

مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسط‌رس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی

شکوه کریمی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، محمد مهدی نخجوانی مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۵

چکیده

برای دستیابی به عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب مناسب برای ذرت دانه‌ای، نیاز است عوامل مختلفی از جمله مقدار آب آبیاری، رقم و تراکم کشت این محصول در مناطق مختلف کشور بررسی شود. به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های گیاهی پیشنهاد شده است. از این رو، به منظور ارزیابی مدل گیاهی SWAP، آزمایشی دو ساله (۸۶-۱۳۸۵) برای دو رقم ذرت دانه‌ای (V1 و V2) به ترتیب نشان دهنده ارقام متوسط‌رس SC500 و زودرس SC302 تحت تراکم‌های مختلف (D1، D2 و D3) به ترتیب نشان دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم SC500 و ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم SC302 با مقادیر مختلف آبیاری (I1، I2 و I3) به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد آبیاری) در شهرستان کرج انجام شد. نتایج نشان داد، در رقم V1، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3، مدل SWAP دقت بالاتری برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت داشت. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت دانه‌ای، دقت مدل SWAP برای رقم V2، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D2 و در شبیه‌سازی بهره‌وری آب، دقت این مدل برای هر دو رقم، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 مناسب‌تر از سایر تیمارها بود. به‌طور کلی، براساس آماره میانگین مربعات خطای نرمال شده، دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۱۴، ۰/۱۳ و ۰/۱۶ بود. کارایی این مدل نیز برای هر سه پارامتر ذکر شده در دسته عالی قرار داشت و مقدار آن برابر با ۰/۹۸ بود. بنابراین استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای تحت تیمارهای مذکور پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تراکم بوته، مدل‌سازی گیاهی، مقادیر آبیاری

مقدمه

ذرت دانه‌ای یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی است که سهم عمده‌ای در تأمین نیازهای غذایی کشور دارد. این گیاه زراعی سازگاری مناسبی برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد ولی کاهش مصرف آب آبیاری در زراعت این گیاه سبب کاهش عملکرد و زیست‌توده آن می‌شود. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران لازم است واکنش عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای نسبت به مقدار آب آبیاری در هر منطقه تعیین شود (یعقوب‌زاده و

همکاران، ۱۳۹۷؛ Ahmadede et al., 2014). اگر مقدار مصرف آب به‌صورت دقیق تعیین شود؛ می‌توان با مقدار آب کمتر محصول مناسبی برداشت کرد (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه میزان تراکم و نوع رقم ذرت دانه‌ای بر واکنش این گیاه به مقدار آب آبیاری اثرگذار است؛ تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب عوامل مناسب برای زراعت آن در هر منطقه دشوار می‌شود. اگر برای بررسی اثر هر تیمار بر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای آزمایش‌های مزرعه‌ای در هر منطقه انجام شود؛ وقت و هزینه بسیاری صرف می‌شود (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷). برای حل این مشکل، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی ارائه شده‌اند که با سرعت و دقت بالا امکان بررسی اثر تیمارهای مختلف بر گیاه زراعی را ممکن می‌سازند (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷).

مدل شبیه‌سازی گیاهی SWAP به منظور مدل‌سازی روابط خاک و آب و گیاه و اتمسفر در دانشگاه واگنینگن هلند بسط داده شد (Van Dam et al., 1997). به دلیل دقت و کارایی این مدل گیاهی، محققان بسیاری از آن برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
* نویسنده مسئول: (Email: a_eigder@ymail.com)

SALTMED بود ژائو و همکاران از مدل SWAP برای شبیه‌سازی رشد ذرت تحت شرایط کشت زیرپلاستیکی استفاده کردند و نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی ذرت مناسب بود. این محققان با بهبود مدل SWAP مجدداً شرایط مورد نظر را شبیه‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که دقت شبیه‌سازی مدل جدید حدود ۸۲ درصد بهبود یافت (Zhao et al., 2020). زیگر و همکاران از داده‌های ماهواره‌ای و مدل SWAP برای شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت کشت ذرت و برخی گیاهان زراعی استفاده کرده و دقت آن را مطلوب ارزیابی کردند (Zeyliger et al., 2019).

مرور منابع نشان داد که با وجود مطالعات کافی در خصوص دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت، تاکنون تحقیقی روی این مدل برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسط‌رس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی انجام نشده است. بنابراین تحقیق حاضر برای ارزیابی مدل SWAP تحت شرایط اشاره شده انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای

این آزمایش به صورت کرت‌های یکبار خرد شده^۳ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و هر تکرار شامل ۹ واحد آزمایشی طی دو سال (۸۶-۱۳۸۵) در شهرستان کرج اجرا گردید. تیمارها شامل رقم ذرت V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده رقم متوسط‌رس SC500 و زودرس SC302 (تحت سه سطح آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب براساس ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تراکم کشت (D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم میان‌رس و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم زودرس) بود (نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰). در هر دو سال انجام آزمایش در نیمه اول خرداد ماه زمین برای کشت آماده شد. عملیات کاشت به صورت دستی انجام شد. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها در روی هر ردیف نیز بسته به نوع تراکم متغیر بود. برای کاشت بذر از نشانگر چوب استفاده شد. در هر چاله تعداد ۳ عدد بذر کاشته شد و در مرحله ۸ برگی تنک شد. در هر تیمار، ۵ ردیف به طول ۱۲ متر کشت شد که سه خط وسط، اصلی و دو خط کناری حاشیه بودند (نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰). برای تعیین بافت و خصوصیات فیزیکی خاک محل انجام آزمایش نمونه‌هایی از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری گرفته شد (جدول ۱).

بهره‌وری آب استفاده کرده‌اند (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۳). از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات جنوبی و همکاران اشاره کرد. این محققان از مدل SWAP برای شبیه‌سازی برنج در شمال کشور تحت سناریوهای مختلف آبیاری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار میانگین مربعات خطای نرمال شده^۱ برای عملکرد برنج برابر با ۴/۹۴ درصد بود. به همین دلیل این محققان پیشنهاد کردند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری برای کشت برنج از این مدل استفاده شود (Jonubi et al., 2018). در تحقیقی دیگر، یانگ و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی زهکشی مزارع برنج استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت مدل SWAP برای این هدف قابل قبول بود (Yong et al., 2016). ما و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه پرداختند و نشان دادند که مقادیر RMSE و MRE برای عملکرد گندم به ترتیب برابر با ۲/۴ و ۸ درصد بود. براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی گندم قابل قبول پیشنهاد شد (Ma et al., 2011). در خصوص استفاده از مدل SWAP برای شبیه‌سازی ذرت دانه‌ای می‌توان به مطالعات بن فنت و همکاران اشاره کرد (Bonefant et al., 2010). این محققان از این مدل در شمال ایتالیا استفاده کردند. نتایج این تحقیق حاکی از این بود که دقت مدل SWAP برای برآورد رطوبت خاک در مزرعه مطلوب بود. بنفنت و بوما با توجه به دقت مدل SWAP، از این مدل برای شبیه‌سازی اثرات کمبود آب بر عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم برای سناریوهای مختلف استفاده کردند (Bonefante and Bouma, 2015). امیری از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شیراز استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای مورد نظر قابل قبول بود (Amiri, 2016). امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶) از مدل SWAP برای ارزیابی عملکرد ذرت دانه‌ای به میزان آب آبیاری استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده با داده‌های برداشت شده از مزرعه مطابقت داشت. همچنین با استفاده از آماره‌ی میانگین مربعات خطا^۲ نشان دادند که دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده بسیار بالا بود. حسن لی و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی ذرت در شرایط آب شور استفاده کردند. این محققان نشان دادند که ضریب تبیین برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برابر با ۰/۵۴ و دقت مدل بین ۱۹-۰/۳ درصد بود (Hassanli et al., 2016). ایشان از دو مدل AquaCrop و SALTMED نیز برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط مشابه استفاده کردند و گزارش کردند که دقت مدل SWAP بسیار بهتر از AquaCrop و مشابه مدل

1- Normalized Root Mean Square Error

2- Root Mean Square Error

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm ³)	رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی (%)	بافت خاک
۰-۲۰	۱/۳۶	۲۶/۳	لوم
۲۰-۴۰	۱/۴۲	۲۷	لوم
۴۰-۶۰	۱/۴۲	۲۸/۶	لوم

$$WP = \frac{Y}{W} \quad (2)$$

که در این معادله، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y عملکرد ذرت (کیلوگرم) و W مجموع بارندگی و آبیاری (متر مکعب) است. مقدار آب مصرفی برای دو رقم مورد استفاده در جدول‌های (۲) و (۳) و میانگین پارامترهای هواشناسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

مدل SWAP

در مدل SWAP، شبیه‌سازی رشد و تولید محصول به کمک فاکتورهای زراعی مشاهده‌ای در سطح مزرعه انجام می‌شود. در این مدل، دو روش ساده و تفضیلی برای مدل‌سازی گیاهان زراعی وجود دارد. یک مدل اختصاصی نیز برای شبیه‌سازی چمن در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش لازم بود اثر تراکم کاشت لحاظ شود؛ و این عامل بر پارامترهایی مانند کارایی تبدیل ماده جذب شده به ارگان‌های ذخیره‌ای و برگ اثر دارد، از مدل تفضیلی استفاده شد. در این مدل میزان جذب ناخالص از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$A_L = A_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\epsilon_{PAR} PAR_{L,a}}{A_{\max}}} \right) \quad (3)$$

در این رابطه، AL نرخ جذب ناخالص (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر متر مربع بر روز)، Amax نرخ جذب ناخالص در شرایط نوری اشباع

(کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر متر مربع بر روز)، ϵ_{PAR} کارایی مصرف نور (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر ژول) و PAR تشعشع فعال برای فتوسنتز است.

تحلیل حساسیت مدل و ارزیابی مدل

پیش از واسنجی مدل SWAP تحلیل حساسیت این مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه (۴) تعیین شد (Geerts et al., 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (4)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار

رطوبت‌سنجی خاک با دستگاه تراپم (TRImE-FM-2) ساخت شرکت IMKO انجام شد. این دستگاه رطوبت حجمی خاک را در لایه مورد نظر به روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی^۱ (Time domain reflectometry) و براساس میزان ثابت دی‌الکتریک خاک برآورد می‌کند. با توجه به خاک زراعی در مزرعه آزمایشی، رطوبت خاک با دستگاه تراپم تا عمق ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در لایه‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری قرائت گردید. برای آبیاری هر کرت فرعی از آبیاش برنجی قابل تنظیم مدل VYR 50 با مشخصات فنی؛ فشار کارکرد بین ۳ الی ۴/۵ اتمسفر، میزان آبدهی بین ۲۸ الی ۳۵ لیتر در دقیقه و شعاع پاشش بین ۱۰ الی ۱۵ متر، استفاده شد. بطوری‌که در هر یک از چهار گوشه فرعی و با فاصله ۱۲ متر از یکدیگر، یک آبیاش قرار گرفت. ارتفاع آبیاش نیز با توجه به ارتفاع گیاه در هر مرحله رشد متغیر بود. زمان آبیاری در تمامی تیمارهای آزمایشی بر اساس ۵۰ درصد متوسط میزان تخلیه مجاز رطوبتی، در مقدار رطوبت Qm، در تراکم‌های مختلف تیمار شاهد (تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی) در نظر گرفته شد. میزان آب مورد نیاز بر اساس کمبود رطوبت خاک (SMD) در عمق توسعه ریشه (Dz) تا حد ظرفیت زراعی (FC) تعیین و با استفاده از کنتور حجمی در اختیار گیاه قرار گرفت (رابطه ۱).

$$I_n = SMD = (FC - Q_m) \cdot D_z \quad (1)$$

پس از استقرار کامل بوته‌ها و کسب اطمینان از اینکه بوته‌ها خطرات اولیه (آفات خاکزی و سرمای اول فصل) را گذرانده‌اند، اقدام به تنک کردن بوته‌های اضافی گردید. در هر چاله فقط یک بوته باقی گذاشته شد. مقدار کود مصرفی براساس آزمون خاک‌شناسی محاسبه شد و کود فسفات آمونیوم به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار به اضافه نیمی از کود اوره مورد نیاز (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) پیش از کاشت مورد استفاده قرار گرفت. نیمی دیگر از کود اوره (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مرحله ۸-۹ برگی به صورت سرک به مزرعه داده شد. در این آزمایش به غیر از سم علف کش از هیچ‌گونه سمی جهت مبارزه با آفات و بیماری‌ها استفاده نشد. در انتهای فصل نیز عملیات برداشت انجام شد و عملکرد و زیست‌توده توسط ترازو در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای تعیین بهره‌وری آب از رابطه (۲) استفاده شد.

1- Time Domain Reflectometry

سال اول انجام شد. سپس صحت‌سنجی مدل SWAP با استفاده از داده‌های سال دوم صورت گرفت. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP، از آماره‌های 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 (R2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۵) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می باشد. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند (Geerts et al., 2009). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد.

پس از تحلیل حساسیت، واسنجی این مدل با استفاده از داده‌های

جدول ۲- میزان آب آبیاری برای ذرت رقم SC500

سال دوم				سال اول						
آب آبیاری (میلی‌متر)			تاریخ آبیاری	ج.ت	آب آبیاری (میلی‌متر)			تاریخ آبیاری	ج.ت	
تیمار ۷۵٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۱۰۰٪			تیمار ۷۵٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۱۰۰٪			
۱۲	۱۲	۱۲	۳/۲۶	۱	۱۱	۱۱	۱۱	۳/۲۵	۱	
۱۵	۱۵	۱۵	۳/۳۰	۲	۱۵	۱۵	۱۵	۳/۳۰	۲	
۱۵	۱۵	۱۵	۴/۱۰	۳	۱۵	۱۵	۱۵	۴/۸	۳	
۷/۳	۷/۳	۷/۳	۴/۱۳	۴	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۱۵	۴	
۱۱	۱۱	۱۱	۴/۱۹	۵	۴/۵	۷/۵	۶	۴/۱۹	۵	
۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۳	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۶	۶	
۷	۱۱	۹	۴/۳۰	۷	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۹	۷	
۱۰	۱۹	۱۴	۵/۲	۸	۱۵	۲۵	۲۰	۵/۳	۸	
۱۴	۲۵	۱۹	۵/۸	۹	۱۳	۲۲	۱۷/۵	۵/۷	۹	
۶	۱۲	۹	۵/۱۰	۱۰	۱۸	۳۰	۲۴	۵/۱۰	۱۰	
۱۲	۲۰	۱۶	۵/۱۳	۱۱	۲۰	۳۳	۲۷	۵/۲۱	۱۱	
۱۴/۵	۲۴	۱۹/۸	۵/۱۶	۱۲	۱۷	۲۸	۲۲	۵/۲۴	۱۲	
۱۰	۱۸	۱۴	۵/۲۱	۱۳	۲۳	۳۸	۳۰	۵/۲۸	۱۳	
۱۰	۱۶	۱۳	۵/۲۴	۱۴	۲۳	۳۸	۳۱	۶/۴	۱۴	
۲۰	۳۲	۲۶	۵/۲۷	۱۵	۱۸/۵	۲۹	۲۳/۵	۶/۹	۱۵	
۱۳	۲۱/۵	۱۷/۵	۵/۳۰	۱۶	۱۵	۲۵	۲۰	۶/۱۳	۱۶	
۱۸	۳۰	۲۴	۶/۳	۱۷	۲۲/۵	۳۷/۵	۳۰	۶/۲۱	۱۷	
۱۱/۷	۱۹/۵	۱۵/۶	۶/۶	۱۸	۱۸	۳۰	۲۴/۵	۶/۲۸	۱۸	
۱۶	۲۵	۲۱	۶/۱۰	۱۹	۱۸	۳۰	۲۴/۵	۷/۴	۱۹	
۱۲/۶	۲۰/۵	۱۶/۸	۶/۱۳	۲۰					۲۰	
۱۳/۵	۲۲	۱۷/۵	۶/۱۷	۲۱					۲۱	
۱۱/۳	۱۹	۱۵	۶/۲۰	۲۲					۲۲	
۲۴	۴۰	۳۲	۶/۲۶	۲۳					۲۳	
۱۹/۵	۳۳	۲۶	۷/۳	۲۴					۲۴	
۱۵	۲۵	۲۰	۷/۱۰	۲۵					۲۵	
۸	۱۴	۱۱	۷/۱۷	۲۶					۲۶	
۳۳۶/۴	۵۱۶/۸	۴۲۶/۵	جمع کل		۲۹۶/۵	۴۴۴	۳۷۱	جمع کل		
۷۷۸۷	۱۱۹۶۳	۹۸۱۳	حجم آب مصرفی درهکتار		۶۸۶۳	۱۰۲۷۸	۸۵۸۸	حجم آب مصرفی درهکتار		

جدول ۳- میزان آب آبیاری برای ذرت رقم SC302

سال دوم				سال اول				تاریخ آبیاری	پ.ت.ت
آب آبیاری (میلی‌متر)			تاریخ آبیاری	آب آبیاری (میلی‌متر)					
تیمار ۷۵٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۱۰۰٪		پ.ت.ت	تیمار ۷۵٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۱۰۰٪	پ.ت.ت	
۱۲	۱۲	۱۲	۳/۲۶	۱	۱۱	۱۱	۱۱	۳/۲۵	۱
۱۵	۱۵	۱۵	۳/۳۰	۲	۱۵	۱۵	۱۵	۳/۳۰	۲
۱۵	۱۵	۱۵	۴/۱۰	۳	۱۵	۱۵	۱۵	۴/۸	۳
۷/۳	۷/۳	۷/۳	۴/۱۳	۴	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۱۵	۴
۱۱	۱۱	۱۱	۴/۱۹	۵	۷	۱۱	۹	۴/۱۹	۵
۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۳	۶	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۶	۶
۷	۱۱	۹	۴/۳۰	۷	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۲۹	۷
۱۰	۱۹	۱۴	۵/۲	۸	۱۸	۳۰	۲۴	۵/۳	۸
۱۴	۲۵	۱۹	۵/۸	۹	۱۶	۲۷	۲۷	۵/۷	۹
۶	۱۲	۹	۵/۱۰	۱۰	۱۶	۲۶	۲۱	۵/۱۰	۱۰
۱۲	۲۰	۱۶	۵/۱۳	۱۱	۲۱	۳۵	۲۸	۵/۲۱	۱۱
۱۴/۵	۲۴	۱۹/۸	۵/۱۶	۱۲	۱۷	۲۸	۲۲	۵/۲۴	۱۲
۱۰	۱۸	۱۴	۵/۲۱	۱۳	۲۲/۵	۳۹	۳۱	۵/۲۸	۱۳
۱۰	۱۶	۱۳	۵/۲۴	۱۴	۲۳	۳۸	۳۱	۶/۴	۱۴
۲۰	۳۲	۲۶	۵/۲۷	۱۵	۱۸/۵	۲۹	۲۳/۵	۶/۹	۱۵
۱۳	۲۱/۵	۱۷/۵	۵/۳۰	۱۶	۱۹/۵	۳۲/۵	۲۶	۶/۱۳	۱۶
۱۸	۳۰	۲۴	۶/۳	۱۷	۲۲/۵	۳۷/۵	۳۰	۶/۲۱	۱۷
۱۱/۷	۱۹/۵	۱۵/۶	۶/۶	۱۸	۱۸	۳۰	۲۴/۵	۶/۲۸	۱۸
۱۶	۲۵	۲۱	۶/۱۰	۱۹	۱۸	۳۰	۲۴/۵	۷/۴	۱۹
۱۲/۶	۲۰/۵	۱۶/۸	۶/۱۳	۲۰					۲۰
۱۳/۵	۲۲	۱۷/۵	۶/۱۷	۲۱					۲۱
۱۱/۳	۱۹	۱۵	۶/۲۰	۲۲					۲۲
۲۴	۴۰	۳۲	۶/۲۶	۲۳					۲۳
۱۹/۵	۳۳	۲۶	۷/۳	۲۴					۲۴
۱۵	۲۵	۲۰	۷/۱۰	۲۵					۲۵
۸	۱۴	۱۱	۷/۱۷	۲۶					۲۶
۳۳۶/۴	۵۱۶/۸	۴۲۶/۵	جمع کل		۳۰۹	۴۶۴	۳۸۶/۵	جمع کل	
۷۷۸۷	۱۱۹۶۳	۹۸۷۳	حجم آب مصرفی درهکتار		۷۱۵۳	۱۰۷۴۱	۸۹۴۷	حجم آب مصرفی درهکتار	

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۸)$$

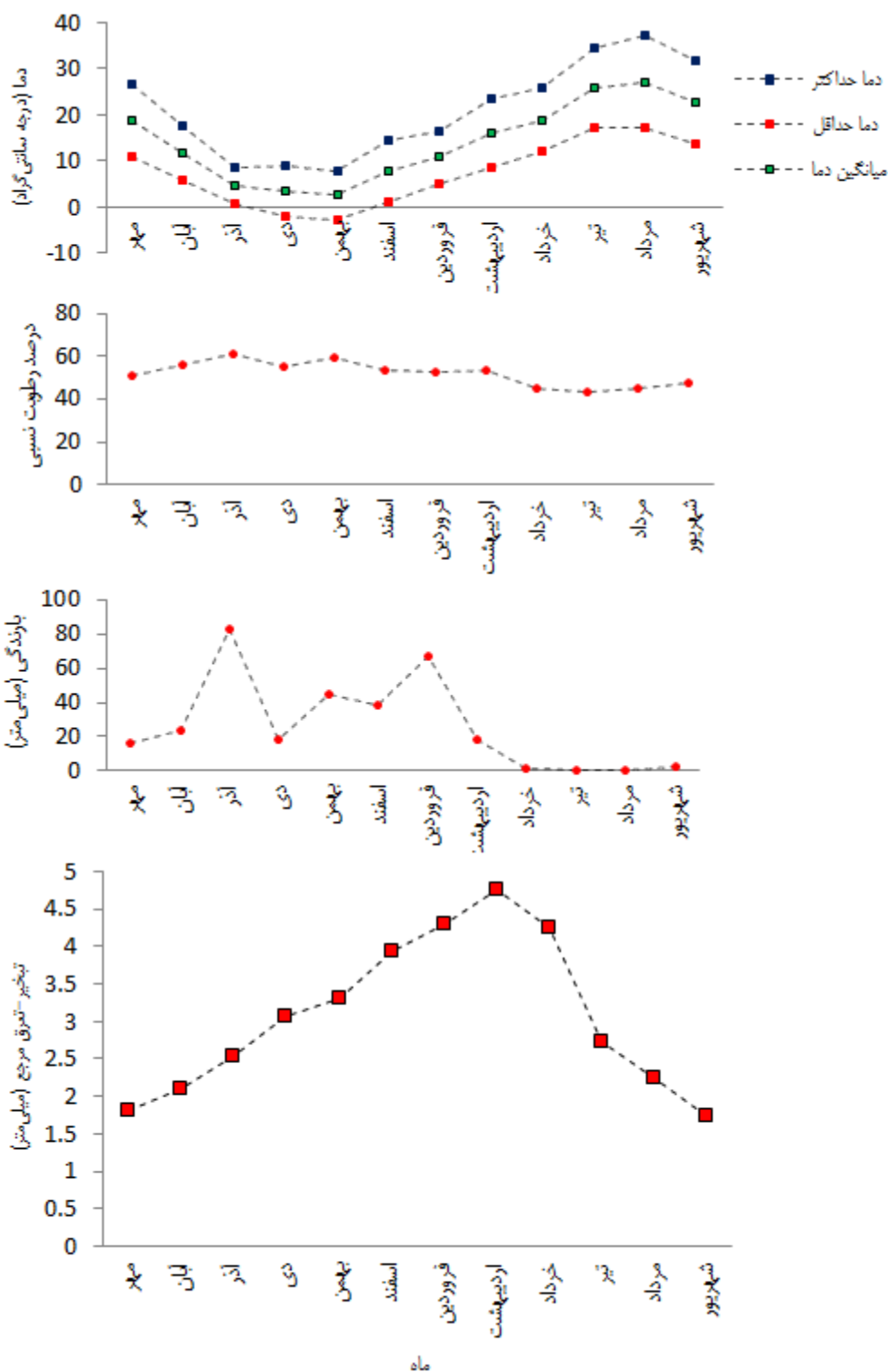
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۹)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (۶)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (۷)$$



شکل ۱- میانگین ماهیانه پارامترهای هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل است. هم چنین

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار مشاهداتی، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی و n

این مدل انجام شد. در مرحله واسنجی، مدل SWAP برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب به ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی، کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی شد (جدول ۵). دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد دانه و زیست‌توده خوب و برای شبیه‌سازی پارامتر بهره‌وری آب عالی بود. کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر مورد مطالعه مطلوب بود. بنابراین، مقادیر به دست آمده برای پارامترهای واسنجی شده (جدول ۶) به منظور صحت‌سنجی مدل SWAP با استفاده از داده‌های سال دوم مورد استفاده قرار گرفت.

عملکرد دانه

نتایج صحت‌سنجی عملکرد دانه ذرت به همراه مقادیر مشاهداتی آن در جدول (۷) نشان داده شده است. کمینه، بیشینه و متوسط مقادیر مشاهداتی عملکرد دانه ذرت به ترتیب برابر با ۶/۷۹، ۱۱/۶۲ و ۹/۰۸ تن در هکتار بود. همین مقادیر برای عملکرد دانه شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۶/۶، ۱۱/۶ و ۸/۹۸ تن در هکتار به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه ذرت برابر با ۰/۶۸ تن در هکتار تعیین شد.

مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی SWAP مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچکتری به دست داده‌اند. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R2 نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت و واسنجی

پیش از واسنجی مدل SWAP، حساسیت این مدل به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل SWAP نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی حساسیت متوسط داشت (جدول ۴). به همین دلیل این پارامترها برای واسنجی مدل SWAP مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های سال اول، واسنجی

جدول ۴- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت

عامل	مقدار Sc در حالت +۰/۲۵	مقدار Sc در حالت -۰/۲۵	درجه حساسیت
بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه	۱/۷	۲/۵	کم-متوسط
بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه	۴/۸	۳/۰	متوسط
ضریب ناپودی نور پخش شده	۲/۱	۱/۵	متوسط-کم
ضریب ناپودی نور مستقیم	۲/۰	۲/۶	متوسط
وزن خشک اولیه گیاه	۱/۹	۲/۳	کم-متوسط
شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی	۲/۲	۱/۰	متوسط-کم
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۱/۵	۱/۴	کم
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۳/۲	۲/۷	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۳/۴	۸/۹	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۳/۱	۳/۹	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۲/۸	۱/۱	متوسط-کم
آستانه پایین دما برای مرگ برگ‌ها	۱/۹	۲/۵	کم-متوسط

جدول ۵- مقایسه آماری نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل SWAP در مرحله واسنجی

پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه (تن در هکتار)	۰/۰۶	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۹۹	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	-۱/۱۹	۲/۰۰	۰/۱۲	۰/۹۸	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹

جدول ۶- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل SWAP

توضیح عامل	واحد	مقدار	
		KSC 302	KSC 500
بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه	سانتی متر	-۲۰	-۲۰
بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه	سانتی متر	-۲۵	-۲۵
ضریب نابودی نور پخش شده	-	۰/۶	۰/۶
ضریب نابودی نور مستقیم	-	۰/۶	۰/۶
وزن خشک اولیه گیاه	کیلوگرم بر هکتار	۵۰	۵۰
شاخص سطح برگ در جوانه زنی	متر مربع بر متر مربع	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
کارایی مصرف نور برای یک برگ	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	۰/۴۵	۰/۴۵
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	کیلوگرم بر کیلوگرم	۰/۶۷۵	۰/۶۷۰
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌های	کیلوگرم بر کیلوگرم	۰/۶۶۰	۰/۶۵۱
کارایی ماده جذب شده به ریشه	کیلوگرم بر کیلوگرم	۰/۶۹۰	۰/۶۹۰
کارایی ماده جذب شده به ساقه	کیلوگرم بر کیلوگرم	۰/۶۵۸	۰/۶۵۸
آستانه پایین دما برای مرگ برگ‌ها	درجه سانتی‌گراد	۱۰	۱۰
دمای تجمعی از گلدهی تا بلوغ	درجه سانتی‌گراد	۶۹۵	۷۷۰
دمای تجمعی از جوانه‌زنی تا گلدهی	درجه سانتی‌گراد	۸۰۰	۸۶۵
مقدار رطوبت باقیمانده	سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب	۰/۰۱	۰/۰۱
مقدار رطوبت اشباع	سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب	۰/۴۲	۰/۴۲
هدایت هیدرولیکی اشباع	سانتی متر بر روز	۱/۱۰	۱/۱۰
پارامتر α	-	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰
پارامتر n	-	۱/۱	۱/۱

و بیشینه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه ذرت در رقم SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۹ تن در هکتار و در رقم SC500 به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۱/۰۲ تن در هکتار به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ذرت برای این دو رقم به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۱/۰ تن در هکتار بود.

بنابراین نتیجه می‌توان گرفت که خطای مدل SWAP در برآورد عملکرد دانه قابل قبول بود. این نتایج از مقادیر خطای اعلام شده توسط محققان دیگر از جمله بنفنت و بوما، امیری و جنوبی کمتر بود (Bonefante and Bouma, 2015; Amiri, 2016 and Jonubi et al., 2018). کمتر بود. احتمالاً علت آن واسنجی بهتر مدل SWAP در این تحقیق بود. با این وجود، این محققان دقت مدل SWAP را در محدوده به دست آمده قابل قبول گزارش کردند. تفکیک تیمارهای مختلف در جدول (۸) نشان داده شده است. کمینه

جدول ۷- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت (تن در هکتار) با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد؛ D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۶/۸	۷/۹	۱/۸	V2I1D1	۶/۹	۶/۷	۰/۴
V1I1D2	۶/۹	۸/۲	۲/۲	V2I1D2	۷/۰	۷/۵	۰/۸
V1I1D3	۶/۹	۸/۱	۲/۰	V2I1D3	۶/۷	۷/۴	۱/۰
V1I2D1	۸/۳	۶/۶	۳/۱	V2I2D1	۹/۶	۸/۷	۱/۵
V1I2D2	۷/۷	۶/۹	۱/۴	V2I2D2	۹/۰	۸/۹	۰/۳
V1I2D3	۸/۵	۹/۳	۱/۳	V2I2D3	۱۰/۳	۱۱/۲	۱/۵
V1I3D1	۱۰/۲	۸/۹	۲/۲	V2I3D1	۱۰/۱	۱۰/۶	۰/۸
V1I3D2	۱۰/۵	۹/۷	۱/۵	V2I3D2	۱۱/۰	۱۱/۱	۰/۱
V1I3D3	۱۰/۲	۱۰/۳	۱/۲	V2I3D3	۱۱/۶	۱۱/۶	۰/۰

براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی رقم SC302 بیشتر از رقم SC500 بود. چون این تحقیق در تابستان انجام شد و مدل SWAP به پارامترهای مرتبط با دما و جذب نور حساسیت زیادی دارد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۷)؛ دقت این مدل برای شبیه‌سازی رقم زودرس SC302 بهتر بود. کمینه اختلاف بین مقادیر عملکرد دانه ذرت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۰/۲۳، ۰/۱۸ و ۰/۰۲ تن در هکتار بود. بیشینه اختلاف به دست آمده برای تیمارها مذکور نیز به ترتیب برابر با ۱/۲۷، ۱/۷۸ و ۱/۳ تن بر هکتار به دست آمد. متوسط این اختلاف برای این تیمارها به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۷ و ۰/۴۶ تن در هکتار تعیین شد. این نتایج نشان داد که گرچه رابطه منظمی بین مقدار آب آبیاری و دقت مدل SWAP وجود نداشت؛ با این وجود در تیمار آبیاری بیش از حد نیاز (I3)، مدل

دقت بهتری نسبت به سایر تیمارها داشت. این نتایج با مشاهدات امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶)، حسن لی و همکاران (Hasanli et al., 2016) و ژائو و همکاران (Zhao et al., 2020) مطابقت داشت. روند منظمی بین مقدار تراکم و دقت مدل SWAP مشاهده شد. با افزایش مقدار تراکم بوته، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ذرت کاهش یافت. با توجه به کربن محور بودن مدل SWAP، علت آن تبدیل بیشتر انرژی دریافتی خورشید به کربن (عملکرد) است. متوسط اختلاف عملکرد دانه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای تیمارهای D1، D2 و D3 به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۶۱ و ۰/۵۸ تن در هکتار به دست آمد.

جدول ۸- مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین عملکرد دانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

پارامتر	تیمارها	کمینه	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه‌سازی	درصد خطا
رقم	V1	-۰/۰۸	۳/۳۰	۸/۵	۸/۴	۰/۱
	V2	-۰/۰۸	۲/۴۷	۹/۲	۹/۳	۰/۲
مقدار آبیاری	I1	-۰/۰۸	۳/۳۰	۶/۹	۷/۶	۰/۰
	I2	-۰/۱۲	۳/۶۸	۸/۹	۸/۶	۰/۱
	I3	-۰/۰۸	۱/۸۶	۱۰/۶	۱۰/۴	۰/۲
تراکم	D1	-۰/۱۶	۳/۶۸	۸/۷	۸/۲	۰/۲
	D2	-۰/۰۸	۱/۶۷	۸/۷	۸/۷	۰/۲
	D3	-۰/۰۸	۱/۷۳	۹/۱	۹/۷	۰/۲

جدول ۹- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده زیست‌توده ذرت با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۱۵/۲	۱۱/۹	۵/۸	V2I1D1	۱۴/۰	۱۳/۲	۰/۱
V1I1D2	۱۴/۰	۱۳/۲	۱/۴	V2I1D2	۱۲/۷	۱۴/۴	۰/۳
V1I1D3	۱۲/۷	۱۴/۴	۳/۰	V2I1D3	۱۹/۵	۱۵/۸	۴/۰
V1I2D1	۱۹/۵	۱۵/۸	۶/۵	V2I2D1	۱۷/۳	۱۶/۴	۰/۲
V1I2D2	۱۷/۳	۱۶/۴	۱/۶	V2I2D2	۱۶/۳	۱۷/۸	۲/۷
V1I2D3	۱۶/۳	۱۷/۸	۲/۶	V2I2D3	۲۰/۸	۲۱/۰	۳/۲
V1I3D1	۲۰/۸	۲۱/۰	۰/۳	V2I3D1	۲۰/۵	۲۱/۱	۲/۹
V1I3D2	۲۰/۵	۲۱/۱	۰/۹	V2I3D2	۲۰/۹	۲۱/۹	۲/۲
V1I3D3	۲۰/۹	۲۰/۹	۰/۱	V2I3D3			

زیست توده

بیشینه، کمینه و متوسط مقادیر زیست توده مشاهداتی ذرت به ترتیب برابر با ۱۲/۶، ۲۲/۱ و ۱۷/۹۸ تن در هکتار به دست آمد (جدول ۸). این مقادیر برای زیست توده شبیه سازی شده به ترتیب برابر با ۱۱/۹، ۲۱/۰۸ و ۱۷/۴۸ تن در هکتار بود. کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی زیست توده ذرت به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۳/۶۸ و ۱/۲۴ تن در هکتار بود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که دقت مدل SWAP برای شبیه سازی زیست توده ذرت قابل قبول بود. این نتایج با گزارش منتشر شده توسط Zhao et al., (۲۰۲۰) مطابقت داشت.

تفکیک تیمارها به صورت رقم، مقدار آب آبیاری و تراکم بوته در جدول (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی برای رقم SC500

به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۳/۳۰ و ۱/۴۱ تن بر هکتار و برای رقم SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۲/۴۷ و ۱/۱۱ تن بر هکتار بود. براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه سازی زیست توده رقم SC302 بهتر از رقم SC500 بود. کمینه اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی زیست توده ذرت برای تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تن در هکتار به دست آمد. بیشینه اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی زیست توده ذرت برای تیمارهای مذکور به ترتیب برابر با ۳/۶۸، ۳/۳۰ و ۱/۸۶ تن در هکتار بود. متوسط این اختلاف نیز به ترتیب برابر با ۱/۱۵، ۱/۷۱ و ۰/۹۳ تن در هکتار تعیین شد. لیکن دقت مدل SWAP در تیمار I3 بیشتر از دو تیمار دیگر بود. تغییر تراکم بوته اثر منظمی بر دقت مدل SWAP نداشت. با این وجود، کمترین دقت شبیه سازی زیست توده ذرت در تراکم D1 کمتر از دو تراکم دیگر بود.

جدول ۱۰ - مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین زیست توده مشاهداتی و شبیه سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده

ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده

تراکم های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

پارامتر	تیمارها	کمینه	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه سازی	درصد خطا
رقم	V1	۰/۰۷	۱/۰۲	۱۷/۵	۱۶/۹	۰/۳
	V2	۰/۰۲	۰/۹	۱۷/۹	۱۷/۲	۰/۳
مقدار آبیاری	I1	۰/۲۳	۱/۲۷	۱۳/۹	۱۳/۳	۰/۱
	I2	۰/۱۸	۱/۷۸	۱۷/۸	۱۷/۲	۰/۲
	I3	۰/۰۲	۱/۳	۲۱/۳	۲۰/۶	۰/۰
تراکم	D1	۰/۲۳	۱/۷۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۰/۴
	D2	۰/۰۹	۱/۲۷	۱۷/۶	۱۷/۱	۰/۴
	D3	۰/۰۲	۱/۱۸	۱۷/۱	۱۷/۷	۰/۳

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه سازی شده ذرت دانه‌ی در جدول (۱۱) نشان داده شده است. کمترین، بیشترین و متوسط مقادیر بهره‌وری آب مشاهداتی به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۱/۱۰ و ۰/۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر با استفاده از مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۷۴، ۱/۱۸ و ۰/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب شبیه سازی شده و کمترین، بیشترین و متوسط اختلاف مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۲۲۲ و ۰/۰۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. مقایسه نتایج به دست آمده براساس تفکیک تیمارها در جدول (۱۲) نشان داده شده است. متوسط عملکرد رقم‌های SC500 و SC302 به ترتیب برابر با ۸/۵ و ۹/۲ تن در هکتار بود (جدول ۷). همچنین براساس جدول (۸)، اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه سازی شده برای هر دو رقم مورد مطالعه بسیار کم بود. با این وجود، چون رقم SC302 به مقدار آب

بیشتری برای رشد نیاز داشت، دقت مدل SWAP برای شبیه سازی بهره‌وری آب هر دو رقم مورد مطالعه تقریباً یکسان بود (جدول ۱۲). افزایش مقدار آب آبیاری نیز سبب کاهش اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی شد. این روند برای تراکم بوته نیز مشاهده گردید.

مقایسه کلی

مقایسه آماری نتایج شبیه سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه، زیست توده و بهره‌وری آب ذرت در مرحله صحت سنجی در جدول (۱۳) نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل SWAP در شبیه سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب دچار خطای بیش برآوردی و در شبیه سازی زیست توده ذرت دانه‌ای دچار خطای کم برآوردی شد. دقت این مدل در شبیه سازی عملکرد دانه ذرت، براساس آماره‌های NRMSE و RMSE، در رتبه خوب قرار داشت. کارایی این مدل

برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت مطلوب بود. این نتایج با مشاهدات Bonifante and Bouma (2015)، Amiri (2016) و Jonubi et al. (2018) مطابقت داشت. دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت در رتبه خوب قرار داشت. کارایی این مدل نیز برای شبیه‌سازی این دو پارامتر مطلوب بود.

جدول ۱۱- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب ذرت با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۰/۹۴	۱/۰۷	۲/۲	V2I1D1	۰/۹۳	۱/۱۶	۳/۹
V1I1D2	۰/۹۵	۱/۱۱	۲/۸	V2I1D2	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۰
V1I1D3	۰/۹۴	۱/۱۰	۲/۷	V2I1D3	۰/۹۳	۰/۹۹	۱/۰
V1I2D1	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۳	V2I2D1	۱/۰۱	۱/۱۵	۲/۳
V1I2D2	۰/۸۳	۰/۷۴	۱/۷	V2I2D2	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۰
V1I2D3	۰/۹۲	۱/۰۰	۱/۳	V2I2D3	۱/۱۰	۱/۱۸	۱/۳
V1I3D1	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۵	V2I3D1	۰/۸۹	۰/۹۵	۱/۰
V1I3D2	۰/۹۴	۰/۸۷	۱/۳	V2I3D2	۰/۹۷	۱/۰۹	۱/۹
V1I3D3	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۰	V2I3D3	۱/۰۲	۱/۰۴	۰/۰

جدول ۱۲- مقادیر کمیته، بیشینه و متوسط اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

پارامتر	تیمارها	کمیته	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه‌سازی	درصد خطا
رقم	V1	۰/۰۰۱	۰/۱۲۷	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳
	V2	۰/۰۱۲	۰/۲۲۲	۰/۰۸۲	۰/۰۸۲	۰/۰۸۲
مقدار آبیاری	I1	۰/۰۲۳	۰/۲۲۲	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
	I2	۰/۰۲۱	۰/۱۳۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴
	I3	۰/۰۰۱	۰/۱۱۳	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
تراکم	D1	۰/۰۲۱	۰/۲۲۲	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸
	D2	۰/۰۲۳	۰/۱۶۴	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵
	D3	۰/۰۰۱	۰/۱۵۷	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳

جدول ۱۳- مقایسه آماری نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل SWAP در مرحله صحت‌سنجی

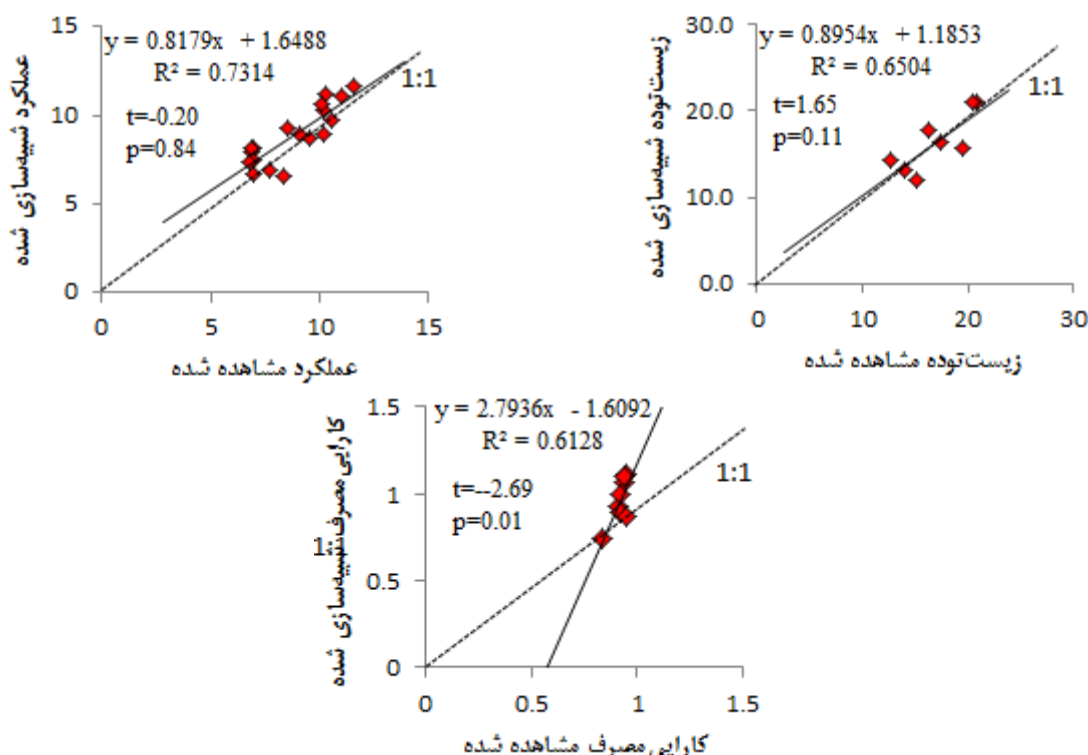
پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه (تن در هکتار)	۰/۰۹	۱/۳۹	۰/۱۴	۰/۹۸	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	-۱/۳۸	۲/۴۶	۰/۱۳	۰/۹۸	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۹

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس ضریب تبیین به دست آمده برای هر سه پارامتر، مدل SWAP توانایی لازم برای تطبیق نتایج عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت با مقادیر مشاهداتی را داشت. معادله خط حاصل از رگرسیون بین عملکرد دانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس ضریب تبیین به دست آمده برای هر سه پارامتر، مدل SWAP توانایی لازم برای تطبیق نتایج عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت با مقادیر مشاهداتی را داشت. معادله خط حاصل از رگرسیون بین عملکرد دانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل

تعیین شد. بنابراین، در صورت استفاده از این مدل برای شرایط کم آبیاری و یا دیم، احتمالاً مقدار زیست توده بیشتر از مقدار واقعی شبیه سازی می شود. براساس آزمون t ، تفاوت معنی داری بین واریانس های عملکرد و زیست توده مشاهداتی و شبیه سازی وجود نداشت. لیکن بین بهره وری آب مشاهداتی و شبیه سازی تفاوت معنی داری وجود داشت. در نتیجه، اختلاف معنی داری بین همبستگی به دست آمده برای عملکرد و زیست توده مشاهده نشد ولی اختلاف معنی داری بین همبستگی به وجود بهره وری آب وجود داشت.

پارامتر بیشتر از مقدار واقعی شد. با توجه به اینکه در اکثر تیمارهای مورد مطالعه مقدار بهره وری آب بیشتر از این مقدار بود، خطای کلی برای شبیه سازی این پارامتر از نوع بیش برآوردی محاسبه شد. در شبیه سازی زیست توده ذرت، تا مقدار ۱۱/۳۳ تن در هکتار، این مدل دچار خطای بیش برآوردی شد. برای مقادیر بیشتر از این مقدار، خطای مدل SWAP از نوع کم برآوردی بود. با توجه به اینکه مقدار زیست توده مشاهداتی ذرت در همه تیمارها بیشتر از این مقدار بود، بنابراین خطای محاسبه شده برای زیست توده ذرت از نوع کم برآوردی



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده عملکرد، زیست توده و بهره وری آب ذرت با مدل SWAP؛ نتایج آزمون t و سطح معنی داری (مقدار p) بر روی نمودار نشان داده شده است.

شبیه سازی زیست توده ذرت دانه ای دچار خطای کم برآوردی شد. خطای مدل SWAP برای شبیه سازی هر سه پارامتر ذکر شده خوب بود. کارایی مدل SWAP برای شبیه سازی این پارامترها مطلوب بود. بنابراین می توان از این مدل گیاهی برای شبیه سازی عملکرد، زیست توده و بهره وری آب در شرایط مورد نظر استفاده کرد.

منابع

ابراهیمی پاک، ن.ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم آبیاری و مصرف زئولیت. حفاظت

نتیجه گیری

این تحقیق به منظور ارزیابی مدل SWAP برای شبیه سازی اثر رقم، تراکم و مقدار آب آبیاری بر عملکرد، زیست توده و بهره وری آب ذرت دانه ای انجام شد. برای شبیه سازی عملکرد دانه، مدل SWAP دقت بالایی برای رقم V1، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 داشت. در شبیه سازی زیست توده ذرت دانه ای، دقت مدل SWAP برای رقم V2، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D2 و در شبیه سازی بهره وری آب، دقت این مدل برای هر دو رقم، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 مناسب تر از سایر تیمارها بود. به طور کلی، این مدل گیاهی در شبیه سازی عملکرد و بهره وری آب دچار خطای بیش برآوردی و در

- منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۳۲-۱۱۷.
- احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع. و سیاری، م.ج. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Corocus sativus L.*) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم‌شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۲۰-۵۰۵.
- اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۶۴-۵۳.
- امیری، ا.، و شیرشاهی، ف. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد ذرت دانه‌ای به مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۱(۴): ۷۷۴-۷۵۹.
- بادیه‌نشین، ع.، نوری، ح. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۳۸۸-۳۷۹.
- شفیعی، م.، قهرمان، ب.، ثقفیان، ب.، داوری، ک. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۷. تحلیل حساسیت جامع پارامترهای گیاهی مدل WOFOST برای گیاهان ذرت و گندم در شبیه‌سازی عملکرد محصول. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۴): ۸۳۹-۸۳۱.
- شهیدی، ع.، و احمدی، م. ۱۳۹۳. آموزش تصویری مدل SWAP. انتشارات کلک زرین.
- شهیدی، ع.، و احمدی، م. ۱۳۹۴. توابع تولید گیاهی در مناطق خشک. انتشارات دانشگاه بیرجند.
- علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارس‌نژاد، م.، رضانی‌اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. آبیاری و زهکشی ایران. ۴: ۲۸۳-۲۷۳.
- محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، انصاری، ح.، و حق‌وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۳): ۲۹۵-۲۷۷.
- نخجوانی‌مقدم، م.م.، دهقانی‌سانبج، ح.، اکبری، م.، و صدرقائن، س.ح. ۱۳۸۹. اثر سطوح مختلف آب بر کارایی مصرف آب رقم ذرت دانه‌ای زودرس ۳۰۲ در روش آبیاری بارانی. آب و خاک. ۳۴(۶): ۱۲۴۵-۱۲۳۶.
- نخجوانی‌مقدم، م.م.، نجفی، ا.، صدرقائن، س.ح. و فرهادی، ا. ۱۳۹۰. اثر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته بر عملکرد و اجزا عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۳۰۲.
- به‌زرعی نهال و بذر (نهال و بذر). ۲۷-۲۸(۱): ۹۰-۷۳.
- وطن‌خواه، ا.، و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جوپچه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۵۰۴-۴۹۵.
- یعقوب‌زاده، م.، احمدی، م.، سیدکابلی، ح.، زمانی، غ. و امیرآبادی‌زاده، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های ETDI و SPI. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۴): ۶۱-۴۳.
- Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., and Hashemi, S.R., 2014. The effect of magnetic water and calcific and potasic zeolite on the yield of *Lepidium Sativum L.*, International journal of Advanced Biological and Biomedical Research 2(6): 2051-2060.
- Amiri, E. 2017. Evaluation of water schemes for maize under arid are in Iran using the SWAP model. Communications in Soil Science and Plant Analysis 48(16): 1963-1976.
- Bonefante, A., Basile, A., Acutis, M., Mascellis, R. De., Manna, P., Perego, A., and Terribile, F. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in northern Italy. Agricultural Water Management 97(7): 1051-1062.
- Bonefante, A., and Bouma, J. 2015. The role of soil series in quantitative land evaluation when expressing effects of climate change and crop breeding on future land use. Geroderma 250-260: 187-195.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., and Cusicanqui, JA. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. Agronomy 101: 499-508.
- Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A., and Shokouhi, A. 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. Agricultural Water Management 176: 91-99.
- Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., and Salemi, H. 2017. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. Paddy and Water Environment 16(1): 125-141.
- Ma, Y., Feng, Sh., Huo, Z., and Song, X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. Mathematical and Computer Modeling 54(3-4): 1044-1052.
- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., and van Diepen, C.A. 1997. Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University,

agrocoenosis using the SWAP model and ground and monitoring data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 16(3): 33-43.

Zhao, Y., Mao, X., and Shukla, M.K. 2020. Heat dynamics and seed-maize growth under film mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*. 108127: 292-293.

167 pp.

Yung, K., Anan, M., and Hamada, K. 2016. Evaluation of drainage ability of a shallow subsurface drain in a rotational rice paddy field. *CIGR-AgEng Conference*, 26-29 June 2016, Aarhus, Denmark. Pp. 1-9.

Zeyliger, A.M., Ermolaeva, O.S., Muzylev, E.L., Startseva, Z.P., and Sukharev, Yu.I. 2019. Computer analysis of water stress regimes of an irrigated

Evaluation of SWAP for Simulation of Median and Early Corn Cultivar under Different Plant Densities under Sprinkler Irrigation

Sh. Karimi¹, A. Egdernezhad^{2*}, M.M. Nakhjavanimoghaddam³

Received: Oct.25, 2020

Accepted: Dec.05, 2020

Abstract

Corn is one of the most important agricultural crops in Iran. In order to achieve appropriate yield, biomass and water use efficiency, it is necessary to evaluate the effect of irrigation amounts, cultivar types and plant densities on corn yield. Because of time-consuming and high cost in field studies, crop models have been proposed to study mentioned scenarios. In order to evaluate SWAP, a field study was conducted on two maize cultivars (V1 and V2 representing median cultivar SC500 and early cultivar Sc302, respectively) under different plant densities (D1, D2 and D3 representing 75000, 85000 and 95000 plants.ha⁻¹, respectively, for SC500 and 80000, 90000 and 100,000 plants.ha⁻¹ for SC302 cultivar) with different irrigation volumes (I1, I2 and I3 indicate as 75, 100 and 125% irrigation demand, respectively) in Karaj during two years (2006-2007). Results showed that SWAP had the best accuracy to simulate corn yield in V1, I3 and D3 in comparison to other treatments. SWAP accuracy was better in V2, I3 and D2 treatments for simulation of corn biomass. The model precision for water productivity was better in both cultivars, I3 and D3. In general, based on normalized root mean square error, the model accuracy for simulation of corn yield, biomass and water productivity were 0.14, 0.13 and 0.16, respectively. SWAP efficiencies for mentioned parameters, with values equal to 0.98, were acceptable. So, it is proposed to use SWAP for simulation of yield, biomass and water use efficiency under above mentioned treatments.

Keywords: Copping model, Irrigation amount, Plant densities, Water productivity

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

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

3- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)