی و محیطی مختلف، مقادیر متفاوتی را دارا می‌باشند، که پارامترهای مخصوص کاربر نامیده می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان تاریخ و تراکم کشت، زمان رسیدن مراحل فنولوژیکی گیاه و حداکثر عمق ریشه را نام برد که برای هر ناحیه و محصول با توجه به شرایط خاص خود متغیر بوده و توسط کاربر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که رقم گندم مورد مطالعه در این ایستگاه، رقم سبلان می‌باشد.

مدیریت آبیاری و مزرعه

بدیهی است که در این تحقیق برای شبیه‌سازی عملکرد محصول تحت شرایط دیم، حالت بدون آبیاری و فقط با در نظر گرفتن بارندگی اعمال گردید. در قسمت مدیریت مزرعه، وضعیت حاصلخیزی خاک و همچنین مالچ روی خاک مشخص می‌شود. در این تحقیق، میزان رواناب و مالچ سطح خاک صفر در نظر گرفته شده و محدودیتی از لحاظ حاصل خیزی خاک در نظر گرفته نشد.

ویژگی‌های خاک

داده‌های مورد نیاز در این بخش شامل بافت و تعداد لایه خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت حجمی در حد اشباع، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم می باشد. مدل قابلیت تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع را با استفاده از اطلاعات رطوبت خاک دارا می‌باشد. مشخصات فیزیکی سری خاک تحت کشت گندم دیم در ایستگاه سیساب، در جدول ۲ لیست شده است (۲).

دوره زمانی شبیه‌سازی و شرایط اولیه مزرعه

در این تحقیق، طول دوره شبیه‌سازی معادل با طول دوره رشد گیاه یعنی از اول آبان تا حدود آخر خرداد الی هفته اول تیر ماه در نظر گرفته شد. زمان انتهایی شبیه‌سازی بستگی به درجه-روز-رشد رسیدن به مراحل فنولوژیکی گیاه برای هر سال متفاوت بوده است. رطوبت اولیه خاک در حد ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد.

واسنجی مدل AquaCrop

واسنجی[2] یک مدل عبارت است از تغییر دادن برخی از پارامترهای مدل (مقادیر ثابت) به طوری که با تغییر این پارامترها، داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های واقعی انطباق قابل قبول بیابند. در این تحقیق، مدل AquaCrop برای گیاه گندم در ایستگاه سیساب تحت شرایط دیم، واسنجی شد. برای این منظور از داده‌های مزرعه‌ای دو سال زراعی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ و ۱۳۸۸- ۱۳۸۷ استفاده گردید. در ابتدا داده‌های هواشناسی، خاک، مدیریت مزرعه و همچنین پارامترهای گیاهی مدل که اندازه‌گیری یا تخمین زده شده بودند، وارد مدل گردیدند. در مرحله بعدی، سایر پارامترهای مدل به صورت دستی، اطراف مقادیر پیش‌فرض تغییر داده شد، تا بهترین برازش بین مقادیر عملکرد محصول مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، بدست آید.

یکی از اصلی‌ترین گام‌ها در واسنجی مدل AquaCrop، واسنجی نمودن پوشش کانوپی[3] (CC) می‌باشد. در این تحقیق از گزینه‌های موجود در مدل برای تخمین پوشش کانوپی اولیه (CC_0) استفاده گردید. مدل با استفاده از تراکم کشت گیاهی، وزن هزاردانه و نرخ جوانه‌زنی، پوشش کانوپی اولیه را تخمین می‌زند. نرخ رشد کانوپی به طور خودکار توسط مدل و پس از وارد کردن تاریخ‌های فنولوژیکی گیاه مانند زمان سبزشدن، زمان رسیدن به حداکثر پوشش کنوپی (CC_x)، زمان آغاز پیری و نیز بلوغ و رسیدن محصول محاسبه می‌شود.

