نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳، ص. ۳۰ - ۲۱

Water Management in Agriculture
Vol. 1, No. 1, Spring and Summer 2014, p. 21 - 30

کاربرد مدل Aquacrop در شرایط کم آبیاری و مدیریت‌های مختلف کشت ذرت دانه‌ای تحت آبیاری قطره‌ای

وحیدرضا وردی‌نژاد[۱*]، مهران دوستی رضایی[۲]، سینا بشارت[۱]، حسین رضایی[۳] و جمال احمد آلی[۲]

چکیده

در این مطالعه مدل Aquacrop برای پیش‌بینی عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب محصول ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی میاندوآب، واسنجی و اعتبارسنجی شد. آزمایش مزرعه‌ای روی ذرت دانه‌ای رقم SC704 در قالب طرح کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، تحت سه تیمار آبیاری (آبیاری به میزان ۸۰، ۱۰۰ و۱۲۰ درصد نیاز آبی)، با سه تراکم کاشت (۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ هزار بوته در هکتار) و به صورت کشت‌های یک و دو ردیفه، تحت سیستم آبیاری قطره‌ای نواری طی سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ انجام گرفت. مدل بر اساس داده‌های سال ۱۳۸۴ واسنجی و سال ۱۳۸۵، اعتباریابی شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل Aquacrop به صورت مناسبی عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب را برای ذرت دانه‌ای پیش‌بینی می‌کند. مقدار NRMSE عملکرد و کارایی مصرف آب برای اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۱/۹۲ و ۱/۸۲ درصد و کارایی مدل‌سازی نش- ساتکلیف (EF) برای عملکرد دانه و کارایی مصرف آب برای اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۸۲/۵ و ۹۷/۷ درصد محاسبه شد که نشان دهنده مدل‌سازی با اعتبار مناسب و دقت بالا می‌باشد. مدل Aquacrop براساس ضرایب واسنجی شده این مطالعه، برای اعمال مدیریت‌های مختلف آبیاری و تراکم‌های مختلف و نوع کشت (یک و دو رویفه) ذرت دانه‌ای قابل استفاده و کاربرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، تراکم کشت، کم‌آبیاری، ذرت دانه‌ای، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

ذرت از غلات عمده مناطق مرطوب و نیمه مرطوب گرمسیری است، لیکن به دلیل قدرت سازگاری بالا، کشت آن در مناطق سردسیر نیز میسر شده است (Ulger *et al.*, 1997). برای دستیابی به تولید مطلوب در زراعت ذرت با توجه به نیاز آبی بالا، استفاده بهینه از منابع محدود آب امری اجتناب‌ناپذیر است و لذا بهبود کارایی مصرف آب مبتنی بر تولید بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی بسیار با اهمیت است (احمد آلی، ۱۳۸۸). برای دست‌یابی به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است. در این خصوص استفاده از مدل‌های توسعه یافته توسط فائو که توانایی شبیه‌سازی اثرات مقادیر مختلف آب روی عملکرد محصول را به صورت کمی دارند، ضروری به نظر می‌رسد. این مدل‌ها علاوه بر کاهش زمان و هزینه‌های تحقیقاتی، امکان توسعهٔ یافته‌ها و نتایج را برای شرایط آزمایش نشده در مزرعه فراهم می‌آورند و در نتیجه توصیه‌های عملی، برای کشاورزان و کسانی که به طور گسترده روی برنامه‌ریزی کم آبیاری تحت شرایط مختلف تامین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نمایند (بابازاده و تبریزی، ۱۳۹۱). نخستین مدل‌های رشد محصول که اغلب مورد استفاده محققین کشاورزی بود، در دهه ۱۹۷۰ و مدل‌های زمان‌بندی آبیاری، کنترل بیماری‌ها و آفات در اوایل دهه ۱۹۸۰ ظهور پیدا کردند (De Wit *et al.*, 1970). بیشتر مدل‌های گیاهی به دلیل نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی، داده‌های ورودی زیاد و همچنین دامنه وسیع تغییر پارامترهای ورودی، به کاربر ماهر نیاز دارند. نشریه ۳۳ فائو در حدود ۲۲ سال مرجع اصلی برآورد و تحلیل واکنش محصولات کشاورزی به مقدار آب مصرفی بود. به طوری که با پیشرفت علم روابط آب، خاک و گیاه در دو دهه اخیر، لزوم بازنگری

۱- استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: verdinejad@gmail.com)
۲- پژوهشگران مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان‌غربی
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۳۰

