ارزیابی مدل Aqua Crop در شبیه سازی زیست توده جو در شرایط کم آبیاری

حبیب کریمی اورگانی، علی رحیمی خوب[۱]* و محمد هادی نظری فر

دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
habibkarimi@ut.ac.ir
استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
akhob@ut.ac.ir
محمد هادی نظری فر، کارشناس پژوهشی گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
nazarifar@ut.ac.ir

چکیده

مدل Aqua Crop بر اساس پاسخ عملکرد محصول به آب توسط سازمان فائو توسعه یافته است و نسبت به سایر مدل‌ها به عوامل ورودی کمتری نیاز دارد. به منظور ارزیابی مدل Aqua Crop در شرایط کم‌آبیاری، آزمایشی در منطقه پاکدشت بر روی گیاه جو انجام شد. این آزمایش با سه تیمار آبیاری و سه تیمار تاریخ کاشت در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه پردیس ابوریحان انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل و دو تیمار کم‌آبیاری ۸۰٪ و ۶۰ درصد و تیمار تاریخ کاشت شامل تیمارهای زود هنگام (۸ آبان)، کاشت به موقع (۱۸ آبان) و دیرهنگام (۲۸ آبان) بودند. مقایسه مقادیر برآورد شده مدل Aqua Crop و اندازه‌گیری شده واقعی عملکرد محصول (زیست توده) جو در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمارهای مختلف نشان داد که مدل Aqua Crop تا حدود ۹۶ درصد تغییرات عملکرد محصول را در شرایط مختلف کاشت، آبیاری کامل و کم‌آبیاری شبیه‌سازی می‌کند. همین طور جذر میانگین خطا بین داده‌های اندازه گیری شده و شبیه سازی مدل از ۰/۴۱ تا ۰/۹۶ تن در هکتار تغییر می‌کند که متوسط این خطا حدود ۰/۷۷ تن در هکتار است که معادل ۸/۴ درصد خطا نسبت به متوسط عملکرد محصول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی : آب مصرفی گیاه، بهره‌وری آب نرمال شده، تاریخ کاشت، تنش آبی، تبخیر و تعرق.

۱- آدرس نویسنده مسئول: پاکدشت، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
*- دریافت: آذر ۱۳۹۵ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

کمبود آب یک مانع اساسی در تولید مواد غذایی در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه خشک دنیا است. با افزایش جمعیت در بسیاری از مناطق دنیا، یک عزم جهانی برای افزایش تولیدات کشاورزی به منظور جبران کمبود غذا از طریق مدیریت بهتر آبیاری شکل گرفته شده است (آرایا و همکاران،۲۰۱٦). سازمان غذا و کشاورزی (FAO) برای استفاده بهینه از آب در تولید مواد غذایی، مدل Aqua Crop را توسعه داد. این مدل، واکنش عملکرد محصول را به آب مصرفی گیاه ارتباط می‌دهد و تکمیل کننده تئوری پاسخ عملکرد گیاه به آب مصرفی دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) است (استدتو و همکاران،۲۰۰۹). این مدل بر خلاف بسیاری از مدل‌های دیگر به قدری ساده است که اصول آن برای کاربران غیر پژوهشگر نیز قابل کاربرد است (آرایا و همکاران،۲۰۱۰). علاوه بر آن، مدل از دقت کافی برخوردار است و به داده-های ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها نیاز دارد (استدتو و همکاران،۲۰۰۹؛ هسائو و همکاران، ۲۰۰۹). در اغلب مناطق ایران محدودیت منابع آب وجود دارد، لذا ضروری است که امکان حصول حداکثر عملکرد محصول با استفاده از مدل‌های کم آبیاری مورد بررسی قرار گیرد. این مهم با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز اثر آب بر عملکرد محصول مثل Aqua Crop بدست می‌آید.

آزمایشات متعددی در رابطه با دقت مدل Aqua Crop برای گیاهان مختلف در مناطق مختلف جهان انجام شده است. این مدل با استفاده از داده‌های تجربی شش فصل زراعی بر روی ذرت در دانشگاه کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد، زیست توده و عملکرد محصول در شرایط مختلف تراکم بوته، تاریخ کاشت و نیاز آبی با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌شود (هسائو و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین این مدل برای شبیه سازی زیست توده و عملکرد محصول جو در شمال اتیوپی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل از دقت خوبی برخوردار است (آرایا و همکاران،۲۰۱۰).

مدل Aqua Crop با دیگر مدل‌های شبیه سازی عملکرد محصول مورد مقایسه قرار گرفت. در سال ۲۰۰۹، مدل Aqua Crop را با مدل‌های Crop sys؛ و Foset برای شبیه سازی محصول آفتاب‌گردان در شرایط کم آبیاری در جنوب ایتالیا مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر، استفاده از مدل Aqua Crop ترجیح دارد (تودورویچ و همکاران، ۲۰۰۹). هنگ و همکاران (۲۰۰۹) گزارش دادند، مدل Aqua Crop در شرایط تنش آبی شدید، از دقت مطلوبی برخوردار نیست. بر اساس پژوهش آنها، عملکرد محصول دانه، زیست توده و پوشش گیاهی محصول ذرت در شرایط آبیاری کامل و تنش آبی ملایم بطور رضایت بخشی شبیه‌سازی می‌شود، ولی در شرایط تنش آبی شدید بخصوص وقتی تنش در دوره پیری اعمال شود، مدل از دقت مطلوبی برخوردار نیست. فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) مدل Aqua Crop را در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری (٤۰، ٦۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل) برای پنبه در منطقه گرم و خشک و بادخیز مدیترانه‌ای شمال سوریه مورد ارزیابی قرار دادند.