پارامترهای اصلی برای تخمین پوشش کانوپی (CC)، شامل ضریب رشد کانوپی (CGC)، ضریب کاهش کانوپی (CDC) و نمایه‌های تنش آبی می باشند. پارامترهای تنش آبی و شکل منحنی‌های تنش به طور دستی اطراف مقادیر پیش فرض تغییر داده شد تا بهترین برازش بین داده‌های اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده مشاهده گردید. همچنین تاریخ گلدهی، طول دوره گلدهی و شاخص برداشت مرجع HI_0، و دوره رسیدن به شاخص برداشت نهایی HI، برای محاسبه عملکرد نهایی دانه، به مدل وارد شد. در این تحقیق، مدل AquaCrop با درجه-روز-رشد[4] (DGG) ران گردید که برای برآورد مقادیر مورد نیاز DGG از داده‌های درجه حرارت استفاده گردید.

1 - Conservative

2 - Calibration
3 -Canopy cover
4 - Growth- Day-Degree

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک تحت کشت گندم در ایستگاه تحقیقات دیم سیساب(۲)

ویژگی خاک	عمق (سانتیمتر)			
	۰-۳۰	۳۰-۷۰	۷۰-۹۵	۹۵-۱۵۰
بافت	سیلتی لوم	سیلتی لوم	سیلتی رسی لوم	سیلتی رسی لوم
چگالی ظاهری (gr/cm^3)	۱/۵۴	۱/۵۱	۱/۶۵	۱/۳۷
رطوبت حجمی (٪)FC	۲۷/۸	۲۷/۷	۲۳/۷	۲۳/۰
رطوبت حجمی (٪) PWP	۱۳/۲	۱۱/۶	۱۰/۲	۹/۹
درصد اشباع (٪)	۴۱/۶۸	۴۵/۴	۴۸/۶	۵۰/۸
هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۵۶	۰/۴۳	۰/۵۴	۰/۷۶

اعتبارسنجی و ارزیابی مدل

اعتبارسنجی[1] مدل که مرحله مهمی برای سنجش کارایی مدل به شمار می‌رود، عبارت است از مقایسه بین داده‌های مزرعه‌ای مستقل که در مرحله واسنجی بکار نرفته‌اند، با داده‌های خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل. باید توجه داشت که نتایج حاصل از مدل در صورتی قابل اعتماد خواهد بود، که ابتدا اعتبار مدل تایید شده باشد. در این قسمت، عملکرد نهایی دانه شبیه‌سازی شده با مقادیر عملکرد دانه واقعی در پنج سال زراعی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ الی ۱۳۸۶-۱۳۸۵، مورد مقایسه قرار گرفت.

برای ارزیابی کارایی مدل از چندین آماره ارزیابی شامل برازش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱، ضریب تعیین[2] (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا[3] (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده[4] (NRMES)، راندمان مدل[5] (ME) و شاخص توافق[6] (D-Index) استفاده شد. این این معیارهارا می‌توان طبق روابط (۵) الی (۸) محاسبه نمود (۱۶ و ۲۳).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M} \quad (۶)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - MO)^2 - \sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - MO)^2} \quad (۷)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i'| + |O_i'|)^2}\right] \quad (۸)$$

که در این روابط، S_i و O_i، به ترتیب مقادیر شبیه سازی شده و واقعی متغیر i ام، n تعداد مشاهدات، M، میانگین مشاهدات و $S_i' = S_i - M$ و $O_i' = O_i - M$، می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی کردن مدل

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های دو سال زراعی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ و ۱۳۸۸- ۱۳۸۷، مدل AquaCrop برای گیاه گندم دیم در ایستگاه سیساب، واسنجی شد. پارامترهایی که در واسنجی کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در این جدول روش تعیین این مقادیر مشخص شده است.