در این تئوری از طرف سازمان فائو احساس و منجر به طراحی مدل جدیدی به نام مدل Aquacrop شد که این مدل با حفظ قابلیت‌های نشریه ۳۳، یک توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده را بر قرار نمود. مفاهیم پایه‌ای، اصول اساسی و ویژگی‌های Aquacrop توسط استدیو و همکاران و جزئیات ساختاری و الگوریتم‌ها توسط رایز و همکاران ارائه شده است (Raes *et al*., 2009; Steduto *et al*., 2009). تفکیک تبخیر و تعرق به دو مولفه تبخیر از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی با استفاده از معادله ریچی، در نظر گرفتن پوشش تاجی که سطح زمین را می‌پوشاند، به جای شاخص سطح برگ، کاربرد شاخص بهره‌وری به جای ضریب کاهش نسبی و شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاهی در گام زمانی روزانه از عمده مزیت‌های قابل ملاحظه در مدل Aquacrop است (Ritchie, 1972). در مدت کوتاهی پس از تولید این مدل در سال ۲۰۰۷ توسط فائو، تحقیقات وسیعی در خارج و داخل کشور در این خصوص انجام گردیده است. هاشیو و همکاران نشان دادند که مدل Aquacrop به صورت مناسبی پوشش تاجی، رشد وزنی زیست توده بخش هوائی و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد با تراکم، تاریخ کاشت و نیاز تعرقی مختلف در تیمارهای متفاوت آبیاری (اعمال تنش تا سنبله دهی، از زمان سنبله دهی به بعد، آبیاری یک در میان و آبیاری کامل) شبیه‌سازی می‌کند (Hsiao *et al*., 2009). هنگ و همکاران (Heng *et al*., 2009) برای سه شرایط آب و هوایی، نیمه خشک، باد شدید همراه با تبخیر و تعرق زیاد و آب و هوای بارانی با خاک شنی مدل Aquacrop را روی محصول ذرت اعتباریابی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مدل توانایی شبیه‌سازی آب مصرفی گیاه تحت شرایط آب و هوایی مختلف را به صورت قابل قبولی دارد و مدل رشد بیوماس، دانه و پوشش گیاهی را در شرایط بدون تنش و تنش متوسط به صورت خوب شبیه‌سازی می‌کند. لیکن، برای تیمارهای با تنش آبی شدید مخصوصا وقتی تنش در مراحل حساس رشد گیاه اتفاق بیفتد، مدل نمی‌تواند این پارامترها را به صورت رضایت بخش شبیه‌سازی نماید. تودورویک و همکاران (Todorovic et al., 2009)، CropSyst و WOFOST را با مدل Aquacrop در منطقه حاره‌ای مدیترانه در جنوب ایتالیا در کشت آفتابگردان تحت سه رژیم مختلف آبیاری مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل Aquacrop علاوه بر اینکه نسبت به دو مدل دیگر نیاز به داده‌های ورودی کم دارد، مقدار بیوماس و عملکرد را مشابه آنها شبیه‌سازی می‌کند طی تحقیقی در نجف آباد اصفهان، مدل Aquacrop برای ذرت علوفه‌ای ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل عملکرد را برای آبیاری کامل و تنش‌های کم به طور مناسب شبیه‌سازی می‌کند، اما در تنش‌های زیاد (۶۰ درصد نیاز آبی)، مدل کمتر رضایت بخش بود (Salemi et al., 2011). بابازاده و تبریزی (۱۳۹۱) در منطقه کرج نشان دادند که مدل Aquacrop در شبیه-سازی عملکرد سویا، تبخیر و تعرق و کارآیی مصرف آب سویا عملکرد مناسب دارد. همچنین مقادیر ضریب آنالیز حساسیت نشان داد که ورودی‌های مدل به زمان سبز شدن بذرها، رطوبت اولیه خاک و عمق آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل هیچ حساسیتی ندارد. هدف از این تحقیق واسنجی و اعتبارسنجی مدل Aquacrop در مدیریت کم آبیاری ذرت دانه‌ای با تراکم‌های کشت مختلف در منطقه میاندوآب براساس اطلاعات مزرعه‌ای می‌باشد. تراکم‌های مختلف کشت و نوع کشت (یک ردیفه یا دو ردیفه) از مواردی است که در مدل‌سازی با Aquacrop مطالعه نشده است.

مدل Aquacrop

در مدل Aquacrop، تعرق روزانه (Tr_i) با استفاده از ETo_i روزانه، غلظت CO_2 اتمسفر و بهره‌وری آب (WP*) نرمال شده به وزن قسمت هوایی گیاه B_i تبدیل می‌شود. معادله زیر بیان ریاضی این رابطه و معادله اصلی مدل می‌باشد:

$$B_i = WP^* \times \sum_{i=1}^{n} (Tr_i / ETo_i) \qquad (۱)$$

که در آن WP* بهره‌وری آب است که با نرمال کردن آن برای شرایط اقلیمی متفاوت مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود. برتری معادله مورد استفاده در مدل Aquacrop این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن به صورت روزانه است و در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه‌ی ریشه از طریق بیلان آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) شبیه‌سازی می‌شود. شدت ضرایب تنش آبی موثر بر توسعه پوشش تاجی (CC) ، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. به علاوه برخی جنبه‌های مدیریتی آبیاری و زراعی از طریق تاثیراتی که بر توسعه ریشه گیاه، بهره‌وری آب و تعدیل محصول به تنش دارند، بیان می‌شوند. در نهایت مقدار عملکرد محصول با استفاده از جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌گردد. مهمترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارتند از حداکثر و حداقل دمای روزانه، بارش روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) و میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر که مدل برای CO_2، مقدار ۳۶۹/۴۶