نتایج نشان داد که مقدار خطای مقادیر پیش‌بینی شده، باستثنای کم آبیاری‌های ٦۰ و ٤۰ درصد با بیش از ۳۲ درصد خطا، در بقیه موارد در حدود ۱۰ درصد بوده است. اقبال و همکاران (۲۰۱٤) مدل Aqua Crop نسخه ۳/۱ را برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین واسنجی و صحت سنجی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، عملکرد محصول و زیست توده در شرایط مختلف کم آبیاری با دقت مناسبی توسط مدل برآورد می‌شود. همچنین این مدل توسط مبهودهی و همکاران (۲۰۱٤) در منطقه نیمه خشک آفریقای جنوبی برای یکی از گیاهان گرمسیری آن بنام تارو ارزیابی قرار گرفت و زیست‌توده با ضریب تعیین ۰/۹۹ و جذر میانگین خطا برابر ۱/۷٤ تن در هکتار برآورد شد.

مدل Aqua Crop برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل در منطقه کرج برای پیش‌بینی عملکرد محصول گندم

Archive of SID

www.SID.ir

و سویا در شرایط کم آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ بابازاده و سرایی‌تبریزی، ۱۳۸۹). مدل Aqua Crop برای محصول آفتاب‌گردان در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد این مدل با دقت بالایی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (حیدری‌نیا و همکاران،۱۳۸۹). مدل فوق برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین توسط رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۳) مورد واسنجی قرار گرفت. بر اساس نتایج آنها متوسط خطای مدل حدود ۱۰ درصد تعیین شد.

کریمی و همکاران (۱۳۹۵) دو عامل متغیر درجه روز رشد تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای گیاه جو در منطقه پاکدشت را برای شرایط آبیاری کامل مورد واسنجی و صحت سنجی قرار دادند. مقدار درجه روز رشد از شروع جوانه‌زنی تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده با استفاده از داده-های واسنجی و روش سعی و خطا بترتیب ۱۲٦۰ درجه و ۱٤/۸ گرم بر مترمربع برآورد شد. نتایج با استفاده از داده-های صحت سنجی نشان داد، مدل واسنجی شده با ضریب تعیین ۰/۹۹ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۹ تن در هکتار تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. توکلی و همکاران (۲۰۱۵) مدل Aqua Crop را برای پیش بینی اثر کم آبیاری و کشت دیم بر روی عملکرد محصول جو، رطوبت خاک و درصد تاج پوشش سبز گیاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مدل دقت مناسب برای شبیه سازی عملکرد محصول جو در شرایط کم آبیاری دارد و ابزار مناسبی برای تعیین زمان مناسب کشت دیم بر اساس اولین بارندگی موثر است. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی مدل Aqua Crop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول زیست توده در شرایط کم‌آبیاری است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، در منطقه پاکدشت بر روی گیاه جو رقم ریحان در سال زراعی ۱۳۹۳- ۱۳۹٤ انجام شد. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱٤۱ میلیمتر، دمای متوسط سالانه ۱۵/٦ سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلیمتر است (امیری‌تبار و همکاران، ۱۳۹۳). مزرعه تحقیقاتی در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ٤۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک

ضخامت لایه (m)	بافت خاک	رطوبت ظرفیت مزرعه (درصد حجمی)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	EC (dS/m)
۰/۲	Silt loam	۲۰/۱۵	۱۰/۰۱	۱/۳۶	۴۴/۶۴	۳/۵۵
۰/۲	Sandy loam	۲۰/۴۵	۱۰/۲۲	۱/۲۳	۴۳/۵۸	۳/۶۹
۰/۲	Sandy loam	۲۱/۴۵	۱۰/۶۵	۱/۳۲	۴۰/۸۶	۴/۰۶
۰/۴	Sandy loam	۱۸/۸۲	۹/۶۰	۱/۳۳	۴۸/۵۷	۴/۵۵

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

عامل	Ca+Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	pH	EC (dS/m)
مقدار	۱۶	۲/۹	۷/۲	۱/۴

Archive of SID

www.SID.ir

مشخصات تیمارها و اندازه‌گیری‌ها

تیمارهای آزمایش شامل سه تیمار اصلی آبیاری و سه تیمار فرعی تاریخ کاشت با سه تکرار در ۲۷ پلات درقالب طرح بلوکهای کامل تصادفی در سال آبی ۹٤-۱۳۹۳ اجرا گردید. تیمارهای آبیاری عبارت بودند از: ۱) آبیاری کامل، ۲) ۸۰ درصد آبیاری و ۳) ٦۰ درصد آبیاری. تیمارهای ۸۰ و ٦۰ درصد آبیاری جز تیمارهای کم‌آبیاری این پژوهش‌اند. تیمارهای آبیاری کامل، آبیاری ۸۰ و ٦۰ درصد بترتیب با نمادهای I1، I2 و I3 نامگذاری شدند. تیمارهای تاریخ کاشت شامل: ۱) کاشت زود هنگام (۸ آبان)، ۲) کاشت بهنگام (۱۸ آبان) و ۳) کاشت دیرهنگام (۲۸ آبان) بودند. تیمارهای تاریخ کشت زود هنگام، بهنگام و دیر هنگام بترتیب با نمادهای D1، D2 و D3 نام گذاری شدند. فرضیه آماری این بود که عملکرد محصول تیمارهای فوق تفاوت معنی‌دار با هم داشته باشند. کرت‌ها به ابعاد ۲/۸×٤ (متر×متر) انتخاب شدند و به منظور مستقل بودن تیمارها نسبت به هم یک متر بین کرت‌ها فاصله گذاشته شد. تمام عملیات کشاورزی در طول فصل کشت بر اساس توصیه‌های متخصصین کشاورزی انجام گرفت. بذور با دست بصورت یکنواخت در سطح کرت پخش شدند. مقدار ترکم بذر ۱۵۰ دانه در مترمربع بود و مقدار کود ازت و پتاسیم به ترتیب ۱۰۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. کل کود پتاسیم و نصف کود ازت در زمان کاشت و باقیمانده کود ازت قبل از مرحله گلدهی به زمین داده شد. تاریخ برداشت جو در تیمارهای زود هنگام، به موقع و دیر هنگام بترتیب ۲٤ اردیبهشت (۱۹٦ روز پس از کاشت)، ۳۱ اردیبهشت (۱۹۳ روز پس از کاشت) و اول خرداد (۱۸٤ روز پس از کاشت) بود.