در مدل AquaCrop عکس‌العمل گیاه نسبت به شرایط محیطی با شاخص‌های تنش مشخص می‌شود. بطوری‌که اثر تنش آبی بر رشد کانوپی، تعرق (بسته شدن روزنه‌ها) و پیری زودرس با آستانه‌های تخلیه مجاز رطوبتی واسنجی شده تعیین می‌شود. این آستانه‌ها در جدول ۳ با P_{upper} و P_{lower} نشان داده شده است. مادامی که مقدار تخلیه رطوبتی خاک از مقدار P_{upper} تجاوز نکرده، تنشی بر گیاه وارد نمی‌شود. همچنانکه رطوبت خاک کمتر می‌شود، تنش بطور خطی یا غیر خطی مطابق با فاکتور شکل (f_{shape}) افزایش می‌یابد. بطوری‌که در P_{lower} گیاه حداکثر تنش را تجربه می‌کند. مقادیر P_{upper} و P_{lower} به عوامل بسیاری چون رقم گیاه، مرحله رشد، ویژگی‌های خاک، و میزان تبخیر بستگی دارند. f_{shape}، نیز بستگی به حساسیت گیاه نسبت به تنش و همچنین شدت و تداوم تنش دارد. مشخص نمودن این مقادیر، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های واسنجی مدل می‌باشد. در این تحقیق، در طی واسنجی، تغییرات جزئی در مقادیر مذکور نسبت به اعداد پیش‌فرض موجود در مدل، داده شد که علت این امر همان‌طور که گفته شد، رقم گندم مورد استفاده و شرایط آب و هوایی و خاک

1 - Validation
2 - Coefficient of Determination
3 - Root Mean Square Error
4 - Normalized Root Mean Square Error
5 - Model Efficiency
6 - Index of Agreement

منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای گیاهی بکار رفته در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گندم در سیساب

پارامتر گیاهی	مقدار	واحد/توضیحات	روش تعیین
دمای پایه (T_{Base})	۰	°C(قبلاً واسنجی شده است.)	پیش‌فرض
دمای($T_{Cut-off}$)	۲۸	°C	واسنجی
پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ۹۰ ٪ سبزشدن(CC_0)	۱/۵	cm^2	تخمین
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	۰/۵۵۸	%/°C-day	واسنجی
ضریب گیاهی برای تعرق در CC =٪۱۰۰	۱/۱	قبلاً برای گندم واسنجی شده است.	پیش‌فرض
کاهش در ضریب گیاهی پس از رسیدن به پوشش گیاهی حداکثر CC_x	۰/۱۵	%/day	واسنجی
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) در پیری	۰/۴۸۳	%/°C-day	واسنجی
ضریب بهره‌وری آب نرمال شده برای ET_o و CO_2 (WP^*)	۱۵	g/m^2 (قبلاً واسنجی شده است.)	پیش‌فرض
آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک P_{upper} برای رشد رویشی	۰/۲۵	مقدار بیش از این، بازدارنده رشد رویشی است.	واسنجی
آستانه پایینی تخلیه رطوبت خاک P_{lower} برای رشد رویشی	۰/۶۰	در این مقدار رشد رویشی متوقف می‌شود.	واسنجی
فاکتور شکل منحنی برای ضریب تنش رشد برگ رویشی	۲/۵	میزان تحدب متوسط	واسنجی
آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک P_{upper} برای هدایت روزنه‌ای	۰/۵۵	بیش از این مقدار، روزنه‌ها بسته می‌شوند.	واسنجی
فاکتور شکل منحنی برای ضریب تنش روزنه‌ای f_{shape}	۲/۵	میزان تحدب متوسط	واسنجی
آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک P_{upper} برای ضریب تنش پیری	۰/۷۰	بیش از این، سبب پیری زودرس کانوپی می‌شود	واسنجی
فاکتور شکل منحنی برای ضریب تنش پیری	۲/۵	میزان تحدب متوسط	واسنجی
شاخص برداشت مرجع HI_0	۳۰	%	اندازه‌گیری

واسنجی نمودن پوشش کانوپی نیز یکی از اصلی‌ترین گام‌ها در واسنجی مدل AquaCrop، به شمار می‌رود. پارامترهای مؤثر بر پوشش کانوپی، ضریب رشد کانوپی (CGC) و ضریب کاهش کانوپی (CGC) هستند که در جدول ۳ آورده شده‌اند. آستانه‌های P_{upper} و P_{lower} و فاکتور f_{shape} بر رشد کانوپی و پیری زودرس تأثیر دارند. با استفاده از روش آزمون و خطا، مقدار ۰/۵۵۸ و ۰/۴۸۳ درصد به ترتیب برای CGC و CDC بدست آمد.