قسمت در میلیون حجمی را به عنوان مرجع در نظر می‌گیرد. سیستم گیاهی مدل Aquacrop از پنج جزء پاسخ‌های دینامیکی فنولوژیکی، کانوپی، عمق ریشه‌زنی، تولید ماده خشک و عملکرد اقتصادی تشکیل شده است. Aquacrop سه نوع محصولات اصلی: گیاهان میوه‌ای یا دانه‌ای، گیاهانی که از ریشه و غده‌ی آن‌ها استفاده اقتصادی می‌شود و گیاهانی که از برگ آن‌ها استفاده می‌شود (سبزیجات) را بر اساس عملکرد تشخیص می‌دهد. در Aquacrop داده‌های گیاهی ورودی به مدل شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای اکثر گیاهان زراعی به عنوان پیش فرض، در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب واسنجی شده‌اند و برای کاربرد آنها در شرایط وجود تنش آبی از طریق تاثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شوند. این پارامترها برای گونه‌های زراعی مهم (مانند سیب‌زمینی، گندم، ذرت، برنج و پنبه) وجود دارد. پارامترهای مربوط به مکان و ویژه گیاه در طرح از جمله تاریخ جوانه‌زنی و تاریخ ظهور پوشش تاجی (تاریخی که در آن ۹۰ درصد بذرها سبز می‌شوند)، تراکم کشت، زمان ماکزیمم پوشش گیاهی، زمان پیری، زمان بلوغ کامل، زمان شروع گلدهی، مدت گلدهی و عمق ریشه تحت عنوان پارامترهای مخصوص کاربر می‌باشند. همچنین مدیریت آبیاری و همه پارامترهای مربوط به مکان در گروه پارامترهای مخصوص کاربر طبقه‌بندی می‌شوند. مؤلفه مدیریت به دو گروه اصلی مدیریت آب و مدیریت مزرعه طبقه‌بندی می‌شود. موتور محرک رشد در Aquacrop، آب بوده و آب مصرفی توسط گیاه بر اساس دور آبیاری در طول فصل رشد به مدل داده می‌شود. مدیریت‌های مزرعه گزینه‌های مربوط به سطح حاصلخیزی را در طی شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد. اقدامات مربوط به سطح خاک مانند مالچ‌دهی برای کاهش تبخیر و یا استفاده از پشته برای کنترل رواناب و نفوذ نیز در مدل در نظر گرفته شده است. مؤلفه خاک در مدل به صورت یک سیستم پراکنده تا ۵ لایه می‌تواند باشد. در پروفیل خاک ناحیه ریشه، مدل یک توازن آب، که در برگیرنده رواناب، نفوذ، توزیع مجدد، نفوذ عمقی، صعود کاپیلاری، جذب و تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرد. در فواصل زمانی روزانه بیلان آب خاک و آب ذخیره شده در خاک شبیه‌سازی می‌شود (Heng *et al.*, 2009).

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای روی ذرت دانه‌ای رقم سینگل گراس ۷۰۴ طی دو سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی میاندوآب، تحت مدیریت‌های مختلف تراکم کشت، نوع کشت (یک و دو ردیفه) و تحت آبیاری قطره‌ای انجام شد. از داده‌های سال اول برای واسنجی و سال دوم جهت اعتباریابی مدل استفاده شد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای تخمین روزانه تبخیر و تعرق گیاه مرجع، از ایستگاه هواشناسی میاندوآب، جمع‌آوری شد. ایستگاه تحقیقات کشاورزی میاندوآب در جنوب شرقی استان آذربایجان‌غربی واقع و بر اساس اطلاعات هواشناسی طولانی مدت منطقه، متوسط بارندگی منطقه ۲۸۰ میلی‌متر در سال و بر اساس شاخص دومارتن جزء منطقه خشک محسوب می‌شود. آزمایش مزرعه‌ای، در قالب طرح کرت‌های نواری خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در کرت‌های عمودی چهار تیمار آبیاری شامل سه سطح ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی با استفاده از آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) و در کرت‌های افقی آرایش کاشت به صورت کشت یک و دو ردیفه با فاصله جوی و پشته‌های ۷۵ سانتی‌متری و تراکم در سه سطح ۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ هزار بوته در هکتار به صورت اسپلیت پلات قرار گرفتند (فاصله بوته‌ها روی ردیف‌ها و برای هر کدام از تراکم‌های فوق به ترتیب برای کشت یک و دو ردیفه برابر (۱۷/۷، ۳۵/۵)، (۱۴/۸، ۲۹/۶) و (۱۲/۷، ۲۵/۴) سانتی‌متر بود. در این تحقیق سه نمونه خاک مرکب جهت تعیین توصیه کودی تهیه شد. مقدار کوددهی به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در دو نوبت (۱۵۰ کیلوگرم در هنگام کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در زمان ۷ برگی) و مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات تریپل در هنگام کاشت به زمین آزمایش داده شد. شوری آب آبیاری ۱/۷۵ میلی موس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. تاریخ کاشت در هر دو سال زراعی ۲۹ اردیبهشت ماه بود که پس از رسیدن محصول در نیمه اول مهر هر سال، از دو خط وسط یک نمونه ۶ متر مربعی (۱/۵×۴) تهیه و عملکرد محصول اندازه‌گیری شد. عملکرد بر اساس جداسازی دانه‌های خشک ذرت و وزن دانه‌ها با واحد کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. بافت خاک محل آزمایش لوم سیلتی بوده و نتایج تجزیه خاک مزرعه آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های دمای روزانه و مقدار بارندگی روزانه از کاشت تا برداشت، از ایستگاه هواشناسی میاندوآب، جمع آوری شد. تاریخ و عمق آب مصرف‌شده در هر یک از تیمارهای آبیاری در سال اول آزمایش، در جدول ۲ و پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی گندم برای سال اول آزمایش (پارامترهای واسنجی مدل) مطابق جدول ۳، ارائه شده است. جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از نرم افزار ETcalculator استفاده شد که اساس آن روش فائو- پنمن- مانتیس می‌باشد.

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک مزرعه آزمایش در ایستگاه میاندوآب

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی
۰-۳۰	لوم سیلتی	۱/۳۴	۰/۲۵	۰/۱۱
۳۰-۶۰	لوم سیلتی	۱/۳۸	۰/۲۴	۰/۱۰
۶۰-۹۰	لوم سیلتی	۱/۴۸	۰/۲۶	۰/۰۸۲

شاخص‌های ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل، شاخص‌های ارزیابی مدل به‌کار گرفته شد. این شاخص‌ها شامل ضریب تبیین: R^2، ریشهٔ میانگین مربعات خطا: RMSE، ریشهٔ میانگین مربعات خطا نرمال شده: NRMSE، معیار کارایی مدل: EF و شاخص سازگاری: d هستند. NRMSE کمتر از۱۰ درصد نشان دهنده مدلسازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد نشان دهنده عدم اطمینان از مدل می‌باشد. مقدار EF بین $\infty-$ تا ۱ متغیر و هر چه به یک نزدیک باشد، مدل کارآتر و مقدار منفی ضعف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

بر اساس اندازه‌گیری‌های به عمل آمده در سال اول آزمایش، فایل‌های مربوط به پارامترهای اقلیمی، گیاهی، خصوصیات خاک و شرایط اولیه برای محصول ذرت تهیه و تنظیم شد، سپس مدل با استفاده از مقادیر آب آبیاری در تیمارهای مختلف و با تغییر در پارامترهای گیاهی به‌طوری‌که برای عملکرد و کارآیی آب مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، اختلاف حداقل باشد، واسنجی شد. عملکرد و کارایی مصرف آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی توسط مدل در مرحلهٔ واسنجی در تیمارهای مختلف، مطابق شکل ۱ می‌باشد. ضرایب تبیین برای عملکرد و کارایی مصرف آب به ترتیب ۹۲/۳ و ۹۹/۵ درصد و ریشهٔ میانگین مربعات خطا برای آنها به ترتیب ۰/۱۵۹ تن در هکتار و ۰/۰۱۹ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل به منظور واسنجی مدل در جدول ۴ ارائه شده است. براساس جدول، ملاحظه می‌شود که شاخص‌های ارزیابی، مقدار قابل قبولی قرار دارند. NRMSE کمتر از ده درصد و قرار گرفتن ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری یک درصد، حکایت از این دارد که مدل با استفاده از پارامترهای گیاهی (پارامترهای جدول ۳) به طور مناسبی واسنجی و می‌توان برای اعتباریابی مدل به‌کار گرفت.

جدول ۲- عمق آب آبیاری در تیمارهای مختلف در سال ۱۳۸٤ طی روزهای مختلف پس از کشت (برحسب میلی‌متر)

روز پس از کاشت	تیمار (درصد)			روز پس از کاشت	تیمار		
	۸۰	۱۰۰	۱۲۰		۸۰	۱۰۰	۱۲۰
۱	۷/۴۲	۹/۲۸	۱۱/۱۴	۷۳	۱۹/۴۹	۲۴/۳۶	۲۹/۲۳
۴	۵/۷۳	۱۷/۷	۸/۶۰	۷۶	۱۹/۹۷	۲۴/۹۶	۲۹/۹۵
۷	۶/۵۳	۸/۱۷	۹/۸۰	۷۹	۱۹/۵۲	۲۴/۴۱	۲۹/۲۹
۱۰	۷/۶۰	۹/۵۰	۱۱/۴۰	۸۲	۱۹/۸۳	۲۴/۷۹	۲۹/۷۵
۱۳	۷/۸۲	۹/۷۸	۱۱/۷۳	۸۵	۲۰/۲۴	۲۵/۳۰	۳۰/۳۶
۱۶	۶/۵۸	۸/۲۲	۹/۸۷	۸۸	۱۷/۸۹	۲۲/۳۶	۲۶/۸۳
۱۹	۷/۴۲	۹/۲۸	۱۱/۱۳	۹۱	۱۹/۳۲	۲۴/۱۵	۲۸/۹۸
۲۲	۸/۱۳	۱۰/۱۷	۱۲/۲۰	۹۴	۲۰/۰۴	۲۵/۰۴	۳۰/۰۵
۲۵	۸/۴۴	۱۰/۵۶	۱۲/۶۷	۹۷	۱۹/۲۲	۲۴/۰۲	۲۸/۸۳
۲۸	۹/۰۷	۱۱/۳۳	۱۳/۶۰	۱۰۰	۱۷/۹۹	۲۲/۴۹	۲۶/۹۹

ادامه جدول ۲- عمق آب آبیاری در تیمارهای مختلف در سال ۱۳۸٤ طی روزهای مختلف پس از کشت (برحسب میلی‌متر)

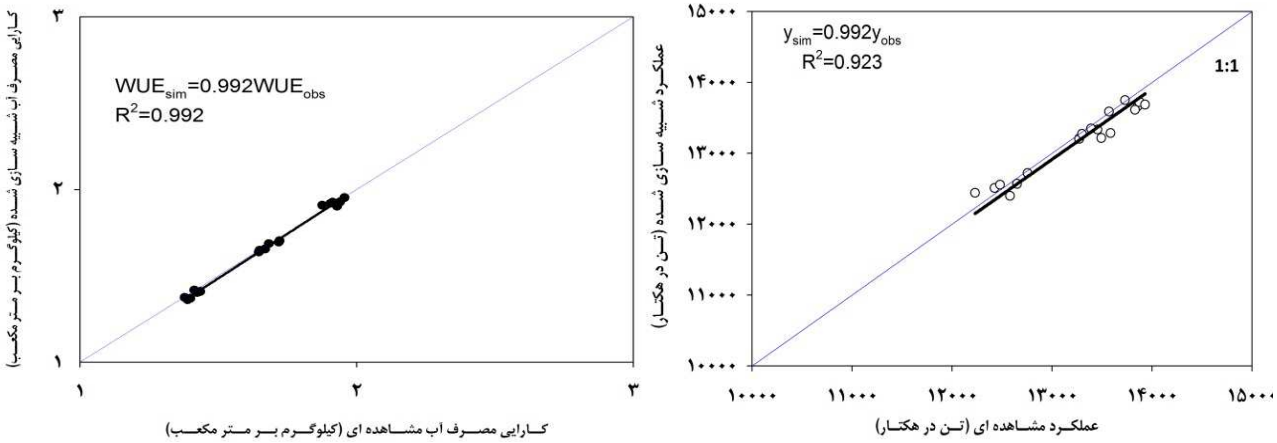
روز پس از کاشت	تیمار			روز پس از کاشت	تیمار		
	٪۸۰	٪۱۰۰	٪۱۲۰		٪۸۰	٪۱۰۰	٪۱۲۰
۳۱	۹/۲۴	۱۱/۵۶	۱۳/۸۷	۱۰۳	۱۷/۹۹	۲۲/۴۹	۲۶/۹۹
۳۴	۸/۷۱	۱۰/۸۹	۱۳/۰۷	۱۰۶	۱۵/۴۴	۱۹/۲۹	۲۳/۱۵
۳۷	۹/۴۰	۱۱/۷۵	۱۴/۱۰	۱۰۹	۱۶/۷۶	۲۰/۹۶	۲۵/۱۵
۴۰	۹/۸۶	۱۲/۳۲	۱۴/۷۹	۱۱۲	۱۵/۰۳	۱۸/۷۸	۲۲/۵۴
۴۳	۹/۵۴	۱۱/۹۳	۱۴/۳۲	۱۱۵	۱۴/۷۲	۱۸/۴۰	۲۲/۰۸
۴۶	۱۱/۴۹	۱۴/۳۷	۱۷/۲۴	۱۱۸	۱۶/۳۶	۲۰/۴۴	۲۴/۵۳
۴۹	۱۳/۷۱	۱۷/۱۴	۲۰/۵۷	۱۲۱	۱۴/۳۶	۱۷/۹۵	۲۱/۵۵
۵۲	۱۳/۱۱	۱۶/۳۸	۱۹/۶۶	۱۲۴	۱۴/۵۶	۱۸/۲۱	۲۱/۸۵
۵۵	۱۳/۵۸	۱۶/۹۷	۲۰/۳۷	۱۲۷	۱۲/۶۹	۱۵/۸۶	۱۹/۰۳
۵۸	۱۶/۷۶	۲۰/۹۶	۲۵/۱۵	۱۳۰	۱۲/۴۸	۱۵/۶۰	۱۸/۷۲
۶۱	۱۷/۱۷	۲۱/۴۷	۲۵/۷۶	۱۳۳	۱۱/۳۲	۱۴/۱۵	۱۶/۹۸
۶۴	۱۷/۵۸	۲۱/۹۸	۲۶/۳۷	۱۳۶	۷/۶۵	۹/۵۷	۱۱/۴۸
۶۷	۱۷/۶۶	۲۲/۰۸	۲۶/۵۰	۱۳۹	۷/۲۶	۹/۰۸	۱۰/۹۰
۷۰	۱۹/۵۸	۲۴/۴۸	۲۹/۳۸	۱۴۲	۵/۰۶	۶/۳۳	۷/۵۹

جدول ۳- پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی ذرت در سال۱۳۸٤ (اندازه‌گیری شده، واسنجی شده و یا پیش فرض مدل)

پارامتر	مقدار	منابع پارامترها
تراکم کاشت	۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ هزار بوته در هکتار	اندازه‌گیری شد
زمان ظهور جوانه‌ها	۶ روز بعد از کاشت	اندازه‌گیری شد
زمان حداکثر پوشش گیاهی	۵۴ روز بعد از کاشت	اندازه‌گیری شد
زمان پیری	۱۲۰ روز بعد از کاشت	اندازه‌گیری شد
زمان بلوغ کامل	۱۴۸ روز بعد از کاشت	اندازه‌گیری شد
زمان شروع گلدهی	۶۰ روز بعد از کاشت	اندازه‌گیری شد
مدت گلدهی	۱۳ روز	اندازه‌گیری شد
حداکثر عمق ریشه	۶۵ سانتی‌متر	اندازه‌گیری شد
سرعت متوسط توسعه ریشه	۰/۴ سانتی‌متر در روز	پیش فرض مدل
حداقل دمای رشد (پایه)	۸ درجه سانتی‌گراد	پیش فرض مدل
حداکثر دمای رشد	۳۰ درجه سانتی‌گراد	پیش فرض مدل
شاخص برداشت	۴۸ درصد	واسنجی شد
بهره‌وری آب نرمال شده (*WP)	۳۳/۷ گرم بر مترمربع	پیش فرض مدل
ضریب رشد توسعه پوشش گیاهی (CGC)	۱۵/۲ درصد بر روز	واسنجی شد
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	۸/۹ درصد بر روز	واسنجی شد
ضریب آستانه بالای تنش آبی برای گسترش	۰/۱۴	واسنجی شد
ضریب آستانه پایین تنش آبی برای گسترش	۰/۷۲	واسنجی شد
ضریب آستانه بالای تنش آبی برای بسته شدن	۰/۶۶	واسنجی شد
ضریب آستانه بالای تنش آبی برای پیری	۰/۶۵	واسنجی شد
ضریب تعرق گیاه در ۱۰۰ درصد تعرق (K_{cb})	۱/۰۳	پیش فرض مدل

اعتبارسنجی مدل

از هیچ مدل نمی‌توان پیش‌بینی‌های کامل و دقیقی را انتظار داشت و دقت مدل همیشه به صورت نسبی مطرح است. برای رسیدن به نتایج مورد انتظار و اینکه آیا مدل رضایت بخش است یا خیر، ارزیابی دقت مدل ضروری است. مدل با استفاده از داده‌های اقلیمی و آبیاری انجام شده در سال دوم آزمایش و بدون تغییر پارامترهای گیاهی، اعتباریابی شد. شاخص‌های اعتبارسنجی مدل برای سال دوم کشت، مطابق جدول ۵ می‌باشد. ضریب تبیین پیش‌بینی عملکرد و کارآیی مصرف آب به منظور اعتباریابی مدل به ترتیب ۷۹/۳ و ۹۸/۱ درصد به دست آمد. RMSE عملکرد و کارآیی مصرف آب ۰/۲۵۶ تن در هکتار و ۰/۰۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. مقدار NRMSE برای عملکرد و کارآیی مصرف آب کمتر از ۱۰ درصد نیز، نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی تیمارهاست. همچنین شاخص سازگاری (d) نزدیک به ۱ بوده که نشان دهنده سازگاری روند کاهش عملکرد و کارآیی مصرف آب با مقدار آب آبیاری در مدل با مقادیر واقعی می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل قابلیت تعمیم‌دهی و پاسخ مناسب در شرایط جدید را دارد. در شکل ۲ عملکرد و کارآیی مصرف آب مشاهده و شبیه‌سازی شده در اعتبارسنجی مدل مقایسه شده است.



شکل ۱- مقایسه مقادیر عملکرد و کارآیی مصرف آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل طی سال ۱۳۸٤ (واسنجی مدل)

جدول ٤- شاخص‌های آماری ارزیابی به منظور واسنجی مدل بر اساس داده‌های سال ۱۳۸٤

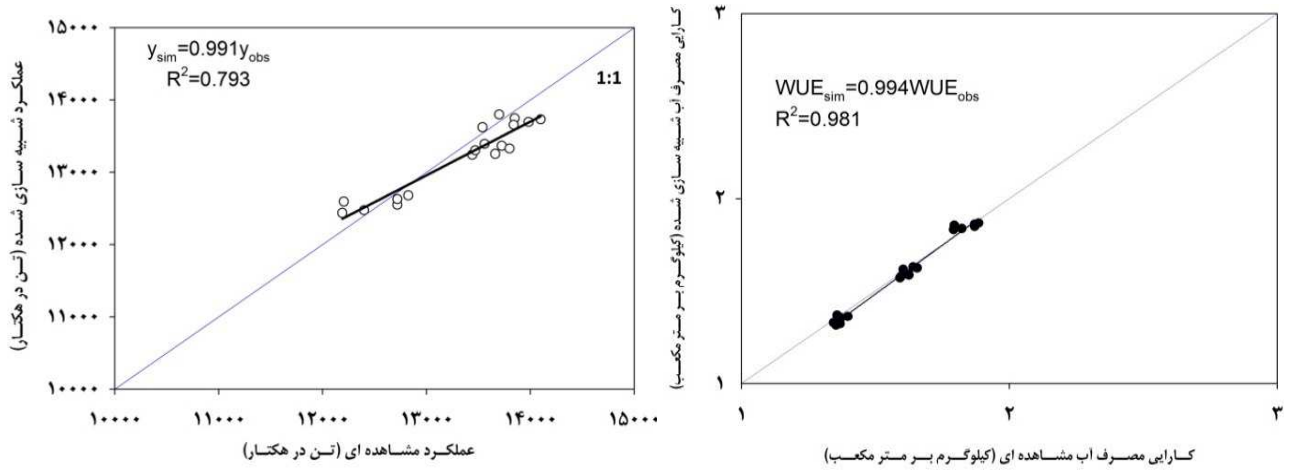
شاخص	R^2 (درصد)	RMSE (*)	NRMSE (درصد)	EF (-)	d (-)
عملکرد	۹۲/۳	۰/۱۵۹	۱/۹۹	۰/۹۱۷	۰/۹۷۶
کارایی مصرف آب	۹۹/۵	۰/۰۱۹	۱/۱۳۵	۰/۹۹۲	۰/۹۹۸

* برای عملکرد بر حسب تن بر هکتار و برای کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۵- شاخص‌های آماری ارزیابی به منظور اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های سال ۱۳۸۵

شاخص	R^2 (درصد)	RMSE (*)	NRMSE (درصد)	EF (-)	d (-)
عملکرد	۷۹/۳	۰/۲۵۶	۱/۹۲	۰/۸۲۵	۰/۹۴۵
کارایی مصرف آب	۹۸/۱	۰/۰۲۹	۱/۸۲	۰/۹۷۷	۰/۹۹۴

* برای عملکرد بر حسب تن بر هکتار و کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب



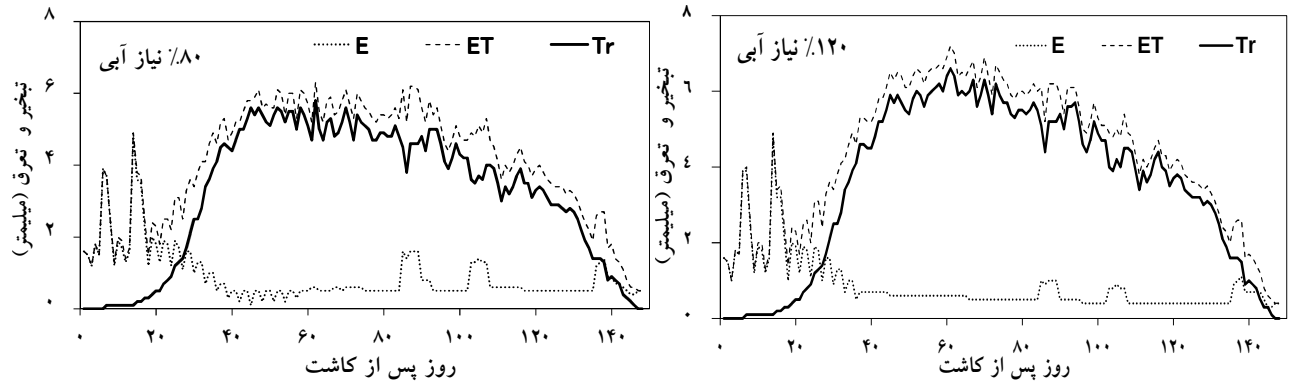
شکل ۲- مقایسه مقادیر عملکرد و کارآیی مصرف آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل طی سال ۱۳۸۵ (اعتبارسنجی مدل)

اجزای تبخیر و تعرق

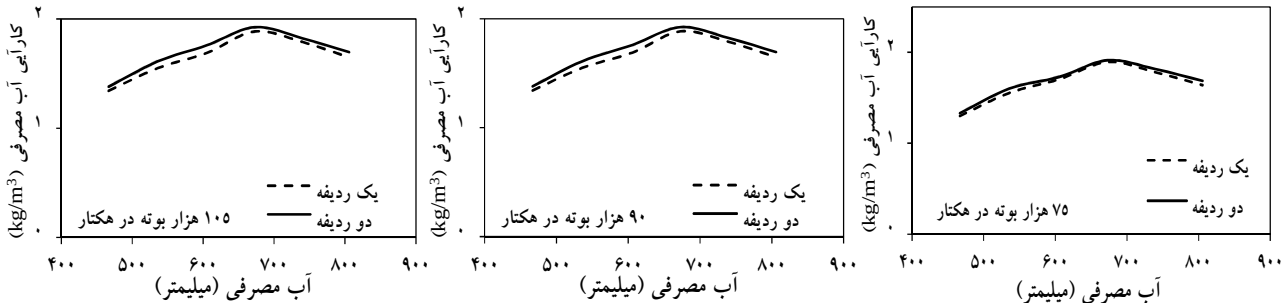
تبخیر و تعرق به صورت مجزا از خروجی‌های مدل بوده و مقادیر تبخیر (E)، تعرق (Tr) و تبخیر و تعرق (ET) برای دو تیمار آبیاری (۸۰ و ۱۲۰ درصد)، کشت یک ردیفه و تراکم ۹۰ هزار بوته در هکتار در شکل ۳ آورده شده است. تبخیر از سطح خاک در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی، بیشتر از تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی و در این تیمار نیز بیشتر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی می‌باشد و علت آن را می‌توان در کاهش میزان بیوماس در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و افزایش رطوبت و ماندگاری آن در سطح خاک برای تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی بیان نمود. به همین دلیل، در صورت اعمال کم آبیاری پیشنهاد می‌شود از مالچ پاشی برای کاهش میزان تبخیر از سطح خاک استفاده شود. مقادیر فصلی E در تراکم ۹۰ هزار بوته در هکتار و کشت یک ردیفه، برای سه تیمار۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی، به ترتیب ۱۳۵/۴، ۱۲۱/۴ و ۱۲۶/۳ میلی‌متر به دست آمد. مقادیر فصلی ET در تراکم ۹۰ هزار بوته در هکتار و کشت یک ردیفه، برای سه تیمار۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی، به ترتیب ۶۰۸/۳، ۶۴۴/۱ و ۶۴۹/۷ میلی‌متر حاصل شد. Tr فصلی در شرایط مشابه فوق‌الذکر و برای سه تیمار فوق نیز به ترتیب ۴۷۲/۴، ۵۲۲/۴ و ۵۲۴/۳ میلی‌متر به دست آمد.

سناریوهای کم آبیاری

سناریوهای کم آبیاری در کل دوره رشد برای کشت یک ردیفه و دو ردیفه و برای مقادیر مختلف آبیاری شامل ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۹۰، ۱۱۰، ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۵۰ درصد نیاز آبی وارد مدل شد. نتایج سناریوهای کم آبیاری مربوط به کشت یک ردیفه و دو ردیفه و برای تراکم‌های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. برای تیمارهای دو ردیفه با تراکم کشت ۷۵ هزار بوته در هکتار با کاهش عمق آبیاری، کارآیی مصرف آب تا ۸۰ درصد نیاز آبیاری افزایش داشته و از آن به بعد سیر نزولی پیدا کرده است. مطابق شکل ۴، آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبیاری با کارآیی مصرف آب ۱/۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب نسبت به سایر تیمارها از ارجحیت برخوردار است. برای تیمارهای دو ردیفه با تراکم کشت۹۰ هزار بوته در هکتار با کاهش عمق آبیاری، کارآیی مصرف آب تا ۸۰ درصد نیاز آبیاری افزایش داشته و از آن به بعد سیر نزولی پیدا کرده است. برای این شرایط آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبیاری با کارآیی مصرف آب ۱/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب، شرایط بهینه دارد. برای تیمارهای دو ردیفه با تراکم کشت ۱۰۵ هزار بوته در هکتار حداکثر کارآیی مصرف آب ۱/۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب و مربوط به آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی می‌باشد. با وجود اختلاف کم کارایی مصرف آب، بین تیمار یک و دو ردیفه و با توجه به شکل ۴، می‌توان بیان کرد که کشت دو ردیفه نسبت به یک ردیفه از کارایی مصرف آب بالایی برخوردار است.



شکل ۳- روند تغییرات تبخیر و تعرق، تعرق و تبخیر از سطح خاک در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰درصد نیاز آبی



شکل ٤- تغییرات کارآیی مصرف آب طی سناریوهای مختلف کم آبیاری در تراکم‌های کشت مختلف

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از واسنجی مدل با نتایج حاصل از واسنجی مدل برای محصول ذرت توسط هاشیو و همکاران (Hsiao *et al*., 2009) همخوانی دارد و فقط در ضرایب تنش آبی با توجه به نوع رقم به طور خیلی جزئی تفاوت نشان داد. نتایج اعتباریابی مدل نیز مانند نتایج سایر محققان، نشان داد که مدل توانایی لازم برای پیش‌بینی عملکرد و کارآیی مصرف آب در شرایط بدون تنش و تنش‌های متوسط آبی را روی محصول ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در تراکم‌های مختلف و به صورت کشت یک و دو ردیفه را دارد. واسنجی و اعتباریابی مدل Aquacrop برای هر محصول در شرایط آب و هوایی مختلف ضروری می‌باشد. سادگی مدل Aquacrop، نیاز به اطلاعات ورودی کم نسبت به سایر مدل‌ها و داشتن درجه دقت کافی، آن را به عنوان مدلی مفید و راهکاری کم هزینه و سریع جهت بهسازی کارآیی مصرف آب، معرفی می‌کند. کشت دو ردیفه نسبت به یک ردیفه از کارایی مصرف آب بالایی برخوردار است. حداکثر کارایی مصرف آب (برای هر دو مدیریت کشت: یک و دو ردیفه و تراکم بوته)، در سطح آبیاری تامین ۸۰ درصد نیاز آبی حاصل شد. از نظر تراکم کشت، تراکم۹۰ هزار بوته در هکتار در وضعیت بهینه بوده و تراکم‌های ۷۵ و ۱۰۵ هزار بوته در هکتار در مقایسه با ۹۰ هزار بوته در هکتار از کارایی کمتری برخوردار بوده است. به طور کلی تیمار ۸۰ درصد نیاز آبیاری در کل دوره رشد با ۹۰ هزار بوته در هکتار به صورت کشت ۲ ردیفه با کارایی آب مصرفی ۱/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب نسبت به تیمارهای دیگر ارجحیت دارد. این برتری تنها از نظر آب مصرفی بوده و سایر پارامترهای مربوط به هزینه و درآمدها در نظر گرفته نشده است. مطابق نتایج AquaCrop برای منطقه مورد نظر و محصول ذرت به صورت نسبتا دقیق اعتبارسنجی شد و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی که باید قبل از فصل کشت صورت بگیرد، می‌تواند توسط برنامه‌ریزان مورد استفاده قرار گیرد. از مدیریت‌های زراعی در کم آبیاری (محدودیت منابع آب) ذرت، نوع کشت (یک ردیفه و یا دو

ردیفه) و تراکم بوته در هکتار می‌باشد. بر اساس مدل واسنجی شده، امکان آزمون مدیریت‌های مختلف تراکم و نوع کشت با حداقل خطا و قبل از فصل کشت وجود دارد.

مراجع

احمدآلی، ج. ۱۳۸۸. بررسی کارآیی مصرف آب آبیاری سیستم‌های نشتی و میکرو در کشت یک و دو ردیفه ذرت دانه‌ای. گزارش نهایی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

بابازاده، ح. و تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی)، (۲۶)۲: ۳۲۹-۳۳۹.

De Wit, C.T., Brouwer, R. and Penning, F.W.T. 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon. Pudoc, Wageningen, the Netherlands, pp. 47-50.

Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A. and Hsiao, T.C. 2009. Calibration and testing of FAO Aquacrop model for maize in several locations. Agronomy Journal, 101: 488–498.

Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Raes, D., and Fereres, E. 2009. Aquacrop-Model parameterization and testing for maize. Agronomy Journal, 101: 448–459.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. Aquacrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal, 101: 438–447.

Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research, 8(5): 1204-1213.

Salemi H., Mohd Soom, M.A., Mousavi, S.F., Ganji, A., Shui Lee, T., Yusoff M.K. and Verdinejad, V.R. 2011. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in arid regions. Polish Journal of Environmental Studies, 20(5): 1295-1303.

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. Agronomy Journal, 101: 426–437.

Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stckle, C. and Steduto, P. 2009. Assessment of Aquacrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal, 101: 509–521.

Ulger, A.C., H. Ibrikci, B. Cakir, and N. Guzel. 1997. Influence of nitrogen rates and row spacing on corn yield, protein content, and other plant parameters. Journal of plant nutr. 20: 1697-1709.

Water Management in Agriculture
Vol. 1, No. 1, Spring and Summer 2014, p. 21 - 30

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳، ص. ۳۰ - ۲۱

Application of AquaCrop Model in a Drip Irrigated Maize under Deficit Irrigation and Different Cultivation Managements

V. Rezaverdinejad[1]*, M. Doosti Rezaie[2], S. Besharat[1], H. Rezaie[3] and J. Ahmad Ali[2]

Abstract

In this research the performance of Aquacrop model was calibrated and validated to predict crop yield and water use efficiency of Maize in Miandoab region. The field experiment was conducted on strip split plot based on completely randomized design for SC704 variety of maize under three irrigation treatments, with three repetitions include: 80, 100 and 120% crop water requirement and three planting densities (75000, 90000 and 105000 bushes in hectare) and planting in one and two rows under drip irrigation system during 2005 and 2006. The model was calibrated by first year's (2005) data, and validated by second year's (2006) data. Results show that the Aquacrop Model has a high accuracy in forecasting of yield and water use efficiency with perfect and precise calibration. Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) of yield and water use efficiency prediction was obtained for validation about 1.92 and 1.82%. The Nash-Sutcliffe efficiency (EF) of yield and water use efficiency prediction were calculated for model validation about 82.5 and 97.7%, respectively that indicated modeling with high accuracy. Therefore, based on calibrated crop coefficient in this study, the Aquacrop model was suggested for applying of different irrigation level and crop density and implants type (one or two row) managements in this region.

Key words: Evaluation**,** Crop Density, Crop Modeling, Deficit Irrigation, Maize

Received: April-13-2014
Accepted: July-21-2014

1 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, Urmia University
(*Corresponding author: Email: verdinejad@gmail.com)
2 - Researchers, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center
3 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University