جهت تعیین رطوبت خاک و زمان آبیاری از دستگاه رطوبت سنج[2] TDR (مدل دستگاه PR2, Delta-T Devices Ltd, UK) که معادله واسنجی آن برای خاک محل آزمایش، قبلاً توسط کارشناسان گروه آبیاری تعیین شده‌بود، استفاده شد. در این پژوهش از هر تیمار تاریخ کاشت، یکی از کرت‌های آبیاری کامل بعنوان کرت شاهد آبیاری انتخاب شد و اندازه‌گیری رطوبت خاک در این کرت‌ها انجام گرفت. بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص دستگاه فوق در کرت‌های آبیاری شاهد نصب شد و رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک به فواصل ۱۰ سانتی‌متر بطور روزانه اندازه‌گیری می‌شد. زمان آبیاری بصورتی تعیین می‌شد که کمبود رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بیشتر از ۵۵ درصد کل رطوبت قابل استفاده در خاک نگردد (دورنبوس و پریوت، ۱۹۷۷). کل رطوبت قابل استفاده در خاک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TAW=\left(\sum_{i-1}^{n}(\theta_{fci}-\theta_{wpi})\times D_i\right)\times 1000 \qquad (1)$$

در رابطه فوق:

TAW کل رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بر حسب میلی‌متر، n تعداد لایه خاک تا عمق توسعه ریشه، θ_{fci} رطوبت ظرفیت مزرعه در لایه i ام، θ_{wpi} رطوبت نقطه پژمردگی در لایه i ام و D_i ضخامت خاک در لایه i ام بر حسب متر. در این تحقیق، عمق ریشه در مرحله اول رشد به میزان ۰/۳ متر و در مرحله میانی و رسیدگی ۰/٦ متر در نظر گرفته شد و برای مرحله توسعه، به صورت درون‌یابی خطی بین رشد اولیه و رشد کامل محاسبه گردید. حجم آب آبیاری در تیمارهای شاهد بر اساس کمبود رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت تعیین و با استفاده از کنتور آب وارد کرت می‌شد. حجم آب سایر تیمارهای آبیاری بر اساس درصد آبیاری آن تیمار محاسبه و تمامی آنها در یک روز آبیاری می‌شدند. لازم به ذکر است برای جلوگیری از خشک شدن گیاه در ماه‌های اولیه رشد، اعمال کم‌آبیاری در ماه سوم و بعد از مرحله پنجه زنی گیاه صورت گرفت و تیمارهای ٦۰ و ۸۰ درصد آبیاری در ماه‌های آبان و آذر حجم آب برابر با تیمار آبیاری کامل را دریافت کردند. جدول ۳ ارتفاع آب داده شده به تیمارهای مختلف در طول دوره کشت ارائه شده است.

[2] - Time domain reflectometry

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- عمق آبیاری در ماه‌های مختلف دوره رشد جو در تیمارهای مختلف (بر حسب میلی‌متر)

ماه	کاشت زود هنگام			کاشت بهنگام			کاشت دیر هنگام		
	کامل	۸۰٪	۶۰٪	کامل	۸۰٪	۶۰٪	کامل	۸۰٪	۶۰٪
آبان	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲	۳۰	۳۰	۳۰
آذر	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۲	۲۲	۲۲
دی	۲۹	۲۳	۱۷	۲۹	۲۳	۱۷	۳۲	۲۶	۱۹
بهمن	۰	۰	۰	۳۶	۲۹	۲۲	۳۲	۲۶	۱۹
اسفند	۸۰	۶۴	۴۸	۳۶	۲۹	۲۲	۳۶	۲۹	۲۲
فروردین	۸۷	۶۹	۵۲	۱۳۰	۱۰۴	۷۸	۸۷	۶۹	۵۲
اردیبهشت	۸۷	۶۹	۵۲	۴۳	۳۵	۲۶	۸۷	۶۹	۵۲
مجموع	۳۶۴	۳۰۶	۲۵۰	۳۵۵	۳۰۱	۲۴۶	۳۲۶	۲۷۱	۲۱۶

تشریح مدل Aqua Crop

در این پژوهش از نسخه ٤ مدل Aqua Crop استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد محصول (زیست-توده) تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۱) حساب می‌شود (استدتو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$B=BWP\left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \quad (۲)$$

در رابطه فوق:

B عملکرد محصول (زیست‌توده) قسمت هوایی گیاه تا iامین روز پس از کاشت (گرم بر متر مربع)، BWP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر متر مربع)، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلیمتر در روز) و $ET_{o,i}$ تبخیر و تعرق مرجع (میلیمتر در روز) می‌باشند. عامل BWP محصول جو در منطقه پاکدشت برابر ۱٤/۸ گرم بر مترمربع واسنجی شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ که همین مقدار در اجرای مدل استفاده شد. عامل تعرق گیاه (T_r) در مدل Aqua Crop از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_C \times CC \times ET_o \quad (۳)$$

در رابطه فوق:

K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_o تبخیر و تعرق مرجع می‌باشند. برای تعیین ضریب K_s، رطوبت باقیمانده در خاک بطور روزانه با استفاده از بیلان آب در محدوده توسعه ریشه محاسبه می‌شود. در صورتیکه مقدار رطوبت در محدوده رطوبت سهل‌الوصول باشد، ضریب فوق برابر یک خواهد بود و در غیراینصورت از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$K_s = \frac{TAW - Dr}{TAW - RAW} \quad (٤)$$

در رابطه فوق:

TAW کل رطوبت قابل استفاده در خاک (mm)، D_r کمبود رطوبت خاک (mm) و RAW رطوبت سهل‌الوصول (mm) می‌باشند. ضریب گیاهی K_C نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل Aqua Crop با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ٥٦ فائو در طول دوره رشد برآورد می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). ضریب پوشش گیاهی در مدل Aqua Crop از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (استدتو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$CC=CC_o\times e^{(CGC\times t)} \quad (٥)$$

$$CC=CC_x-[CC_x-CC_o\times e^{(-CGC\times t)}] \quad (٦)$$

معادله ٤ برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و معادله ٥ برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_o پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC=CC_x\times\{1-0.05\times[e^{\left(\frac{CDC}{CC_x}\times t\right)}-1]\} \quad (٧)$$

در روابط فوق:

Archive of SID

www.SID.ir

CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان بر حسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. مدل Aqua Crop از روش واحد گرمایی بر حسب درجه روز رشد، برای توصیف رشد گیاه استفاده می‌کند. با استفاده از این روش، طول دوره‌های رشد گیاه یا زمان لازم برای رسیدن به یک مرحله از رشد گیاه بر حسب درجه روز رشد به جای تعداد روزها بیان می‌شود. درجه روز رشد از تفاضل دمای پایه بر متوسط دمای روزانه هوا حساب می-شود:

$$GDD = T_{avg} - T_{base} \quad (۸)$$

در رابطه فوق:

T_{avg} متوسط دمای روزانه هوا (^oC)، T_{base} دمای پایه (^oC) و GDD درجه روز رشد (^oC) می‌باشند. دمای پایه، دمایی است که کمتر از آن برای محاسبه درجه روز رشد به حساب نمی‌آید و به عبارتی رشد گیاه به جریان نمی-افتد. همچنین در Aqua Crop آستانه دمای بالا (T_{upper}) هم در نظر گرفته می‌شود. آستانه دمای بالا، دمایی است که بالاتر از آن منجر به افزایش درجه روز رشد نمی‌شود. مقادیر دمای پایه و آستانه دمای بالا بر اساس مقادیر پیش فرض مدل بترتیب برابر صفر و ۱۵ در نظر گرفته شد (راس و همکاران، ۲۰۱۲). مدل Aqua Crop برای واسنجی عامل درجه روز تا رسیدن محصول برای منطقه پاکدشت مورد واسنجی قرار گرفت و مقدار آن برابر ۱۲٦۰ درجه روز بدست آمد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵).

ارزیابی مدل Aqua Crop

داده‌های تبخیر و تعرق مرجع بعنوان ورودی-های مدل برای اجرای مدل Aqua Crop مورد نیاز است. به همین منظور، متغیرهای هواشناسی شامل دمای حداکثر و حداقل هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع د متری سطح زمین از ایستگاه پردیس ابوریحان مربوط به دوره رشد محصول جو از تاریخ اول آبان ۱۳۹۳ تا آخر خرداد ۱۳۹٤ جمع آوری شدند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده روش پنمن مانتیث فائو بطور روزانه در طی رشد محصول جو محاسبه و وارد مدل شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). چهار عامل مربوط به پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانه زنی (CCo)، نرخ رشد پوشش گیاه در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CCX) و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) برای اجرای مدل Aqua Crop لازم می‌باشند. مقدار پوشش گیاه در شروع مرحله سبز شدن بر اساس پیش فرض مدل Aqua Crop برابر ۲/۲۵ درصد به مدل داده شد (استدتو و همکاران، ۲۰۰۹). برای تعیین سه عامل دیگر، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد اندازه-گیری شد و بر پایه این اندازه‌گیری‌ها حداکثر پوشش گیاه و تغییرات پوشش گیاه بین دو اندازه‌گیری هم بر اساس شدت تغییرات بر روز و هم بر درجه روز رشد محاسبه گردید. برای تعیین پوشش گیاهی از روش پاتریگنانی و اشنر (۲۰۱۵) استفاده شد. با استفاده از این روش، از سطح کرت عکس گرفته می‌شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپی[1]، درصد پوشش گیاه محاسبه می‌گردید. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ٦۰ سانتی‌متر بالاتر از تاج‌پوشش گیاه و بطور موازی با سطح زمین قرار داده می‌شد. سه نمونه از عکس‌های قبل و بعد از پردازش در نرم افزار کانوپی در شکل ۱ ارائه شده است. طول و شروع دوره‌های مختلف رشد محصول جو همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری یادداشت برداری و ثبت می-شد. مجموعه عوامل اندازه‌گیری شده و مشاهده شده از مراحل مختلف رشد که به عنوان ورودی به مدل Aqua Crop وارد شدند در جدول ٤ ارائه شده است.

مقدار زیست توده تولید شده در طول دوره رشد قبل از رسیدن کامل محصول و همچنین در زمان برداشت محصول پنج نوبت برای هر تیمار اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده پس از برداشت محصول، کل قسمت اندام هوایی از سطح خاک به بالا از وسط هر کرت برداشت شد.