در مدل AquaCrop مقدار شاخص برداشت مرجع (HI_0) برای گندم، ۴۵ تا ۵۰ درصد پیشنهاد شده است. در حالی که در این تحقیق، در مراحله واسنجی مقدار این شاخص، ۱۵ تا ۲۰ درصد کمتر از مقدار پیش‌فرض یعنی معادل ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. علت این موضوع نیز می‌تواند به دلیل رقم مورد استفاده و یا آب و هوای خشک منطقه باشد. پارامترهای مخصوص مراحل فنولوژیکی گیاه نیز که در مرحله واسنجی از مقادیر پیش‌فرض خود تغییر داده شدند، در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

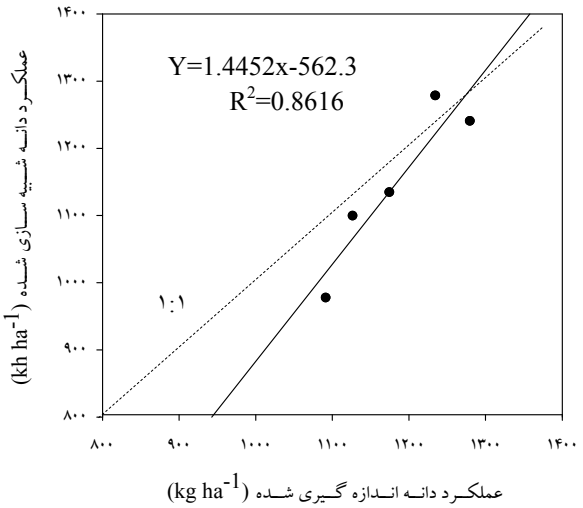
جدول٤- پارامترهای مربوط به مراحل فنولوژیکی گندم دیم در سیساب، پس از واسنجی مدل AquaCrop

پارامتر گیاهی	مقدار	واحد
زمان از کاشت تا سبزشدن	۱۴۵	GDD[1]
زمان از کاشت تا آغاز گلدهی	۱۱۹۰	GDD
طول دوره گلدهی	۱۹۵	GDD
زمان از کاشت تا رسیدن به کانوپی حداکثر CC_X	۱۱۲۰	GDD
زمان از کاشت تا شروع پیری گیاه	۱۶۰۰	GDD
زمان از کاشت تا بلوغ[2] فیزیولوژیکی	۲۲۰۰	GDD
زمان از کاشت تا رسیدن به حداکثر عمق ریشه	۸۵۹	GDD
حداکثر عمق مؤثر ریشه	۹۰	cm
حداقل عمق مؤثر ریشه	۳۰	cm

1 -Degree-Growth-Day
2 – Maturity

نتایج ارزیابی مدل AquaCrop بر اساس میزان دانه تولیدی

اعتبارسنجی مدل نیز با استفاده از داده‌های پنج سال زراعی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ الی ۱۳۸۶- ۱۳۸۵، انجام شد. شکل ۲، همبستگی خطی بین مقادیر نهایی عملکرد دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقدار R^2 معادل با ۰/۸۶۲، نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد محصول، توافق و همبستگی خوبی با مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) دارد. مقادیر سایر معیارهای ارزیابی شامل RMSE، NRMSE، ME و D-Index نیز در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۲- میزان همبستگی بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده دانه تولیدی گندم

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی برای سنجش کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم دیم در سیساب

سال زراعی	عملکرد دانه ($t\ ha^{-1}$)	
	اندازه‌گیری شده	شبیه‌سازی شده
۸۲-۸۱	۱/۲۸۰	۱/۲۴۰
۸۳-۸۲	۱/۱۷۵	۱/۱۳۴
۸۴-۸۳	۱/۱۲۷	۱/۰۹۹
۸۵-۸۴	۱/۲۳۵	۱/۲۷۸
۸۶-۸۵	۱/۰۹۲	۰/۹۷۷
آماره ارزیابی		
RMSE	۰/۰۶۲	
NRMSE	۵/۲۳۵	
ME	۰/۹۱۷	
D-Index	۰/۸۷۷	

