

ارزیابی مدل Aquacrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپر جاذب

نیاز علی ابراهیمی پاک^۱، اصلان اگدرنژاد^۲، داود خدادادی دهکردی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

چکیده

کم‌آبیاری و کاربرد سوپر جاذب به‌عنوان روش‌هایی جهت افزایش کارایی مصرف آب توصیه شده‌اند. براین اساس، با توجه به اینکه مدل AquaCrop قابلیت مدل‌سازی رشد گیاه را دارد، در این تحقیق از این مدل به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سوپر جاذب استفاده شد. این آزمایش در سال ۱۳۹۵ در مزرعه‌ای به مساحت ۱۰۷۲ مترمربع در شهرستان اهواز آزمایش در قالب طرح کرت‌های خردشده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۲ تیمار و سه تکرار انجام شد. تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش شامل مقدار آب آبیاری کاربردی (در سه سطح، I1، I2 و I3 به ترتیب با ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و چهار سطح سوپر جاذب (S1، S2 و S3 به ترتیب با صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک) بود. نتایج نشان داد که بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمار I2S2 و کمترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیز در تیمار I1S0 مشاهده شد. مقادیر آماره‌ی RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت به ترتیب برابر ۰/۷۲، ۱/۳۵، ۰/۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۰۷ شد. مقادیر آماره MBE نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ۰/۰۹، ۰/۶۵، ۰/۰۲ و ۰/۴۷- کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۰۱- برآورد شد. دامنه‌ی تغییرات شاخص d و NRMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۵-۰/۴۷ و ۰/۲۳-۰/۱۳ بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از دو آماره‌ی EF و R2 نیز می‌توان دقت قابل قبولی برای این مدل در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، تنش آبی، کارایی مصرف آب، مدل‌سازی گیاهی، ذرت.

۱ دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. تلفن تماس:

۰۹۱۲۱۸۱۷۱۶۹، پست الکترونیکی: nebrahimipak@yahoo.com (نویسنده مسئول).

۲ گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۶۳۱۱۱۲۶۹، پست الکترونیک: a_eigder@ymail.com

۳ گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تلفن تماس: ۰۹۱۶۳۰۳۳۴۷۴، پست الکترونیک: davood_kh70@yahoo.com

مقدمه

کم آبیاری گرچه سبب کاهش عملکرد محصول می شود، لیکن یکی از راه کارهای اساسی در بالا بردن بهره‌وری مصرف آب به شمار می‌رود (Debaek et al., 2004; Fereres and Soriano, 2007; Farre and Faci, 2009; Geerts and Raes, 2009; Blum, 2009) این روش با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۳) و بالا بودن مصرف آب در بخش کشاورزی (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۳) بیشتر اهمیت می‌یابد. تاکنون اثر سناریوهای مختلف کم آبیاری بر روی محصولات مختلف بررسی شده است (آقایاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ Pereira et al., 2002; Liu et al., 2007) و بسیاری از تحقیقات انجام شده، کاربرد مواد اصلاحی خاک مانند سوپر جاذب را به منظور کاهش اثرات کم آبیاری توصیه کرده‌اند (آقایاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۵؛ نورزاده حداد و همکاران، ۱۳۹۶؛ Green et al., 2004; Widiastuti et al., 2008) در تحقیقی اثر افزودن سوپر جاذب به خاک در مقایسه با عدم کاربرد آن بررسی شد و مشاهده گردید که مصرف سوپر جاذب سبب افزایش نگهداشت رطوبت در خاک به میزان ده درصد شد (Wu et al., 2008). روستایی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی اثر نسبت‌های مختلف سوپر جاذب بر خواص سویا تحت تنش خشکی نشان دادند که کاربرد سوپر جاذب سبب افزایش عملکرد این گیاه در شرایط تنش شد.

ذرت یکی از مهم‌ترین غلات جهان است و به لحاظ چهارکربنه بودن و گرما پسندی، با مناطق خشک و نیمه خشک سازگاری خوبی دارد (De Juan Valero, 2005). کم آبیاری سبب کاهش عملکرد ذرت می‌شود (مجیدیان و غدیری، ۱۳۸۱؛ مجیدیان و همکاران، ۱۳۸۷؛ Cheong et al., 2003; Westgate et al., 1994). به همین منظور تحقیقاتی نیز در خصوص اثر مواد مختلف از جمله سوپر جاذب‌ها بر عملکرد این گیاه انجام شده است که هر کدام نتایج متفاوتی ارائه داده‌اند (کوهستانی و همکاران، ۱۳۸۸؛ مؤذن قمصری و همکاران، ۱۳۸۸؛ مسلمی، ۱۳۸۹). جهت تعیین پاسخ این گیاه به شرایط مختلف، گرچه آزمایش‌های بسیار

مورد نیاز است؛ لیکن این کار پرزحمت و هزینه‌بر است. به همین دلیل مدل‌های گیاهی مختلفی به منظور رفع این محدودیت‌ها بسط داده شده‌اند (Boogaard et al., 1998; Geerts and Raes, 2009; Raes et al., 2012).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های رشد گیاهی است که توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) توسعه یافته است و به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل قبول نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد (Heng et al., 2009; Todorovic et al., 2009; Raes et al., 2012). تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با مدل AquaCrop روی عملکرد محصولات مختلف انجام شده است در مقایسه با سایر مدل‌های رشد گیاهی، نتایج رضایت بخشی گزارش شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹). به عنوان مثال می‌توان به نتایج (Araya et al., 2010) بر محصول جو، (Stricevic et al., 2011) بر محصولات ذرت و چغندر قند و علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) بر محصول گندم، بابازاده و سرایی تبریزی (۱۳۹۱) بر محصول سویا و حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۱) بر محصول آفتابگردان اشاره کرد. Horemans et al. (۲۰۱۷) به ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی درخت صنوبر نشان دادند که این مدل توانایی بالایی برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی و آب مصرفی توسط این درخت داشت. Paredes and Torres (۲۰۱۷) به ارزیابی این مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد نخود پرداختند. این محققان نشان دادند که حداکثر خطای این مدل در تعیین عملکرد و زیست‌توده نخود به ترتیب برابر با ۱۱ و ۷ درصد بود. Heng et al. (2009) گزارش کردند که مدل AquaCrop عملکرد دانه، زیست‌توده و پوشش گیاهی ذرت را به طور رضایت بخشی در شرایط آبیاری کامل و تنش آبی ملایم شبیه‌سازی می‌کند، ولی در شرایط تنش آبی شدید به خصوص زمانی که تنش در دوره پیری اعمال می‌شود، از دقت مطلوبی برخوردار نیست. نتایج تحقیقات (Abedinpoor et al., 2012) در ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین بیوماس، عملکرد دانه و بهره‌وری آب نشان داد که این مدل توانایی برآورد شاخص‌های ذکر شده دارد. نتایج آزمایش

این آزمایش باهدف بررسی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی اثر هم‌زمان دو عامل فوق بر عملکرد ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی محصول گیاه ذرت سینگل کراس ۷۰۴ در دو فصل زراعی (بهار و تابستان) در سال ۱۳۹۵ در یک مزرعه آزمایشی در شهر اهواز انجام شد. این مزرعه به مساحت ۱۰۷۲ مترمربع واقع در طول جغرافیایی ۱۵° ۴۶' ۴۸" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰° ۴۸' ۳۱" شمالی و ارتفاع ۱۱ متر از سطح دریا بود. به‌منظور انجام آزمایش، داده‌های هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک اهواز استفاده شد (جدول ۱). هم‌چنین نمونه‌برداری از آب آبیاری و خاک مزرعه در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری و خاک مزرعه به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

Masanganise et al., (2013) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در زیمبابوه نشان داد که این مدل قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی این محصول دارد. نتایج بررسی Katerji et al., (2013) در واکنش ذرت به تنش آبی با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد که این مدل توانایی شبیه‌سازی بیوماس تجمعی روزانه را در شرایط بدون تنش و تنش آبی متوسط دارد. ولی عملکرد نامناسب این مدل در شرایط تنش شدید از جمله نقاط ضعف مدل است. نتایج آزمایش رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۳) در ارزیابی و واسنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری در منطقه قزوین نشان داد که این مدل توانایی مناسبی در شبیه‌سازی دارد. حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به بررسی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت در منطقه کرچ با کاربرد تیمارهای مختلف آب‌شور و شیرین پرداختند و کاربرد این مدل را در پیش‌بینی عملکرد ذرت مناسب ارزیابی کردند.

بر اساس مرور منابع، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی مدل AquaCrop در شرایط هم‌زمان کم‌آبیاری و کاربرد سوپر جاذب بر گیاه ذرت انجام نشده است. لذا

جدول ۱- برخی از داده‌های هواشناسی مربوط به ماه‌های در فصل کشت ذرت در سال ۱۳۹۵

هواشناسی	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان
حداکثر دما (°C)	۲۴/۴	۳۱/۶	۳۷/۷	۴۴/۷	۴۶/۳	۴۷/۲	۴۳/۵	۳۸	۲۷/۵
حداقل دما (°C)	۱۲/۳	۱۷/۵	۲۴/۴	۲۸/۷	۲۹/۷	۳۰/۹	۲۶/۴	۲۱/۸	۱۵/۲
میانگین دما (°C)	۱۸/۴	۲۴/۶	۳۱/۱	۳۶/۷	۳۸	۳۹/۱	۳۵	۲۹/۹	۲۱/۳۵
رطوبت حداکثر %	۶۷/۸	۵۰/۶	۵۱/۲	۳۴/۸	۴۱/۶	۴۰/۳	۴۸/۵	۵۴	۷۳/۳
رطوبت حداقل %	۲۶/۵	۱۳/۹	۱۸	۱۰/۲	۱۲	۱۱/۷	۱۴	۱۶/۷	۳۰/۳
میانگین رطوبت هوا %	۴۷/۲	۳۲/۳	۳۴/۶	۲۲/۵	۲۶/۸	۲۶	۳۱/۳	۳۵/۴	۵۱/۸
میزان بارش (mm)	۱۳/۷	۴/۳	۹/۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱/۳

جدول ۲- نتایج تجزیه کیفی آب مزرعه

آنیون‌ها (mg/l)			کاتیون‌ها (mg/l)					SAR	pH	EC (dS/m)
So ₄ ²⁻	Cl ⁻	Hco ₃ ⁻	Co ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺			
۷۷۷/۶	۶۰۶/۳۵	۲۴۴	۰	۴/۶۸	۲۸۰	۱۰۸	۲۰۰	۲/۳	۷/۳	۲/۹

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت

فراوانی نسبی و اندازه ذرات خاک (درصد)			بافت خاک	EC (dS.m ⁻¹)	pH	کربن آلی (%)	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)	عمق (cm)
شن	سیلت	رس							
۸۸	۴	۸	شنی	۳	۸/۱	۰/۴۲	۱۰/۴	۱۶۶	۰-۳۰
۹۰	۲	۸	شنی	۲/۸	۸	۰/۳۵	۱۴/۱	۱۵۱	۳۰-۶۰

نمونه برداری تا عمق ریشه گیاه (تا حداکثر ۸۰ سانتیمتر و در کرت شاهد) در روزهای قبل از آبیاری انجام شد و زمانی که میانگین وزنی رطوبت حجمی خاک به حد تخلیه مجاز برای ذرت می‌رسید، آبیاری بعدی انجام می‌شد. در نتیجه دور آبیاری با توجه به تیمار بدون تنش آبی تعیین شد و هم‌زمان تمامی تیمارهای طرح با دور آبیاری یکسان و اعماق متفاوت آب، آبیاری گردیدند. برای تعیین میزان آب آبیاری، از رابطه (۱) استفاده شد.

$$SMD = (\theta_{fc} - \theta_i) \cdot \rho_b \cdot D_r \cdot f \quad (1)$$

که در آن: SMD^۱: کمبود رطوبت خاک (cm)، θ_{fc} : درصد وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی، f: ضرایب هر تیمار به صورت اعشار (۱، ۰/۷۵ و ۰/۵)، θ_i : درصد وزنی رطوبت موجود خاک، ρ_b : جرم مخصوص ظاهری (gr/cm³) و D_r : عمق توسعه ریشه گیاه (cm) می‌باشد. در جداول (۴) و (۵) به ترتیب تاریخ و مقدار آب آبیاری برای کشت‌های اول و دوم نشان داده شده است. در انتهای فصل رشد، برای حذف اثر حاشیه‌ای، از بوته‌های موجود در دو مترمربع در وسط هر کرت برداشت محصول صورت گرفت. سپس عملکرد دانه و زیست‌توده برای هر تیمار اندازه‌گیری شد. از آنجایی که حجم موردنیاز آب برای هر تیمار به‌طور دقیق محاسبه شده و با استفاده از کنتور حجمی دقیق به هر کرت داده شد، بنابراین راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد.

قبل از کاشت گیاه، عملیات آماده‌سازی زمین انجام شد و کرت‌هایی به مساحت ۱۸ مترمربع (۴×۴/۵) ایجاد شد. این آزمایش در قالب طرح کرت‌های خردشده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۲ تیمار و سه تکرار انجام شد. تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش شامل مقدار آب آبیاری (در سه سطح، I، I2، I3 به ترتیب ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و سطوح مختلف سوپر جاذب A300 (در چهار سطح، S0، S1، S2، S3 به ترتیب صفر، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک) بود. مقادیر سوپر جاذب در عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک، در هر خط کشت کارگذاری شدند. بر اساس توصیه آزمایشگاه خاک، کود فسفره سوپر فسفات تریپل، کود پتاسه از منبع سولفات پتاسیم و کود اوره مورد استفاده قرار گرفت. برای کنترل شیمیایی علف‌های هرز در مزرعه، قبل از کاشت، مخلوط سم آترازین و لاسو (یک کیلوگرم در هکتار آترازین+ چهار لیتر در هکتار لاسو) با استفاده از سم‌پاشی تراکتوری سم‌پاشی گردید و سپس دیسک سبک زده شد. در طول دوره شد نیز مبارزه با علف‌های هرز به صورت دستی انجام گرفت.

عملیات کاشت با قرار دادن ۲ عدد بذر در هر کپه و در عمق کاشت ۵-۶ سانتی‌متر انجام گرفت. فاصله ردیف‌های کاشت از یکدیگر ۷۵ سانتی‌متر و فاصله گیاهان در هر ردیف ۱۷ سانتی‌متر بود. در مجموع، کاشت با تراکم حدود ۷۸۴۳۰ بوته در هر هکتار انجام گرفت. در مرحله ۲-۴ برگی، بوته‌ها به یک بوته در هر کپه تنک شدند. تا مرحله چهار یا پنج‌برگی (مرحله استقرار گیاه چه)، آبیاری‌ها بر اساس تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه انجام می‌گرفت. از این مرحله به بعد تیمارهای آبیاری برای هر تیمار اعمال گردیدند. برای تعیین عمق آب آبیاری، اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک از طریق

¹ - Soil Moisture Deficit

شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. کارایی مصرف آب نیز با استفاده از رابطه (۷) تعیین می‌گردد.

$$Y = B \times HI \quad (۶)$$

$$WUE = \frac{Y}{I} \quad (۷)$$

که در رابطه‌های بالا، WUE کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و I آب خالص (مترمکعب) است. شدت تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. این عمل سبب کاهش ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه می‌شود.

داده‌های ورودی مدل شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، بارندگی، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) و میانگین غلظت CO_2 سالیانه است. جهت تعیین تبخیر-تعرق از معادله فائو-پنمن-مانتیث (Allen et al., 1998) و توسط نرم‌افزار ET-calculator استفاده شد و خروجی آن به مدل معرفی گردید. غلظت CO_2 نیز بر اساس مقدار پیش فرض استفاده شد. داده‌های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم می‌باشد. این پارامترها بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش خاک به مدل معرفی گردید. با توجه به اینکه کاربرد سوپر جاذب سبب ایجاد تغییراتی در خصوصیات فیزیکی خاک جهت نگهداشت رطوبت و انتقال آن می‌شود؛ برای در نظر گرفتن اثر سوپر جاذب توسط مدل AquaCrop، تغییرات رطوبت در دونقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی و هدایت هیدرولیکی اشباع در هر تیمار اندازه‌گیری و به نرم‌افزار معرفی شد (جدول ۶). بر این اساس، تیمارهای حاوی و فاقد سوپر جاذب برای این مدل تعیین شد. داده‌های مدیریت مزرعه نیز شامل: الف) مدیریت مزرعه و حاصل خیزی، ب) آبیاری:

مدل AquaCrop

این مدل برای تعیین عملکرد محصول بر اساس تبخیر-تعرق از رابطه (۲) استفاده می‌کند (Doorenbos and Kassam, 1979).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (۲)$$

در این معادله، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است.

این مدل با تفکیک تبخیر-تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr)، از مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند. این عمل با شبیه‌سازی پوشش تاج گیاه به جای شاخص سطح برگ (LAI) انجام می‌شود. بدین ترتیب که توسعه پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2012):

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (۳)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2012):

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۴)$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۵) برآورد می‌گردد:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (۵)$$

که در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و

مدیریت مزرعه بدون محدودیت به مدل تعریف شد. آبیاری نیز بر اساس تیمارهای موردنظر به مدل معرفی گردید.

جدول ۴- زمان و میزان آب مصرف شده برای هر یک از تیمارهای آبیاری درکشت بهاره

تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)	تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)
۹۴/۱۲/۲	اول	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۲/۴	دوازدهم	۳۰	۲۲/۵	۱۵
۹۴/۱۲/۸	دوم	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۲/۹	سیزدهم	۳۴	۲۵/۵	۱۷
۹۴/۱۲/۱۴	سوم	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۲/۱۴	چهاردهم	۳۸	۲۸/۵	۱۹
۹۴/۱۲/۲۰	چهارم	۱۸	۱۳/۵	۹	۹۵/۲/۱۹	پانزدهم	۳۶	۲۷	۱۸
۹۴/۱۲/۲۶	پنجم	۱۵	۱۱/۲۵	۷/۵	۹۵/۲/۲۴	شانزدهم	۳۵	۲۶/۲۵	۱۷/۵
۹۵/۱/۳	ششم	۲۱	۱۵/۷۵	۱۰/۵	۹۵/۲/۲۸	هفدهم	۳۰	۲۲/۵	۱۵
۹۵/۱/۹	هفتم	۲۲	۱۶/۵	۱۱	۹۵/۳/۱	هجدهم	۲۹	۲۱/۷۵	۱۴/۵
۹۵/۱/۱۵	هشتم	۲۳	۱۷/۲۵	۱۱/۵	۹۵/۳/۵	نوزدهم	۲۸	۲۱	۱۴
۹۵/۱/۲۰	نهم	۲۱	۱۵/۷۵	۱۰/۵	۹۵/۳/۹	بیستم	۲۷	۲۰/۲۵	۱۳/۵
۹۵/۱/۲۵	دهم	۲۴	۱۸	۱۲	۹۵/۳/۱۳	بیست و یکم	۲۷	۲۰/۲۵	۱۳/۵
۹۵/۱/۳۰	یازدهم	۲۴	۱۸	۱۲	۹۵/۳/۱۷	بیست و دوم	۲۷	۲۰/۲۵	۱۳/۵
			جمع (mm)						۲۹۹/۵

جدول ۵- زمان و میزان آب مصرف شده برای هر یک از تیمارهای آبیاری درکشت تابستانه

تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)	تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)
۹۵/۵/۲	اول	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۶/۲۷	پانزدهم	۲۷	۲۰/۲۵	۱۳/۵
۹۵/۵/۶	دوم	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۶/۳۱	شانزدهم	۲۷	۲۰/۲۵	۱۳/۵
۹۵/۵/۱۰	سوم	۱۵	۱۵	۱۵	۹۵/۷/۴	هفدهم	۲۸	۲۱	۱۴
۹۵/۵/۱۴	چهارم	۲۰	۲۰	۲۰	۹۵/۷/۸	هجدهم	۳۰	۲۲/۵	۱۵
۹۵/۵/۱۸	پنجم	۲۰	۲۰	۲۰	۹۵/۷/۱۲	نوزدهم	۳۲	۲۴	۱۶
۹۵/۵/۲۲	ششم	۲۲	۱۶/۵	۱۱	۹۵/۷/۱۶	بیستم	۳۲	۲۴	۱۶
۹۵/۵/۲۶	هفتم	۲۲	۱۶/۵	۱۱	۹۵/۷/۲۰	بیست و یکم	۳۰	۲۲/۵	۱۵
۹۵/۵/۳۰	هشتم	۲۲	۱۷/۲۵	۱۱/۵	۹۵/۷/۲۴	بیست و دوم	۲۷	۲۲/۲۵	۱۳/۵
۹۵/۶/۳	نهم	۲۳	۱۷/۲۵	۱۱/۵	۹۵/۷/۲۸	بیست و سوم	۲۶	۱۹/۵	۱۳
۹۵/۶/۷	دهم	۲۴	۱۸	۱۲	۹۵/۸/۱	بیست و چهارم	۲۵	۱۸/۷۵	۱۲/۵
۹۵/۶/۱۱	یازدهم	۲۴	۱۸	۱۲	۹۵/۸/۵	بیست و پنجم	۲۳	۱۷/۲۵	۱۱/۵
۹۵/۶/۱۵	دوازدهم	۲۵	۱۸/۷۵	۱۲/۵	۹۵/۸/۹	بیست و ششم	۲۰	۱۵	۱۰
۹۵/۶/۱۹	سیزدهم	۲۵	۱۸/۷۵	۱۲/۵	۹۵/۸/۱۴	بیست و هفتم	۲۰	۱۵	۱۰
۹۵/۶/۲۳	چهاردهم	۲۶	۱۹/۵	۱۳	-	-	-	-	-
			جمع (mm)						۳۶۵/۵

جدول ۶- مقادیر هدایت هیدرولیکی و رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم با کاربرد سوپر جاذب

تیمار	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر روز)	رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (درصد حجمی)
S0	۱۴۲	۷/۳	۴/۵
S1	۱۴۷	۸/۸	۵/۲
S2	۱۵۳	۱۱/۲	۶/۷
S3	۱۵۹	۱۲/۹	۷/۹

تحلیل حساسیت مدل

جهت تحلیل حساسیت این مدل از رابطه (۷) استفاده شد (Geerts et al., 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده پارامتر موردنظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر موردنظر بر اساس داده ورودی پایه هست. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگاه داشته می‌شدند (Geerts et al., 2009). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $15 > Sc > 2$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts et al., 2009).

با توجه به اینکه مدل AquaCrop از عوامل گیاهی مختلفی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات استفاده می‌کند؛ پیش از آزمون این مدل نیاز است تا عوامل موردنظر واسنجی شوند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۳). هم‌چنین این مدل اثرات کمبود آب را بر اساس محاسبه کمبود رطوبت خاک نسبت به قابلیت نگهداری رطوبت خاک ناحیه ریشه و با استفاده از توابع پاسخ گیاه به تنش تعیین می‌کند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۳؛ Raes et al., 2009؛ Steduto et al., 2009). بنابراین لزوم واسنجی این مدل دیده می‌شود. بدین منظور عوامل مرتبط با رقم گیاه مورد واسنجی قرار گرفتند. سایر عوامل مرتبط با گیاه مانند خانواده، گونه و مدیریت کاشت آن یا توسط ارائه‌دهندگان این مدل پیشنهاد شده است یا در دسترس هستند (جدول ۷).

جدول ۷- مقادیر عوامل گیاهی مورداستفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
عمق مؤثر ریشه	۱۷۰	سانتی متر	پیش فرض
حد پایین آستانه شوری	۲	دسی زیمنس بر متر	پیش فرض
شاخص برداشت مرجع	۴۸	درصد	پیش فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه زنی	۸	روز	اندازه گیری
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۷۰	روز	اندازه گیری
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۰۰	روز	اندازه گیری
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۲۰	روز	اندازه گیری
ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه ها	۰/۵۵	-	پیش فرض
ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری	۰/۶۵	-	پیش فرض
تراکم کشت	۷۸۴۳۰	گیاه در هکتار	اندازه گیری
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی گراد	پیش فرض
ضریب تنش پیری پوشش گیاهی	۰/۶۹	-	پیش فرض
محدوده درجه روز	۱۱	درجه روز	پیش فرض
آستانه پایین رشد	۰/۱۴	-	پیش فرض
آستانه بالای رشد	۰/۷۲	-	پیش فرض

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی دقت مدل AquaCrop در پیش بینی عملکرد دانه، رشد ماده خشک و پوشش گیاهی، از آماره های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره ها به ترتیب در روابط (۸) تا (۱۳) نشان داده شده اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (9)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

در معادله های فوق P_i مقدار شبیه سازی شده، O_i مقدار اندازه گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه گیری شده و n برابر تعداد داده ها می باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان دهنده این است که مدل AquaCrop مقدار پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر مورد نظر عدد کوچک تری به دست داده است.

مقدار EF نشان دهنده صحت برازش داده ها می باشد و از مقدار منفی بی نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می کند و هر چه به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده برازش بهتر داده ها می باشد.

نتایج و بحث

بارندگی حساسیت کم و نسبت به تغییرات دمای حداکثر حساسیت متوسط داشت. این نتایج با مشاهدات محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در کشت گندم مطابقت داشت. علت این تطابق خصوصیت مدل AquaCrop است که حساسیت چندانی نسبت به این پارامترها ندارد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل AquaCrop نسبت به تغییرات رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی و رطوبت اشباع، حساسیت متوسط و یا کم داشت (جدول ۸). این مدل نسبت به شاخص‌های هواشناسی نیز حساسیت متوسط و کم نشان داد به طوری که نسبت به تغییرات دمای حداقل و

جدول ۸- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت

پارامتر	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۶/۹	۳/۸	متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۲/۴	۱/۷	متوسط-کم
رطوبت اشباع	۰/۲	۰/۸	کم
دمای حداقل	۱/۵	۱/۹	کم
دمای حداکثر	۲/۸	۴/۱	متوسط
بارندگی	۰/۴	۰/۷	کم
ضریب گیاهی برای تعرق	۱۵/۸	۸/۹	بالا-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۰/۳	۱/۲	کم
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۰/۵	۰/۷۲	کم
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	۱/۹	۵/۷	کم-متوسط
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	۷/۳	۲/۴	متوسط
مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری	۳/۶	۵/۲	متوسط
حد آستانه‌بالای دما	۰/۵	۰/۲	کم
طول مرحله گلدهی	۳/۳	۲/۸	متوسط

برای واسنجی این مدل ابتدا از مقادیر پیش‌فرض استفاده شد سپس مقادیر واسنجی مطابق جدول (۹) تعیین گردید. سایر عوامل مورد استفاده بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده در جدول (۷) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج برای تعیین عملکرد دانه ذرت نشان داد که بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop و مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمار I2S2 بود (شکل ۱). کمترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیز در تیمار I1S0 مشاهده شد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده با افزایش سطح سوپر جاذب، عملکرد ذرت نیز افزایش یافت. نتایج به‌دست‌آمده از مدل AquaCrop نیز تقریباً همین روند را نشان داد. و در این سه تیمار این روند مشاهده نشد به طوری که اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده برای این تیمارها نیز تفاوت اندکی نسبت به سطح کاربرد کمتر

بیشترین حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی برای تعرق مشاهده شد. با افزایش و کاهش مقدار این پارامتر، حساسیت مدل به ترتیب بالا و متوسط بود. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) نیز حساسیت این مدل را به تغییرات این پارامتر گزارش کرده‌اند. سالمی و همکاران (۲۰۱۱) نیز در تحلیل حساسیت این مدل در اقلیم اهواز گزارش کرد که مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر حساسیت متوسطی دارد. این مدل نسبت به تغییرات عمق مؤثر ریشه، مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی و حد آستانه‌بالای دما حساسیت کمی داشت. بنابراین می‌توان اطمینان داشت که وجود خطای ناشی از اندازه‌گیری این پارامترها نیز سبب تغییرات نتایج این مدل نشده است. هم‌چنین حساسیت این مدل نسبت به تغییرات سایر عوامل گیاهی متوسط و یا کم بود.

IIS2 و IIS3 وجود نداشت؛ قابل چشم‌پوشی است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با نتایج حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت داشت. این محققان نیز دقت قابل‌قبول این مدل را در برآورد عملکرد ذرت گزارش کردند.

سوپر جاذب داشتند. به‌عنوان نمونه، در تیمار آبیاری I1 افزایش کاربرد سوپر جاذب از S0 تا S2 سبب افزایش عملکرد دانه شبیه‌سازی شده شد. ولی مقدار عملکرد دانه در تیمار IIS3 نسبت به تیمار IIS2 به میزان ۱۴/۷ درصد کاهش یافت. این اختلاف با توجه به اینکه تفاوت آماری معنی‌داری نیز بین دو تیمار

جدول ۹- عوامل واسنجی شده مدل AquaCrop

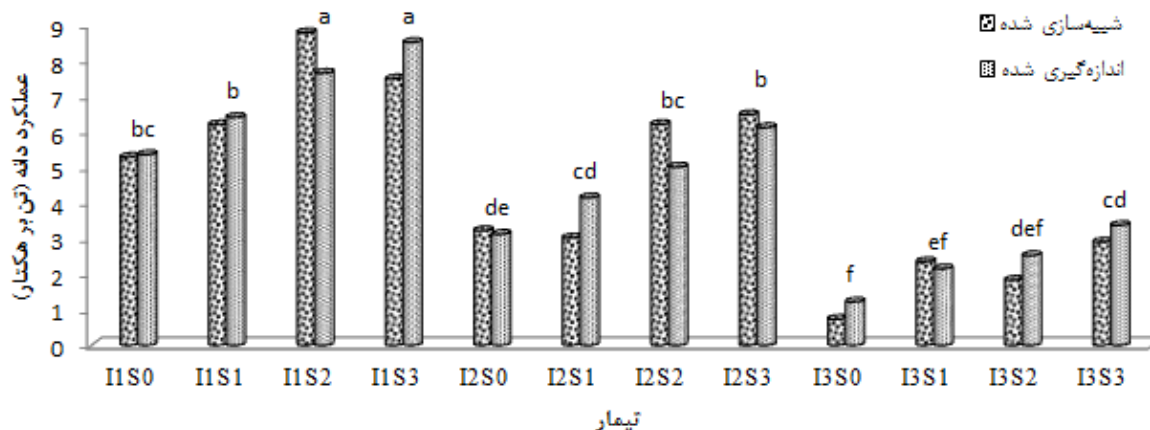
توضیح پارامتر	واحد	مقدار اولیه	مقدار بعد از واسنجی
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	سانتی‌متر مربع	۶/۵	۳/۵
بیشینه رشد کانویی	درصد	۹۶	۸۴
بهره‌وری آب نرمال شده	گرم بر مترمربع	۳۳/۷	۲۰/۵
پوشش تاج اولیه	درصد	۴۶	۳۷
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	-	۰/۱	۰/۱۴
دمای پایه رشد	درجه سانتی‌گراد	۸	۱۰
ضریب رشد پوشش	درصد روز	۸	۱۰/۹
ضریب کاهش پوشش	درصد روز	۹	۱۲/۳
ضریب گیاهی برای تعرق	درصد بر روز	۱/۱	۰/۹۵
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	-	خطی	خطی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه	-	۳	۲/۱
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	-	۲/۷	۲/۳
طول مرحله گلدهی	روز	۱۰	۷

مدل در برخی تیمارها دقت بسیار خوبی در برآورد مقدار زیست‌توده داشت به‌طوری‌که در اکثر تیمارها خطای شبیه‌سازی کمتر از هشت درصد بود. فقط در سه تیمار IIS2، IIS3 و IIS0 خطای شبیه‌سازی زیست‌توده بالا و به ترتیب برابر ۲۳/۹، ۲۰/۹ و ۱۵/۲ درصد به دست آمد. وطن‌خواه و ابراهیمیان (۱۳۹۵) اختلاف بین زیست‌توده شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای گیاه ذرت را حداقل ۱/۵ تن در هکتار و حداکثر ۱۱/۹ تن در هکتار گزارش کردند. در حالی‌که در تحقیق حاضر بیشترین اختلاف بین این مقادیر برابر با ۳/۲۶ تن در هکتار بود. با فرض ثابت بودن مقدار آب آبیاری، با کاربرد سطح سوپر جاذب مقدار زیست‌توده افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی با مدل AquaCrop هم تغییرات مشابهی نشان داد. فقط در تیمار آبیاری I1، با کاربرد سطح سوپر جاذب S3، مقدار زیست‌توده به میزان ۵/۸ درصد نسبت به سطح کاربرد S2 کاهش یافت. با توجه به عدم تفاوت آماری معنی‌دار بین دو

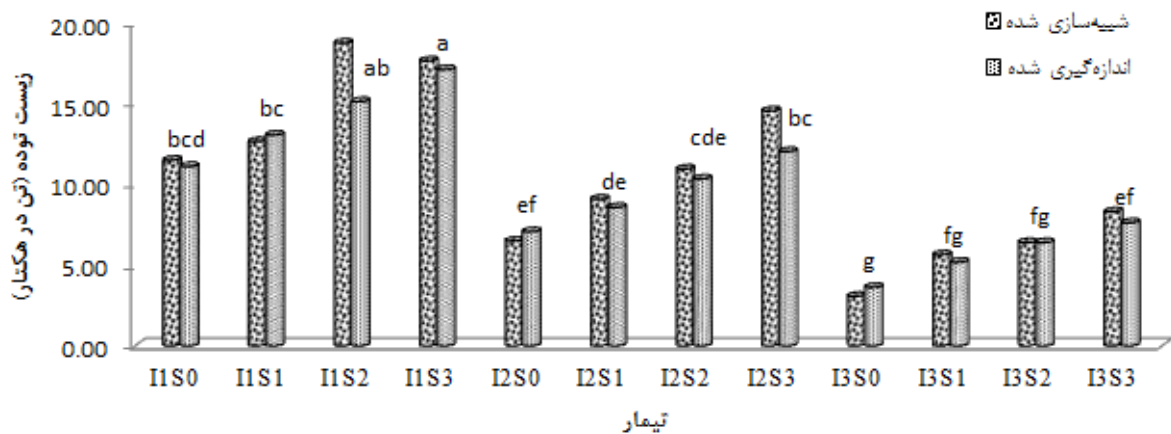
روند قابل توجیهی بین مقادیر شبیه‌سازی شده در تیمارهای آبیاری یکسان مشاهده نشد و در برخی تیمارها بیش برآوردی و در برخی کم‌برآوردی مشاهده شد. نتایج تحقیقات (Katerji, Heng et al., (2009) et al., (2013) و ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) حاکی از بیش برآوردی مدل AquaCrop بود. در حالی‌که نتایج وطن‌خواه و ابراهیمیان (۱۳۹۵) بر کم‌برآوردی این مدل در شبیه‌سازی عملکرد ذرت دلالت داشت. حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که مدل AquaCrop در برآورد عملکرد محصول ذرت دارای خطای بیش برآورد است. این محققان علت بیش برآوردی را قلیاییت آب آبیاری مورد استفاده بیان کردند. با توجه به جدول (۲) مشاهده شده که این محدودیت در تحقیق حاضر اثری بر شبیه‌سازی نگذاشته است به همین دلیل در اکثر تیمارها کم‌برآوردی مشاهده شد. مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی شده در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این

به جز سه تیمار I1S2، I1S3 و I2S3 در سایر تیمارها کارایی مصرف آب کمتر از یک مشاهده شد (شکل ۳). مقادیر شبیه‌سازی با مدل AquaCrop نیز نشان داد که در سه تیمار I1S2، I1S3 و I2S2 کارایی مصرف آب بیشتر از یک بود. مقدار کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده برای تیمار I2S3 برابر ۱/۲۱ به دست آمد. در حالی که مقدار شبیه‌سازی شده آن با استفاده از مدل AquaCrop به میزان ۲۴/۷ درصد کاهش یافت. بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده این پارامتر در تیمارهای I2S1، I3S0 و I3S2 به دست آمد. اختلاف موردنظر برای این تیمارها به ترتیب برابر ۴۳، ۲۸ و ۲۶ درصد بود. در سایر تیمارها اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده پایین بود به طوری که کمترین اختلاف در تیمار I3S1 و برابر ۵ درصد مشاهده شد.

تیمار I1S2 و I1S3 می‌توان این اختلاف را نیز نادیده گرفت. در تیمارهای آبیاری یکسان، کاربرد سوپر جاذب سبب کاهش اندک دقت مدل در برآورد عملکرد دانه شد. گرچه این کاهش دقت با افزایش سطح کاربرد سوپر جاذب تغییر محسوسی نداشت. با این وجود، در تنش آبی شدید، کاربرد سوپر جاذب سبب افزایش دقت مدل نسبت به تیمار بدون سوپر جاذب شد. نتایج مشابه نیز برای پارامتر زیست‌توده مشاهده گردید. به طوری که در تیمار آبیاری I3، کاربرد سوپر جاذب دقت مدل را بهبود بخشید ولی در تیمار آبیاری I1، کاربرد آن سبب کاهش اندک دقت مدل گردید. در تیمارهای بدون سوپر جاذب نیز افزایش تنش آبی سبب کاهش دقت شبیه‌سازی این مدل شد. سایر محققان از جمله وطن‌خواه و ابراهیمیان (۱۳۹۵)، محمدی و همکاران (۱۳۹۴)، علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) و Andarzian et al., (2011) نیز کاهش دقت شبیه‌سازی این مدل را در شرایط تنش گزارش کرده‌اند.



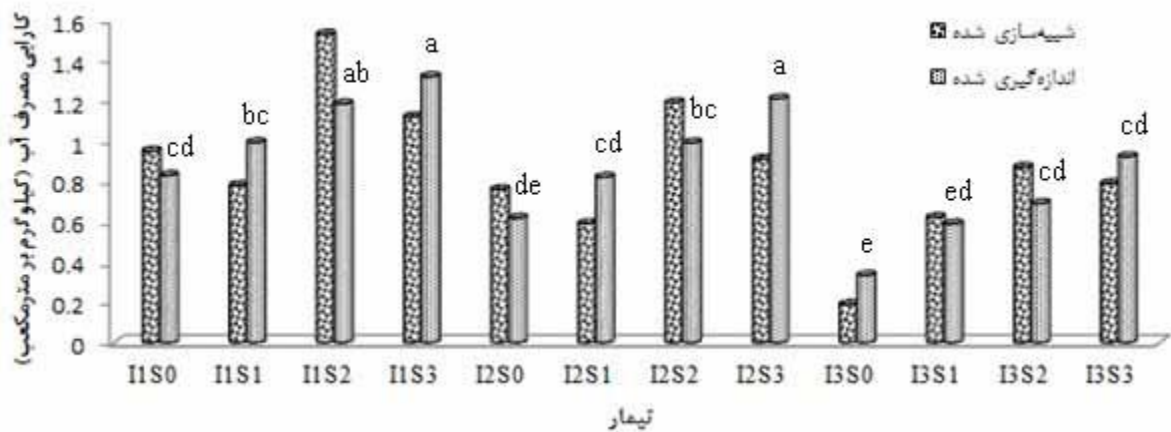
شکل ۱- عملکرد محصول دانه ذرت در تیمارهای مختلف بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop (I1، I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده آبیاری در سطح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه است. S0، S1، S2 و S3 نیز به ترتیب نشان‌دهنده کاربرد سوپر جاذب در سطوح صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک است)



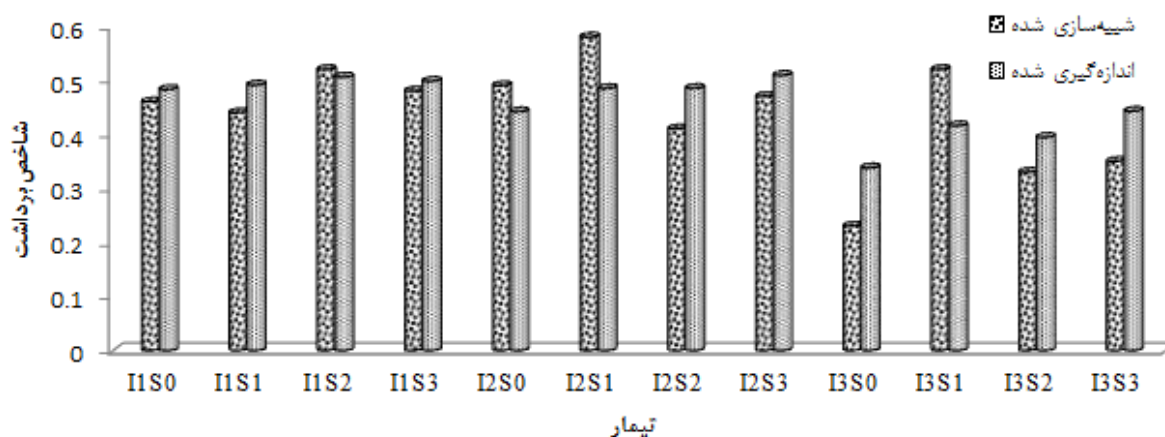
شکل ۲- مقادیر زیست توده ذرت در تیمارهای مختلف بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop (I1, I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده آبیاری در سطح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه است. S0، S1، S2 و S3 نیز به ترتیب نشان‌دهنده کاربرد سوپر جاذب در سطوح صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک است)

بیشتر بر مقدار اندازه‌گیری تعیین کرد به طوری که کمترین و بیشترین مقادیر بیش برآوردی به ترتیب به تیمارهای I1S2 و I1S1 تعلق داشت. با توجه به اینکه روند منظمی بین تیمارهای موردنظر از نظر مقدار شاخص برداشت وجود نداشت؛ نتایج شبیه‌سازی با مدل AquaCrop نیز با نتایج موافق بود.

نتایج به دست آمده در تعیین شاخص برداشت نشان داد که این مدل در اکثر تیمارها دچار کم‌برآوردی شد (شکل ۴). بیشترین مقدار کم‌برآوردی در تیمارهای I3S0، I3S3 و I3S2 و به ترتیب برابر با ۱۰/۷، ۹/۳ و ۶/۴ درصد برآورد گردید. این مدل در چهار تیمار I1S2، I2S0، I2S1 و I3S1 مقدار شاخص برداشت را



شکل ۳- میزان کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop (I1، I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده آبیاری در سطح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه است. S0، S1، S2 و S3 نیز به ترتیب نشان‌دهنده کاربرد سوپر جاذب در سطوح صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک است)



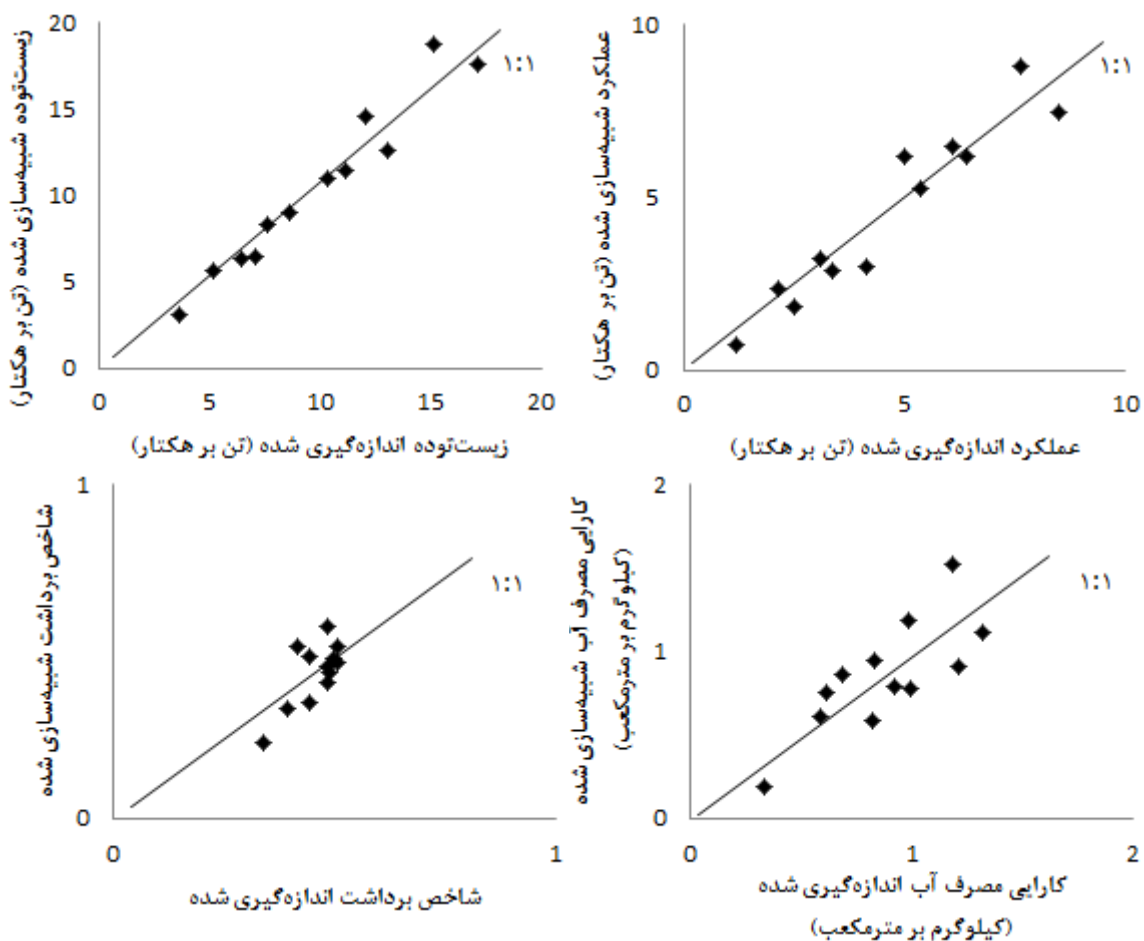
شکل ۴- مقادیر شاخص برداشت در تیمارهای مختلف بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop (I1, I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده آبیاری در سطح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه است. S0، S1، S2 و S3 نیز به ترتیب نشان‌دهنده کاربرد سوپر جاذب در سطوح صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در هر کیلوگرم خاک است)

مصرف آب و شاخص برداشت به ترتیب برابر ۰/۲۰ و ۰/۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد که مقادیر بسیار پایینی هستند. هم‌چنین مقدار آماره‌ی MBE نیز برای این دو پارامتر بسیار پایین و منفی بود که نشان‌دهنده خطای پایین مدل و کم‌برآوردی این دو پارامتر بود. سایر محققان از جمله محمدی و همکاران (۱۳۹۴) و Hussein et al., (2011) نیز گزارش کردند که مدل AquaCrop دقت کمتری برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب نسبت به عملکرد و زیست‌توده داشت. آماره R^2 برای عملکرد دانه، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت به ترتیب برابر ۰/۹۱، ۰/۹۳، ۰/۶۰ و ۰/۵۱ (به دست آمد (شکل ۵)). Masanganise et al., 2013 و حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) به ترتیب مقدار آماره R^2 را برای عملکرد محصول ذرت به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۷۵ گزارش کردند.

ارزیابی کلی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت نشان داد که این مدل با توجه به مقادیر پایین RMSE و MBE از دقت مطلوبی برخوردار بود (جدول ۱۰). مقدار منفی شاخص MBE نشان داد که در حالت کلی این مدل دارای خطای کم‌برآوردی در تخمین عملکرد دانه بود. بالا بودن شاخص EF نیز نشان داد که این مدل از کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی این پارامتر برخوردار است. مقادیر آماره‌های RMSE و MBE برای پارامتر زیست‌توده نسبت به عملکرد دانه بیشتر بود. گرچه این افزایش به ترتیب برابر ۱/۸۷ و ۷/۲۲ به دست آمد ولی می‌توان گفت که این مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده نیز دقت مناسبی داشته است. هم‌چنین بر اساس مقدار مثبت شاخص MBE، در حالت کلی این مدل دارای خطای بیش‌برآورد در شبیه‌سازی زیست‌توده است. کارایی مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده نیز مقداری نزدیک به یک به دست آمد که نشان‌دهنده کفایت مدل است. مقادیر آماره RMSE برای دو پارامتر کارایی

جدول ۱۰- مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت ذرت

پارامتر	RMSE	NRMSE	MBE	EF	d	R^2
عملکرد دانه	۰/۷۲	۰/۱۵	-۰/۰۹	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۱
زیست‌توده	۱/۳۵	۰/۱۳	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۹۳
کارایی مصرف آب	۰/۲۰	۰/۲۳	-۰/۰۲	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۶۰
شاخص برداشت	۰/۰۷	۰/۱۵	-۰/۰۱	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۵۱



شکل ۵- برازش مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop برای عوامل موردنظر در تیمارهای مورد استفاده

کردند. درحالی‌که این محققان برای شاخص برداشت مقدار R^2 را برابر با ۰/۴۹ به دست آوردند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری و کاربرد سوپر جاذب استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل دقت مناسبی در تعیین عملکرد دانه و زیست‌توده داشت به طوری که مقادیر آماره‌های RMSE و MBE برای این دو پارامتر به ترتیب ۰/۷۲، ۱/۳۵ و ۰/۰۹، ۰/۶۵ تن در هکتار به دست آمد. هم‌چنین آماره R^2 برای هر دو پارامتر نشان داد که نتایج این مدل همبستگی خوبی

مقادیر بالای R^2 نیز در شبیه‌سازی محصولات مختلف در شرایط کم‌آبیاری نیز گزارش شده است. خرسند و همکاران (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط تنش آبی با استفاده از مدل AquaCrop مقدار ۰/۹۵ را برای این آماره گزارش کردند. وطن‌خواه و ابراهیمیان (۱۳۹۵) مقادیر ۱ و ۰/۹۲ را به ترتیب برای شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه ارائه کردند. مقایسه این نتایج با تحقیقات سایر محققان نشان داد که مقادیر به دست آمده برای عملکرد دانه و زیست‌توده قابل قبول هست. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) نیز در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده گندم با استفاده از مدل AquaCrop به ترتیب مقادیر ۰/۷۹ و ۰/۶۹ را برای آماره R^2 گزارش

را شبیه‌سازی کند. از طرفی، گرچه با افزایش تنش آبی دقت این مدل در تیمارهای بدون سوپر جاذب کاهش یافت، ولی اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای حاوی سوپر جاذب قابل‌قبول بود.

نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. گرچه این مدل در تعیین عوامل کارایی مصرف آب و شاخص برداشت به نسبت دو پارامتر دیگر عملکرد ضعیف‌تری داشت؛ لیکن نتایج کلی نشان‌دهنده قابلیت مناسب این مدل در تعیین این دو پارامتر بود. مدل AquaCrop به خوبی توانست اثر سوپر جاذب بر عوامل مورد مطالعه

منابع

- آقایاری، ف.، ف. خلیلی و م. اردکانی. ۱۳۹۵. تأثیر کم‌آبیاری، آبیاری موضعی و پلیمر سوپر جاذب بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۳. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم، شماره ۱، ص ۱۴-۱.
- بابازده، ح. و سرایی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری سویا. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۲): ۳۲۹-۳۳۹.
- حسن‌لی، م.، پ. افراسیاب و ح. ابراهیمیان. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، سال چهارم و ششم، شماره ۳، ص ۴۹۸-۴۸۷.
- حیدری‌نیا، م.، ناصری، ع.، و برومندنسب، س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مجله مهندسی منابع آب. ۵(۱): ۳۹-۴۱.
- خرسند، ا.، وردی‌نژاد، و.، و شهیدی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبیاری. مدیریت آب و آبیاری. ۴(۱): ۱۰۴-۸۹.
- رحیمی‌خوب، ح.، ع. ستوده‌نیا و ع. مساح‌بوانی. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، سال اول، شماره ۸، ص ۱۱۵-۱۰۸.
- رضایی، ز.، رفیعی‌الحسینی، م.، و محمدخانی، ع. ۱۳۹۵. اثر نسبت‌های مختلف پلیمر سوپر جاذب و کود دامی بر برخی صفات مرفولوژیکی و تولید اسانس رازیانه تحت شرایط تنش خشکی. مجله به‌زراعی کشاورزی. زیر چاپ.
- روستایی، خ.، م. موحدی دهنوی، س. ع. خادم و ح. اولیایی. ۱۳۹۱. اثر نسبت‌های مختلف پلیمر سوپر جاذب و کود دامی بر خواص کمی و کیفی سویا تحت تنش خشکی. مجله به‌زراعی کشاورزی، سال چهاردهم، شماره ۱، ص ۴۲-۳۳.
- ضیایی، غ.، ح. بابازاده، ح. عباسی و ف. کاوه. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران، سال چهارم و پنجم، شماره ۴، ص ۴۴۵-۴۳۵.
- علیزاده، ح.، ع. ب. نظری، م. پارس‌نژاد، ه. رضانی اعتدالی و ح. ر. جانباز. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، سال بیست و چهارم، شماره ۲، ص ۲۸۳-۲۷۳.
- کوهستانی، ش.، عسکری، ن.، و مقصودی، ک. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر هیدروژل‌های سوپر جاذب بر روی عملکرد ذرت دانه‌ای تحت شرایط تنش خشکی. مجله پژوهش آب ایران. ۳(۵): ۷۸-۷۱.
- مجیدیان، م. و غدیری، ح. ۱۳۸۱. تأثیر تنش رطوبت و مقادیر مختلف کود نیتروژن در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد، کارایی استفاده از آب و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه ذرت. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۳(۳): ۵۳۳-۵۲۱.
- مجیدیان، م.، ا. فلاوند، ن. ع. کریمیان و ع. ا. کامکارحقیقی. ۱۳۸۷. تأثیر تنش رطوبت، کود شیمیایی نیتروژنه، کود دامی و تلفیقی از کود نیتروژن و کود دامی بر عملکرد، اجزای عملکرد، راندمان استفاده از آب ذرت سینگل کراس ۷۰۴. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره ۴۵، ص ۴۳۲-۴۱۷.

- محمدی، م.، ک. داوری، ب. قهرمان، ح. انصاری و ا. حق‌وردی. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی، سال بیست و نهم، شماره ۳، ص ۲۹۵-۲۷۷.
- مسلمی، ز. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر پلیمر سوپرجاذب و کودهای زیستی PGPR بر رشد و عملکرد ذرت تحت شرایط تنش خشکی و نرمال. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد واحد کرج. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.
- مؤذن قمصری، ب.، غ. ع. اکبری، م. ج. ظهوریان و ا. ب. نیک‌نیایی. ۱۳۸۸. بررسی عملکرد و شاخص‌های عملکرد رشد گیاه ذرت علوفه‌ای تحت تأثیر کاربرد مقادیر مختلف سوپرجاذب (سوپر آب A-200) تحت شرایط تنش خشکی. مجله علوم گیاهان زراعی ایران، سال چهارم، شماره ۳، ص ۸-۱.
- نورزاده حداد، م.، حسنی، ا.، و کرمی‌مقدم، م. ۱۳۹۶. بررسی و مقایسه کارایی استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب آکواسورب و اکسپتا در بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و عملکرد گوجه فرنگی در شرایط گلخانه. آب و خاک. ۳۱(۱). زیر چاپ.
- وطن‌خواه، ا. و ح. ابراهیمیان. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جوپچه. تحقیقات آب و خاک ایران، سال چهارم و هفتم، شماره ۳، ص ۵۰۴-۴۹۵.
- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M. H., Pathak, H., and Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110: 55-66.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.
- Andarzian, B., Bannayanb, M., Stedutoc, P., Mazraeha, H., Barati, M.E., Barati, M.A., 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.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barely. *Agricultural Water Management*. 97:1838-1846.
- Blum, F.A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*. 112: 119-123.
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.M.C.A. and 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 (No. 52). SC-DLO.
- Cheong, Y.H., Kim, K.N., Pandey, G.K., Gupta, R., Grant, J.J., and Luan, S. 2003. A calcium sensor that differentially regulates salt, drought and cold responses in Arabidopsis. *The Plant Cell*. 15:1833-1845.
- De Juan Valero, J. A. M., Maturano, A., Artigao, J. M., Ramirez, T. M. B., and Ortega, A. J. F. 2005. Growth and nitrogen use efficiency of irrigated maize in a semiarid region as affected by nitrogen fertilization. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 3(1): 134-144.
- Debaek, P and Aboudrare, A. 2004. A. 2009. Adaptions of crop manage to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*. 21: 433-446.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Rome. FAO.
- Farre, F., and Faci, J.M., 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96: 384-394.
- Fereres, E.M and Soriano, A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use: integrated approaches to sustain and improve plant production under drought stress special issue. *Journal of Botany*. 58:147-159.
- Geerts, S. and D. Raes. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96: 1275-1284.

- Green, C.H., Foster, C., Cardon, G.E., Butters, G.L., Brick, M., and Ogg, B., 2004. Water release from cross-linked polyacrylamide. Colorado State University, Ft. Collins, CO, p. 252-260.
- Heng, L. k., T. C. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize, *Agronomy Journal*, 101(3): 488-498.
- Horemans, J. A., Van Gaelaen, H., Raes, D., and Zenone, T. 2017. Can the agricultural AquaCrop model simulate water use and yield of a poplar short-rotation coppice?, *Bioenergy*, 9(6): 1151-1164.
- Hussein, F, Janat, M and Yakoub, A, 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4):1319-1330.
- Katerji, N., Campi, P., and Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*. 130: 14-26.
- Liu, J., Wiberg, D., Zehnder, A., and Yang, H., 2007. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity and production in China, *Irrigation Science*. 26:21-23.
- Masanganise J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E., and Mhizha, T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*. 3(4): 157-163.
- Nazarli, H., Zardashti, M.R. Darvishzadeh, R., and Najafi, S., 2010. The effect of water stress and polymer on water use efficiency, yield and several morphological traits of sunflower. *Not Sci. Biol*. 2(4): 53-58.
- Paredes, P. and M. O. Torres. 2017. Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. *Irrigation Science*, 35(1): 27-41.
- Pereira, L. S., Oweis, T., and Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*. 57: 175-206.
- 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. *Agronomy Journal* 101:438-447.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Freres. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Freres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Salemi, H., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., and Mousavi, S.F., Ganji, A., and KamilYusoff, M. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610: 2204-2215.
- 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.
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., and Maksimovic, L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi, S., Stockle, C. and Steduto, P. 2009. Asswssment of AQUACROP, cropsyst, and wofost models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*. 101: 509-521.
- Trajkovic, S., and Kolakovic, S. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resource Management* 23(14): 3057-3067.
- Westgate, M.E. 1994. Water status and development of the maize endosperm and embryo during drought, *Crop Science*. 34:76-83.
- Widiastuti, N., Wu, H., Ang, M., and Zhang, D.K., 2008. The potential application of natural zeolite for greywater treatment. *Desalination*. 218: 271- 280.

Wu, L., Liu, M., and Liang, R., 2008. Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Biores. Technol.* 99: 547-554.

Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water deficit and Superabsorbent application

Niaz Ali Ebrahimipak¹, Aslan Egdernezhad², Davoud Khodadadi Dehkordi³

Abstract:

Deficit irrigation and application of superabsorbent are methods to increase water use efficiency. Regarding the purpose, In order to simulate corn growth and yield by considering deficit irrigation and superabsorbent polymer application, AquaCrop model have been used due to its capabilities. This study was conducted as a split plot based on the randomized complete block design (with 12 treatments and three replicates) at a research field during 2016, in Ahvaz. Treatments consist of irrigation amount (in three levels; I1, I2 and I3 as 100, 75 and 50% irrigation demand, respectively) and superabsorbent polymer application (at four amounts; S0, S1, S2 and S3 as zero, 0.3, 0.6 and 0.8 g.kg⁻¹ soil, respectively). The greatest difference between simulated and measured output was obtained in I2S2 and the lowest one was measured in I1S0. Values of RMSE for grain yield, biomass, water use efficiency and harvest index were 0.72 ton.ha⁻¹, 1.35 ton.ha⁻¹, 0.2 kg.m⁻³ and 0.07, respectively. Values of MBE for mentioned parameters were -0.09 ton.ha⁻¹, 0.65 ton.ha⁻¹, -0.02 kg.m⁻³ and -0.01, respectively. NRMSE and d values ranged between 0.47-0.95 and 0.13-0.23, respectively. Values of EF and R² were also appropriated in this research. So, According to results, it is suggested to use this model for simulation of corn yield and growth.

Key words: Sensitive Analysis, Water Stress, Water Use Efficiency, Crop Modeling.

1- Associated professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2- Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3- Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.