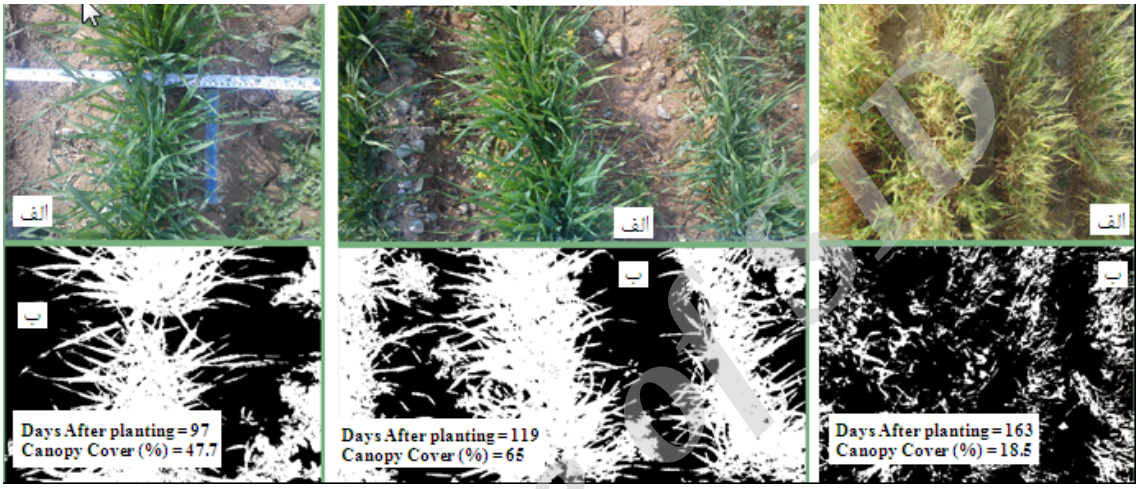
[1] Canopeo

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴- مقادیر عوامل ورودی به مدل Aqua Crop

عامل	واحد	تیمار		
		زود هنگام	به موقع	دیر هنگام
پوشش سطح اولیه (CC_0)	درصد	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵
حداکثر پوشش گیاه (CC_X)	درصد	۹۰	۸۷	۶۷
زمان جوانه زنی	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	(۹۸)۱۱	(۱۰۰) ۱۰	(۱۵۱) ۱۶
نرخ توسعه پوشش گیاه (CGC)	درصد بر درجه روز (درصد بر روز)	(۵/۱) ۰/۶۷۳	(۵/۱) ۰/۶۷۵	(۵/۵) ۰/۷۱۲
نرخ کاهش پوشش گیاه (CDC)	درصد بر درجه روز (درصد بر روز)	(۸/۱) ۰/۶	(۷/۳۹) ۰/۵۷۵	(۸/۲) ۰/۶
زمان رسیدن به حداکثر پوشش	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	(۱۰۲۱) ۱۳۳	(۹۹۹) ۱۳۰	(۹۸۲) ۱۲۷
مدت گلدهی	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	(۱۶۳) ۱۴	(۳۱۴) ۲۵	(۱۶۳) ۱۳



شکل ۱ - تصاویر تاج پوشش محصول جو در سه تاریخ مختلف دوره رشد سال زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ مزرعه پردیس ابوریحان، الف- تصویر برداشت شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش شده توسط نرم‌افزار کانوپی.

نمونه‌ها به مدت سه روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس عملکرد کل محصول برای هر تیمار توزین شد. داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS تحلیل آماری شدند.

در این پژوهش مقادیر اندازه‌گیری شده زیست-توده در تیمارهای مختلف بعنوان داده‌های واقعی و مقادیر شبیه‌سازی شده مدل بعنوان مقادیر برآورد شده در نظر گرفته شدند. به منظور ارزیابی مدل آکواکرپ، علاوه بر ترسیم نمودارهای اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شده است. معادلات این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشند (امامی‌فر و همکاران، ۱۳۹۳):

$$R^2 = \frac{[\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})]^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۸)$$

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^{N} (O_i - P_i)^2\right]^{0.5} \quad (۹)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)}{N} \quad (۱۰)$$

که در آنها:

Pi مقادیر برآورد شده مدل، $\overline{P}$ متوسط مقادیر برآورد شده مدل، Oi مقادیر اندازه‌گیری شده، $\overline{O}$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مشاهدات می‌باشند. میانگین خطای اریب میزان خطا را با بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد نشان می‌دهد. در صورتی که این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که در مجموع نتایج مدل بیشتر از مقادیر واقعی است.

Archive of SID

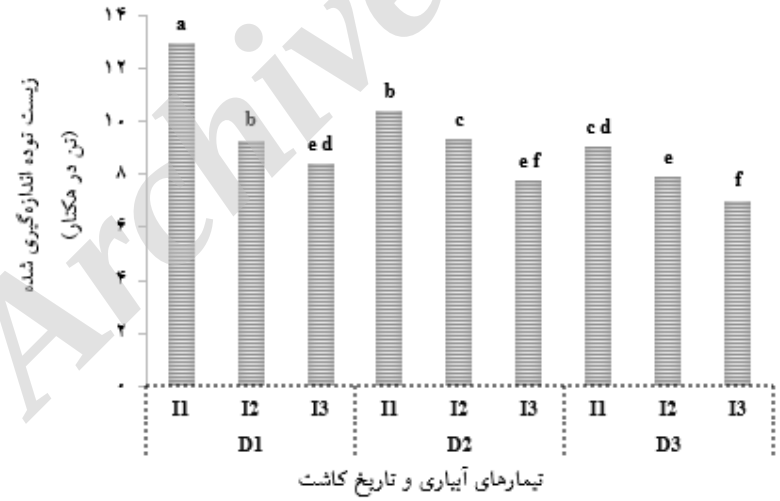
www.SID.ir

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس که با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت در جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، عملکرد محصول زیست‌توده تحت تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت در سطح یک درصد تفاوت معنی‌دار دارد. منبع تغییر تکرار، تفاوت معنی‌داری از نظر آماری بوجود نیاورده و بنابراین نتایج اندازه‌گیری قابل اعتماد می‌باشند. با توجه به اینکه اثر متقابل آبیاری و تاریخ کاشت در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، از آزمون دانکن برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد که نتایج در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین عملکرد محصول زیست‌توده را تیمار آبیاری کامل با کشت زود هنگام به میزان ۱۱/۷۳ تن در هکتار و کمترین عملکرد محصول مربوط به تیمار ۶۰ درصد آبیاری کامل با کاشت دیر هنگام به میزان ۷/۰۳ تن در هکتار بدست آمد.

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس زیست‌توده نهایی

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	Fs	Ft	
					٪۵	٪۱
تکرار	۲	۰/۷۹	۰/۳۹	۱/۴۴^{ns}	۶/۹۴	۱۸
عامل اصلی (تاریخ کاشت)	۲	۲۱/۰۵	۱۰/۵۲	۳۸/۵۵**	۶/۹۴	۱۸
خطای اصلی	۴	۱/۱۰	۰/۲۷	۲/۳۹^{ns}	۳/۲۶	۵/۴۱
عامل فرعی (آبیاری)	۲	۳۳/۸۴	۱۶/۶۲	۱۴۷/۶۲**	۳/۸۸	۶/۹۳
اثر متقابل	۴	۱/۵۶	۰/۳۸	۳/۳۳*	۳/۲۶	۵/۴۱
خطای فرعی	۱۲	۱/۳۸	۰/۱۲			
کل	۲۶	۵۹/۶۸				



شکل ۲- مقایسه میانگین عملکرد محصول زیست‌توده با استفاده از آزمون دانکن. علائم I1، I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده تیمارهای آبیاری کامل، ۸۰ و ۶۰ درصد آبیاری و علائم D1، D2 و D3 به ترتیب نشان‌دهنده تیمارهای تاریخ کاشت زود هنگام، بهنگام و دیر هنگام می‌باشند.

مقایسه مقادیر برآورد شده مدل آکواکرپ و اندازه‌گیری شده واقعی عملکرد محصول (زیست توده) محصول جو در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمارهای مختلف در جداول ۶ تا ۸ ارائه شده است. در هر سه جدول ملاحظه می‌شود، خطای مدل در اوایل دوره رشد به نسبت عملکرد محصول واقعی زیاد است ولی

Archive of SID

www.SID.ir

خطا از اواسط دوره تا آخر رشد ناچیز می‌شود و از آنجا که میزان برداشت محصول از نظر کشاورزی مهم است، نتایج مدل در آخر دوره رشد (برداشت نهایی محصول) حائز اهمیت است. لذا دقت برآورد مدل در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری مطلوب می‌باشد.

جدول ۶ - مقایسه نتایج مدل آکواکرپ و مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد محصول جو (زیست توده) در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمار آبیاری کامل

تیمار	روز پس از کاشت	عملکرد زیست‌توده (تن در هکتار)		خطای برآورد (تن در هکتار)
		اندازه‌گیری شد	برآورد شده	
زودهنگام	۵۰	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۱۹
	۱۲۶	۶/۸۱	۵/۶۷	۱/۱۳
	۱۶۲	۱۰/۷۸	۹/۶۶	۱/۱۳
	۱۸۱	۱۱/۳۲	۱۱/۲۱	۰/۱۰
	۱۹۳	۱۱/۷۳	۱۱/۲۸	۰/۴۵
کاشت به موقع	۶۰	۰/۳۶	۰/۵۲	۰/۱۶
	۱۲۳	۴/۴۹	۵/۱۱	۰/۶۲
	۱۵۶	۷/۵۶	۹/۲۰	۱/۶۴
	۱۷۷	۱۰/۳۷	۱۰/۶۳	۰/۲۶
	۱۹۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۰/۰۱
کاشت دیر هنگام	۹۶	۱/۱۰	۲/۲۵	۱/۱۵
	۱۱۶	۳/۴۳	۳/۷۶	۰/۳۳
	۱۵۵	۷/۹۰	۸/۲۹	۰/۳۹
	۱۷۶	۸/۸۴	۹/۱۹	۰/۳۴
	۱۸۴	۹/۰۳	۹/۱۹	۰/۱۵

جدول ۷ - مقایسه نتایج مدل آکواکرپ و مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد محصول جو (زیست توده) در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمار ۸۰٪ آبیاری

تیمار	روز پس از کاشت	عملکرد زیست‌توده (تن در هکتار)		خطای برآورد (تن در هکتار)
		اندازه‌گیری شده	برآورد شده	
زودهنگام	۵۰	۰/۳۳	۰/۵۲	۰/۱۹
	۱۲۶	۶/۰۱	۵/۵۰	۰/۵۱
	۱۶۲	۹/۰۵	۸/۵۹	۰/۴۶
	۱۸۱	۹/۴۷	۹/۸۸	۰/۴۱
	۱۹۳	۱۰/۳۳	۹/۹۲	۰/۴۰
کاشت به موقع	۶۰	۰/۳۶	۰/۵۲	۰/۱۶
	۱۲۳	۳/۹۸	۵/۱۰	۱/۱۲
	۱۵۶	۶/۸۹	۸/۴۸	۱/۵۹
	۱۷۷	۹/۰۵	۹/۴۹	۰/۴۴
	۱۹۴	۹/۳۵	۹/۴۹	۰/۱۴
کاشت دیر هنگام	۹۶	۰/۹۶	۲/۲۵	۱/۲۹
	۱۱۶	۲/۵۵	۳/۷۶	۱/۲۱
	۱۵۵	۶/۶۸	۷/۵۹	۰/۹۱
	۱۷۶	۷/۷۳	۸/۲۲	۰/۴۹
	۱۸۴	۷/۹۳	۸/۲۲	۰/۲۹

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۸ - مقایسه نتایج مدل آکواکرپ و مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد محصول جو (زیست توده) در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمار ۶۰٪ آبیاری

تیمار	روز پس از کاشت	عملکرد زیست‌توده (تن در هکتار)		خطای برآورد (تن در هکتار)
		اندازه‌گیری شده	برآورد شده	
زودهنگام	۵۰	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۲۶
	۱۲۶	۵/۱۲	۵/۱۱	۰/۰۱
	۱۶۲	۷/۶۰	۷/۱۱	۰/۴۹
	۱۸۱	۷/۸۰	۷/۵۷	۰/۲۳
	۱۹۳	۸/۴۰	۷/۵۹	۰/۸۱
کاشت به موقع	۶۰	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۱۵
	۱۲۳	۴/۵۵	۵/۰۰	۰/۴۵
	۱۵۶	۶/۱۸	۷/۰۰	۰/۸۱
	۱۷۷	۷/۴۹	۷/۱۸	۰/۳۲
	۱۹۴	۷/۷۵	۷/۱۸	۰/۵۸
کاشت دیر هنگام	۹۶	۰/۷۱	۲/۲۵	۱/۵۴
	۱۱۶	۲/۵۳	۳/۷۵	۱/۲۲
	۱۵۵	۶/۰۲	۶/۳۹	۰/۳۷
	۱۷۶	۶/۹۲	۶/۴۳	۰/۴۹
	۱۸۴	۷/۰۳	۶/۴۳	۰/۶۰

خلاصه نتایج آماری مدل Aqua Crop برای برآورد عملکرد محصول جو (زیست توده) در جدول ۹ ارائه شده است. تغییرات ضریب تعیین بین ۰/۸٦ تا ۰/۹۹ و متوسط آن ۰/۹٦ بدست آمده که نشان می‌دهد مدل Aqua Crop تا حدود ۹٦ درصد تغییرات عملکرد محصول را در شرایط مختلف کاشت، آبیاری کامل و کم-آبیاری شبیه‌سازی می‌کند. همین طور جذر میانگین خطا بین ۰/٤۱ تا ۰/۹٦ تن در هکتار تغییر می‌کند که متوسط این خطا حدود ۰/۷۷ تن در هکتار است. اگر این میزان خطا بر متوسط عملکرد محصول تیمارها (۹/۱۳ تن در هکتار) تقسیم شود، خواهیم داشت که درصد خطا حدود ۸/٤ درصد است.

جدول ۹ – خلاصه نتایج آماری مدل Aqua Crop برای برآورد عملکرد محصول جو (زیست توده)

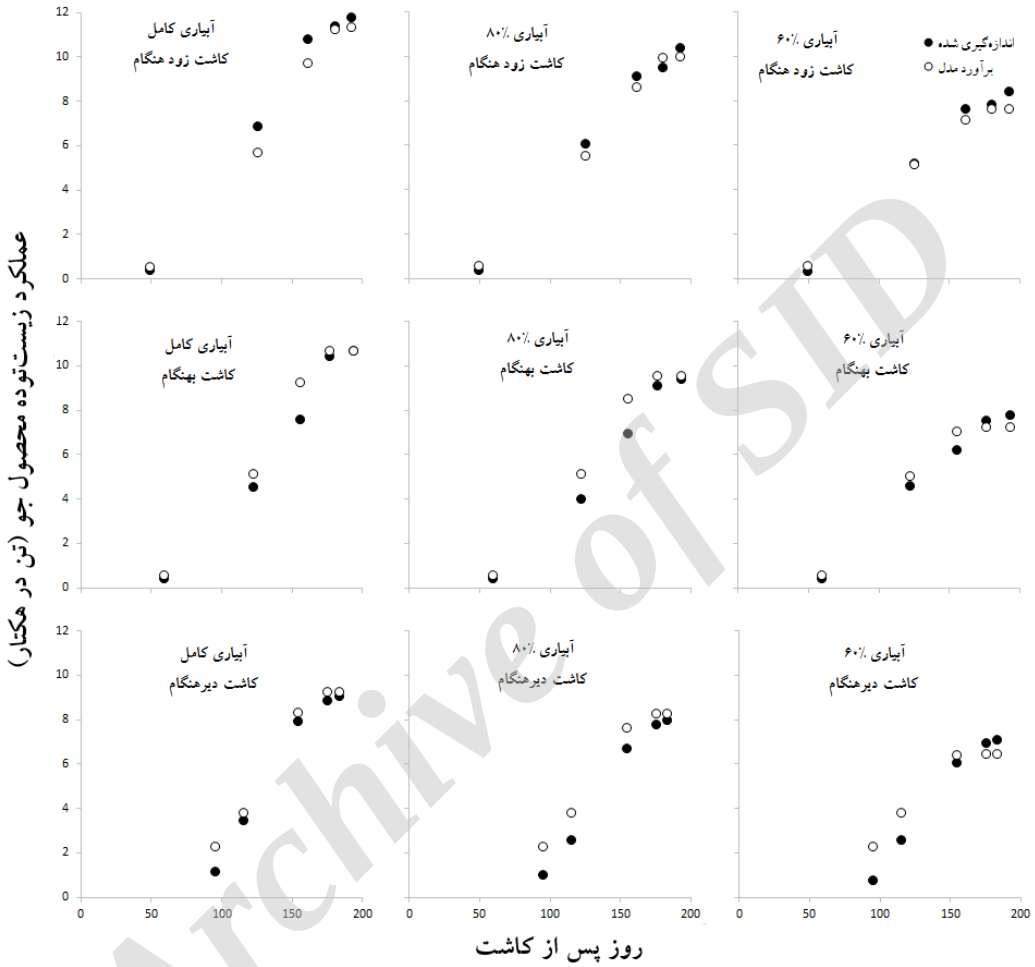
تیمار	عملکرد محصول (زیست‌توده)		R^2	RMSE (ton/ha)	MBE (ton/ha)
	اندازه‌گیری	برآورد مدل			
آبیاری کامل–کاشت زودهنگام	۱۱/۷۳	۱۱/۲۸	۰/۹۹	۰/۷۴۸	۰/۵۲۵
آبیاری ۸۰٪– کاشت زودهنگام	۱۰/۳۳	۹/۹۲	۰/۹۹	۰/۴۱۰	۰/۱۵۴
آبیاری ۶۰٪– کاشت زودهنگام	۸/۴۰	۷/۵۸	۰/۹۹	۰/۴۴۹	۰/۲۵۶
آبیاری کامل– کاشت بهنگام	۱۰/۶۳	۱۰/۶۴	۰/۹۸	۰/۷۹۸	-۰/۵۳۹
آبیاری ۸۰٪– کاشت بهنگام	۹/۳۵	۱۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۸۹۵	-۰/۶۸۸
آبیاری ۶۰٪– کاشت بهنگام	۷/۷۵	۷/۱۷	۰/۹۶	۰/۵۱۲	-۰/۱۰۴
آبیاری کامل–کاشت دیرهنگام	۹/۰۳	۹/۳۱	۰/۹۸	۰/۵۸۶	-۰/۴۷۴
آبیاری ۸۰٪– کاشت دیرهنگام	۷/۹۳	۸/۲۲	۰/۹۵	۰/۹۲۵	-۰/۸۳۷
آبیاری ۶۰٪– کاشت دیرهنگام	۷/۰۳	۶/۴۳	۰/۸۶	۰/۹۵۷	-۰/۴۰۸
متوسط	۹/۱۳	۸/۹۵	۰/۹۶	۰/۶۹۸	-۰/۲۳۵

این میزان خطا برای مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول در حد خوبی است و لذا این مدل با اطمینان مطلوبی می‌تواند برای شبیه‌سازی عملکرد محصول جو برای تقویم‌های مختلف کاشت و کم‌آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. متوسط انحراف خطا حدود ۰/۲٤- تن در هکتار برآورد شده است علامت منفی نشان دهنده این

Archive of SID

www.SID.ir

است که مدل بطور متوسط از نوع کم‌برآورد است و حدود ۲/۶ درصد عملکرد را کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند که مقدار ناچیزی است. شکل ۳ تغییرات زمانی عملکرد واقعی و برآورد شده مدل را برای تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد در تمام تیمارهای مورد بررسی این پژوهش، اختلاف بین مقادیر واقعی و برآورد شده مدل در روزهای اولیه پس از کاشت به نسبت زیاد ولی در اواخر رشد ناچیز می‌شود.



شکل ۳- تغییرات زمانی عملکرد محصول اندازه‌گیری و برآورد شده برای تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دقت مدل Aqua Crop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول جو در شرایط کم آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تهیه داده‌های لازم برای ارزیابی مدل سه تیمار آبیاری و سه تیمار تقویم زراعی مختلف در مزرعه کشاورزی پردیس ابوریحان در یک سال زراعی اجرا شد. زیست توده محصول در طول و انتهای دوره رشد اندازه گیری و به عنوان داده‌های مشاهده استفاده شدند . نتایج آزمون آماری نشان داد، عملکرد محصول (زیست توده) در تیمارهای فوق تفاوت معنی‌دار داشتند. نتایج آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل نشان داد که مدل Aqua Crop با دقت خوبی عملکرد محصول جو را در شرایط آبیاری کامل و کم-آبیاری شبیه‌سازی می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

فهرست منابع

۱. امیری‌تبار ر.، رحیمی‌خوب ع.، و بهبهانی م. ۱۳۹۳. مقایسه پارامترهای دمایی هوا و تبخیر تعرق مرجع در دو ایستگاه واقع در محدوده بایر و خوب آبیاری شده- منطقه مورد مطالعه اقلیم خشک جنوب‌شرق تهران. نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک. ۲۱(۱): ۲۷۰-۲۵۳.

۲. بابازاده ح.، و سرایی‌تبریزی م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل آکواکراپ تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۲): ۳۳۹-۳۲۹.

۳. حیدری‌نیا م.، ناصری ع.، برومندنسب س.، و مشک‌آبادی ب.س. ۱۳۸۹. کالیبراسیون مدل آکواکراپ در برنامه‌ریزی آبیاری پنبه در گرگان. سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی, دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.

٤. رحیمی‌خوب ح.، ستوده‌نیا ع.، و مساح‌بوانی ع. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل آکواکراپ برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۱): ۱۰۸-۱۱۵.

۵. علیزاده ح.، نظری ب.، پارسی‌نژاد م.، اعتدالی ه.، و جانباز ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل آکواکراپ در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ٤(۲): ۲۸۳-۲۷۳.

٦. کریمی ح، رحیمی‌خوب ع.، و نظری‌فر م. ۱۳۹۵. واسنجی و صحت سنجی مدل آکواکراپ برای جو در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب و خاک ایران. ٤۷ (۳): ۵۳۹-۵٤۹.

7. Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A. & Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (Hordeum vulgare). Agricultural Water Management 11, 1838- 1846.
8. Araya, A., Kisekka, I. & Holman, J. 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. Irrigation Science, 34(6), 465-481.
9. Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24. United Nations-Food and Agricultural Organization, Rome.
10. Farahani, H. J., Izzi, G., and Oweis, T.Y. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. Agronomy journal, 101(3), 469-476.
11. Heng,L.k., Hsiao,T.C., Evett,S., Howell,T and Steduto,P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agronomy Journal, 101(3), 488-498.
12. Hsiao, T.C., Steduto, P., Raes, D. & Fereres, E. 2009. AquaCrop: the FAO crop water model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agricultural Journal 101, 448-459.
13. Mabhaudhi T., Modi A.T. & Beletse Y.G. 2014. Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (Colocasia esculenta L. Schott) landrace. Agricultural and Forest Meteorology 192-193, 132–139.
14. Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A. and Rio, S. 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management. 135, 61–72.

Archive of SID

www.SID.ir

15. Patrignani, A. and Ochsner, T.E. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agronomy Journal, 107(6), 2312-2320.
16. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual Annexes. www.fao.org/nr/water/docs/aquacropv40annexes.pdf.
17. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D & .Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal 101, 426–437.
18. Tavakoli, A.R., Mahdavi Moghadam, M. and Sepaskhah, A.R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. Agricultural Water Management 161, 136-146.
19. Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.-T.A., Stöckle, C. & Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal 101, 509-21.

Archive of SID

www.SID.ir