هرچه مقدار میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) کمتر باشد و به صفر نزدیکتر باشد، مدل برآورد دقیق‌تری ارایه داده است. مقدار میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، اگر کمتر از ۱۰درصد باشد، نشان‌دهنده عالی بودن شبیه‌سازی است (۱۳). راندمان مدل (ME)، توانمندی مدل را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، توانمندی مدل در برآورد نتایج بیشتر بوده است. مقدار شاخص توافق D-Index نیز هر چه به یک نزدیکتر باشد، بیانگر توافق بهتر بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است. طبق نتایج

بدست آمده در جدول ۵ و مشاهده مقادیر بدست آمده برای آماره‌های مذکور، مشخص است که مدل AquaCrop به خوبی مقدار عملکرد دانه گندم را در ایستگاه مورد مطالعه شبیه‌سازی کرده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این تحقیق نشان داد که اگر چه مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل‌های گیاهی به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، با این وجود از دقت و توانمندی بالایی در شبیه‌سازی رشد گیاه برخوردار است.

این مدل قادر است با دقت بالایی عملکرد دانه را شبیه‌سازی کند و می‌توان از آن به عنوان ابزاری کارآمد برای برآورد عکس‌العمل گیاه نسبت به آب مصرفی استفاده کرد.

در مرحله واسنجی کردن مدل، مقادیر پارامترهای مربوط به تنش آبی، عوامل مربوط به پوشش کانوپی و شاخص برداشت مرجع نسبت به مقادیر پیش فرض تغییراتی داشته‌اند. که علت این موضوع می‌تواند به دلیل رقم مورد استفاده و یا آب و هوای نسبتاً خشک ایستگاه سیساب باشد.

در صورتی که مدل خوب واسنجی و ارزیابی شده باشد، می توان آن را به عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی کشت گندم دیم و تعیین بهترین زمان کشت گیاه در یک منطقه به نحوی که بیشترین عملکرد حاصل شود، بکار برد.

سپاسگزاری

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از مرکز مطالعات منابع آب وزارت نیرو (تماب)، سازمان آب منطقه‌ای، سازمان هواشناسی و ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیساب که اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق را در اختیار آنها نهاده‌اند، سپاسگزاری نمایند.

منابع

۱- حیدری‌نیا م.، ناصری ع.ع. و برومندنسب س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد شبیه AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مجله مهندسی منابع آب. ۵(۱۲): ۳۹- ۴۹.

۲- صاحب‌جمع ع.ا.، عباسپورتبریزی ا.، مهدوی م. و بغدادی م. ۱۳۸۶. مطالعات خاکشناسی تفصیلی دقیق و طبقه‌بندی اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیساب بجنورد. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. ۷۰ صفحه.

۳- علیزاده ح.ع.، نظری ب.، پارسی‌نژاد م.، رمضانی اعتدالی ه. و جانباز ح.ر. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۴): ۲۷۳-۲۸۳.

4- Andarzian B., Bannayan M., Steduto P., Mazraeh H., Barati M.E. and Rahnama A. 2011. Validation and Testing of the AquaCrop Model under Full and Deficit Irrigated Wheat Production in Iran. Agricultural Water Management. 100: 1-8.

5- Bessembider J.J.E., Leffelaar P.A., Dhindwal A.S. and Ponsioen T.C. 2005. Which Crop and Which Drop, and the Scope for Improvement of Water Productivity. Agricultural Water Management. 73, 113–130.

6- Doorenbos J. and Kassam A.H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

7- Farahani H.J., Izzi G., and Oweis T.Y. 2009. Parameterization and Evaluation of The Aquacrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agron. J. 101, 469−476.

8- Garcia-Vila M., Fereres E., Mateos L., Orgaz F., and Steduto P. 2009. Deficit Irrigation Optimization of Cotton with Aquacrop. Agron. J. 101, 477−487.

9- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J.A., Taboada C., Mendoza J., Huanaca R., Mamani A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V., and Steduto P. 2009. Simulating Yield Response to Water of Quinoa (Chenopodium Quinoa Willd.) With FAO-Aquacrop. J. Agron. 101, 499−508.

10- Hargreaves G.H. and Samani Z.A. 1982. Estimating Potential Evapotranspiration. J. Irrig. and Drain Engr., ASCE, 108(IR3):223-230.

11- Hoogenboom G.J., White J.W., and Messina C.D. 2004. From genome to crop: integration through simulation modelling. Field Crop Res. 90, 145 -163.

12- Hsiao T.C., Hneg L.K., Steduto P., Rojas-Lara B., Raes D. and Fereres E. 2009. Aquacrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Responseto Water: III. Parameterization and Testing for Maiz. Agron. J. 101:448-459.

13- Http://www.Irimet.Net.

14- Jamieson P.D., Porter J.R., and Wilson D.R. 1991. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Res. 27, 337–350.

15- Jones C.A. and Kiniry J.R. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, 194 Pp.

16- Loague K. and Green R.E. 1991. Statistical and Graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models: Overview and Application. J. Contaminant Hydrology, 7: 51-73.
17- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. Aquacrop-The FAO Crop Model To Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. J. Agron. 101, 438–447.
18- Ritchie J.T. 1972. Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. Water Resour. Res. 8, 1204±1213.
19- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. Aquacrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agron. J. 101:426–437.
20- Stockle C., Martin S.A., and Campbel G.S. 1994. Cropsyst a Cropping Simulation Model Water, Nitrogen Budgets and Crop Yield. A\Agricultural Systems. 46:335-359.
21- Williams J.R., Jones C.A., and Dyke P.T. 1984. A Modeling Approach to Determining the Relationship between Erosion and Soil Productivity. Trans. ASAE 27(1):129–144.
22- Van Keulen H., and Wolf J. 1986. Modelling of Agricultural Production: Weather Soils and Crops. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, P. 479.
23- Willmott C.J., Akleson G.S., Davis R.E., Feddema J.J., Klink K.M., Legates D.R., Odonnell J., and Rowe C.M. 1985. Statistic for the Evaluation and Comparison of Models. J. Geophys. Res. 90, 8995−9005.

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 5, Nov.-Dec. 2014, p. 930-939

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۳، ص. ۹۳۹-۹۳۰

Simulation of Rainfed Wheat Yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan

N. Khalili[1]* - K. Davary[2] - A. Alizadeh[3] - M. Kafi[4] - H. Ansari[5]

Received:06-06-2014
Accepted:29-09-2014

Abstract

Modeling of crop growth plays an important role in evaluation of drought impacts on rainfed yield, choosing an optimum sowing date, and managerial decision-makings. Aquacrop model is a new crop model that developed by Food and Agriculture Organization (FAO), that is a model for simulation of crop yield based on "yield response to water" with meteorological, crop, soli and management practices data as inputs. This model has to be calibrated and validated for each crop species and each location. In this paper, the Aquacrop has been calibrated and evaluated for rainfed wheat in Sisab station (Northern Khorasan). For this purpose, daily meteorological data and historical yield data from two cropping season (2007-2008 and 2008-2009) in the Sisab station have been used to calibrate this model. Next, meteorological data and historical yield data of five cropping season (2002-2003 to 2006-2007) are used to validate the model. The result shows that the Aqucrop can accurately predict crop yield as R^2, RMSE, NRMSE, ME, and D-Index are achieved 0.86, 0.062, 5.235, 0.917 and 0.877, respectively.

Keywords: AquaCrop Model, Crop Yield, Modeling Crop, Rainfed Wheat, Sisab

1, 2, 3, 5 - Ph.D Student, Associate Professor, Professor, Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(* - Corresponding Author Email: najmehkhalili@gmail.com)
4- Professor of Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad