

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در مدیریت‌های مختلف آب و کود

کریم نیسی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، فریبرز عباسی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

چکیده

هدف این پژوهش ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب آبیاری و کود نیتروژن بود. بدین منظور، از داده‌های دو طرح تحقیقاتی مجزا، که در بخشی از مزارع پژوهشی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر انجام شده بود، استفاده گردید. در آزمایش اول عوامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3: ۶۰ درصد نیاز کودی و N4: شاهد) و زمان تقسیط کود در دو روش (T1: سه تقسیط و T2: چهار تقسیط مساوی) و در آزمایش دوم مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: ۱۲۰، W2: ۱۰۰، W3: ۸۰ و W4: ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در چهار مقدار (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3: ۶۰ و N4: صفر درصد نیاز کودی) بررسی شدند. نتایج آماره RMSE نشان داد که مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در آزمایش اول به ترتیب دارای خطای کم (۰/۵۵ تن در هکتار) و قابل قبول (۰/۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و در آزمایش دوم به ترتیب دارای خطای کم (۰/۵۱ تن در هکتار) و زیاد (۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در آزمایش نخست به ترتیب در دسته‌های عالی ($NRMSE \leq 0.1$) و خوب ($0.1 < NRMSE \leq 0.2$) و در آزمایش دوم به ترتیب در دسته‌های عالی ($NRMSE \leq 0.1$) و ضعیف ($0.3 < NRMSE$) قرار داشت. افزایش تقسیط کود نیتروژن از T1 به T2، سبب کاهش خطای شبیه‌سازی عملکرد از ۶/۶ به ۴/۴ درصد و بهره‌وری آب از ۶/۶ به ۴/۰ درصد شد. خطای شبیه‌سازی عملکرد در تیمارهای N1 الی N4 به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۱۲، ۰/۱۴ و ۰/۱۷ درصد و در تیمارهای W1 الی W4 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۲ درصد بود. ولی روند مناسبی بین تغییرات خطای بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف مشاهده نشد. براساس کلیه نتایج، استفاده از مدل SWAP برای شرایط وجود کود نیتروژن پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، تنش کودی، تقسیط کود، مدل‌سازی گیاهی، مدل کربن‌محور

مقدمه

استان‌های مختلف کشور کشت می‌شود و تمایل کشاورزان به کشت این گیاه در سال‌های اخیر افزایش یافته است. دستیابی به عملکرد قابل قبول، لازمه نگهداری و افزایش سطح زیرکشت فعلی در کشور است که جز با مدیریت صحیح منابع کود و آب میسر نمی‌شود. در واقع، مدیریت مصرف کود نیتروژن، تقسیط صحیح و تعیین مقدار مناسب آن سبب دستیابی به عملکرد قابل قبول می‌گردد (Namihira et al., 2011). از طرفی، اگرچه ذرت سازگاری خوبی با مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد ولی به دلیل چهارکربنه بودن، مقدار آب آبیاری اثر مهمی بر عملکرد و اجزای عملکرد آن دارد. به همین دلیل توجه محققان و بهره‌برداران به تأمین نیاز کودی و آبی این گیاه بیشتر شده است (نیسی و همکاران، ۱۴۰۲؛ اسمعیلی و همکاران، ۱۴۰۱). این مهم توسط محققان مختلف انجام و مقادیر مناسب این پارامترها برای هر منطقه ارائه شده است (Namihira et al., 2011; Sadeghi et al., 2018; Banger et al., 2020).

ذرت با سطح زیر کشت ۱۸۸ میلیون هکتار و تولید ۱۶۰۰ میلیون تن در جهان به‌عنوان سومین غله مهم شناخته می‌شود (FAO, 2022). براساس آخرین آمار منتشر شده از مرکز ملی آمار ایران (بی-نام، ۱۴۰۱)، سطح زیر کشت این گیاه در ایران ۱۳۰ هزار هکتار و میزان تولید بیش از یک میلیون تن است. این گیاه زراعی در

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- استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: a_eigder@ymail.com)

گیاهی را برای شبیه‌سازی دو پارامتر مذکور قابل قبول ارزیابی کردند (Jonubi et al., 2017). زلیگر 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 نمودند (Zeyliger et al., 2019). کاربرد مدل SWAP تحت شرایط حاکم بر مزرعه نیشکر نشان داد که این مدل گیاهی دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک و عملکرد نی داشت (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۹). با در نظر گرفتن تغییراتی در شبیه‌سازی مدل SWAP، از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد ذرت تحت کشت زیرپلاستیکی و مقادیر مختلف آب آبیاری در کشور چین استفاده شد. نتایج نشان داد که با اعمال فرضیاتی در این مدل می‌توان دقت آن را برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط مذکور بهبود بخشید (Zhao et al., 2020). ارزیابی مدل SWAP تحت کاربردهای مختلف کود نیتروژن برای گیاه آفتابگردان در چین پرداختند. این محققان گزارش کردند که اگر مدل SWAP به درستی واسنجی نشود احتمال خطا در نتایج شبیه‌سازی وجود دارد (Lei et al., 2021).

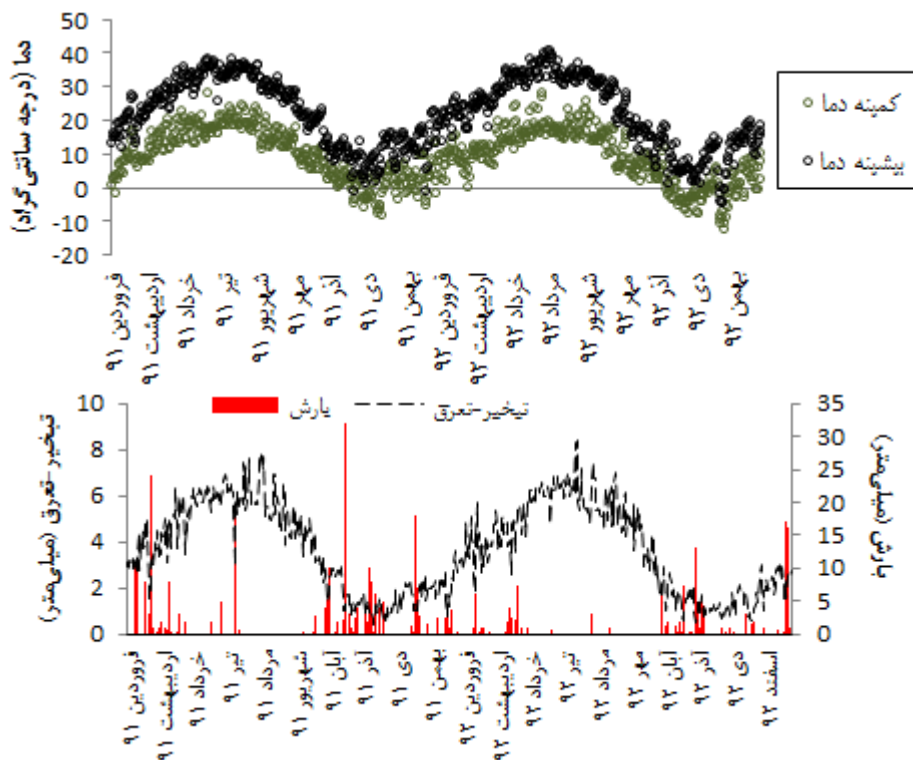
اگرچه تاکنون مطالعات متعددی با استفاده از مدل SWAP روی ذرت انجام شده است؛ ولی ارزیابی این مدل گیاهی در شرایط کم‌آب‌باری و تقسیم کود نیتروژن کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. با توجه به اینکه مقدار آب آبیاری و مقدار و روش تقسیم کود نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت بسیار موثر است؛ در این پژوهش به ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی این شرایط در منطقه کرج پرداخته شد.

مواد و روش

مطالعات مزرعه‌ای

در این پژوهش داده‌های برداشت شده از دو آزمایش تحقیقاتی مجزا و در مجاورت یکدیگر در مزارع پژوهشی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر مورد استفاده قرار گرفت (عباسی و چوگان، ۱۳۹۰؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). محل آزمایش در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا قرار دارد. اقلیم منطقه آزمایش براساس طبقه‌بندی کوپن جز مناطق نیمه‌خشک با زمستان سرد است. میانگین بارش در این منطقه ۲۴۵ میلی‌متر و میانگین درجه هوا ۱۵ سانتی‌گراد است. پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای دستیابی به نتایج مشابه در نقاط مختلف کشور لازم است مطالعات مشابه انجام گردد. ولی این مهم مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. از این رو، برای کاهش هزینه‌ها و تسریع بررسی سناریوهای مختلف تأمین آب و کود، مدل‌های گیاهی مختلفی توسط مراکز تحقیقاتی در جهان بسط داده شده است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). مدل SWAP از جمله مدل‌های گیاهی است که به عنوان ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از گیاهان زراعی توسط دانشگاه واگنینگن هلند معرفی شد (Van Dam et al., 2003). این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی از سه مدل مختلف استفاده می‌نماید. این مدل‌ها شامل مدل اختصاصی برای چمن، مدل گیاهی ساده و بدون در نظر گرفتن تنش و مدل تفضیلی با در نظر گرفتن کلیه شرایط حاکم بر رشد گیاه است. این مدل برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی به مقدار آب جذب شده توسط گیاه وابسته نیست و شبیه‌سازی عملکرد توسط معادلات مربوط به تولید زیست‌توده از دی‌اکسید کربن و تولید ماده غذایی انجام می‌شود (Van Dam et al., 2003). به همین دلیل مدل SWAP جز مدل‌های کربن محور دسته‌بندی می‌شود (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸). به دلیل محیط کاربر پسند و نتایج نزدیک به شرایط مزرعه، پژوهش‌گران زیادی در مطالعات خود از این مدل استفاده نموده‌اند. استفاده از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و رطوبت خاک تحت کشت ذرت توسط بنفانت و همکاران در شمال ایتالیا انجام شد. این محققان گزارش نمودند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای مذکور قابل قبول بود (Bonefante et al., 2010). در تحقیقی دیگر، از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد گندم و بیلان آب در شهر پکن استفاده شد و نتایج نشان داد که دقت مدل در حد مطلوب بود (Ma et al., 2011). بنفانت و بوما نیز از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی تغییرات عملکرد ذرت تحت شرایط کم‌آب‌باری استفاده کردند. این محققان پس از واسنجی و با توجه به دقت مدل SWAP، عملکرد ذرت را با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بررسی نمودند. (Bonefante and Bouma, 2015). حسن‌لی و همکاران اثر سطوح مختلف آب آبیاری بر عملکرد ذرت را با استفاده از دو مدل آکواکراپ و SWAP شبیه‌سازی کردند. همبستگی نتایج برای این دو مدل گیاهی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۵۹ و خطای این دو مدل به ترتیب ۰/۳۰ و ۰/۱۹ بود. بنابراین، مدل SWAP دقت بهتری برای شبیه‌سازی ذرت داشت (Hassanli et al., 2016). جنوبی و همکاران از مدل SWAP به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده و بهره‌وری آب برنج در شمال کشور ایران استفاده نمودند. این محققان نیز دقت این مدل



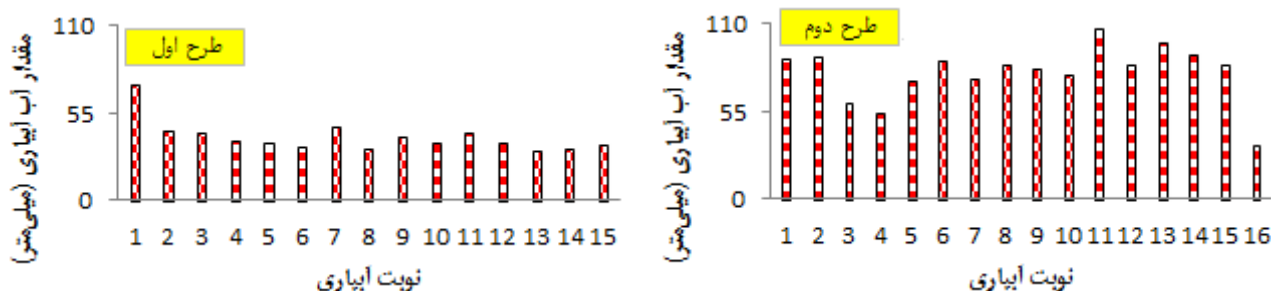
شکل ۱- داده‌های هواشناسی در محل آزمایش

کلاس A و اعمال ضریب تشنگ (۰/۶۵) و ضریب گیاهی (۰/۳، ۱/۲ و ۰/۶ به ترتیب برای دوره‌های رشد ابتدایی، توسعه و انتهای) اعمال شدند (عباسی و چوگان، ۱۳۹۰). برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی در فاصله دو کیلومتری از مزرعه تحقیقات استفاده شد. ضریب تشنگ براساس توصیه ایستگاه هواشناسی برابر با ۰/۶۵ در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی نیز براساس مقادیر ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. کشت در اوایل تیر ماه و با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار تحت انجام شد.

برای آبیاری، از جویچه‌هایی با شیب ۰/۰۰۶ متر بر متر، عرض ۰/۷۵ متر و طول ۱۶۵ متر استفاده شد. برای هر تیمار پنج جویچه در نظر گرفته شد. سه جویچه میانی برای برداشت محصول و دو جویچه کناری برای اثر حاشیه‌ای در نظر گرفته شدند. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به‌ترتیب با استفاده از کنتور و فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد (عباسی و چوگان، ۱۳۹۰؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). مقادیر آب آبیاری برای هر دو آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. کود به صورت کودآبیاری در هر دو آزمایش اعمال شد. بدین صورت که کود مورد استفاده در آب حل و از طریق یک بشکه ۲۰ لیتری به ابتدای جویچه‌ها تزریق می‌شد. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰-۳۰ دقیقه انتهای آبیاری انجام می‌شد. مشخصات خاک مزرعه نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.

در آزمایش تحقیقاتی اول (اجرا شده در سالهای زراعی ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۹-۱۳۸۸)، عوامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3: ۶۰ درصد نیاز کودی و N4: شاهد) و زمان تقسیم کود اوره (با دارا بودن ۴۶ درصد نیتروژن خالص) تحت دو روش (T1: سه تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگ، مرحله ۱۰ برگ و مرحله تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگ، مرحله ۱۰ برگ، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح) روی ذرت دانه‌ای هیبرید سینگل کراس ۲۶۰ اعمال شد. کود مورد استفاده از منبع اوره و تیمار شاهد شامل روش معمول پخش این کود (۵۰ درصد توصیه کودی براساس آنالیز خاک قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحله ۴-۶ برگ به روش پخش سطحی) در منطقه بود. مقدار آبیاری در این آزمایش براساس نیاز کامل آبی گیاه ذرت براساس رابطه‌ی فائو-پنمن-مانتیت بود. عملیات کاشت در اردیبهشت و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام شد (عباسی و چوگان، ۱۳۹۰).

در آزمایش تحقیقاتی دوم (اجرا شده در سالهای زراعی ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۲-۱۳۹۱)، عوامل مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: ۱۲۰، W2: ۱۰۰، W3: ۸۰ و W4: ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در چهار مقدار (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3: ۶۰ و N4: صفر درصد نیاز کودی براساس آنالیز خاک) روی رقم ذرت دانه‌ای دبل کراس ۳۷۰ مورد بررسی قرار گرفتند. کود مورد نیاز از منبع اوره و در چهار مرحله قبل از کاشت، مرحله هفت برگ، مرحله ساقه‌رفتن و مرحله سنبل‌زدن اعمال شد. تیمارهای آبیاری براساس تبخیر از سطح تشنگ



شکل ۲- عمق آب آبیاری در شرایط آبیاری کامل در آزمایش‌های مورد استفاده

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

pH	EC	رطوبت اشباع	FC	رطوبت حجمی در PWP	رطوبت حجمی در ظاهر	جرم مخصوص	بافت خاک	عمق خاک
-	dS.m ⁻¹	%		cm ³ .cm ⁻³		g.cm ⁻³		Cm
۷/۷۷	۱/۱۶	۴۵	۲۹	۱۵	۱/۳۴	لوم	۰-۲۰	
۷/۶۷	۰/۸۲	۴۴	۲۹	۱۵	۱/۴۶	لوم	۲۰-۴۰	
۷/۸۵	۰/۸۰	۴۴	۲۸	۱۶	۱/۴۷	لوم	۴۰-۶۰	
۷/۶۹	۰/۸۷	۴۳	۲۸	۱۶	۱/۵۰	لوم	۶۰-۸۰	

$$1 - \frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} = K_{y,k} \left(1 - \frac{T_{a,k}}{T_{p,k}} \right) \quad (2)$$

که در آن، $K_{y,k}$ ضریب واکنش گیاه به مرحله رشد k ، $T_{a,k}$ و $T_{p,k}$ تعرق واقعی و پتانسیل در طول دوره رشد k (سانتی‌متر)، $Y_{p,k}$ و $Y_{a,k}$ محصول واقعی و پتانسیل در طول دوره رشد k (کیلوگرم بر هکتار) است. محصول نسبی در کل فصل رشد با استفاده از محصول نسبی در هر مرحله از رشد، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Van Dam et al., 1997).

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{k=1}^n \left(\frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} \right) \quad (3)$$

که در آن، Y_a محصول تجمعی واقعی در طول کل فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، Y_p محصول تجمعی پتانسیل در طول کل فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، k مرحله رشد و n تعداد مراحل رشد تعریف شده است. در صورت وجود رابطه خطی بین Y_a/Y_p و T_a/T_p در طول کل دوره رشد و یا زمانی که هیچ گونه اطلاعاتی در مورد ضریب واکنش به عنوان تابعی از مراحل رشد (D_s) برای یک گیاه خاص موجود نباشد، یک مرحله رشد (k) برای گیاه زراعی مورد نظر تعریف می‌شود.

آنالیز حساسیت مدل

برای آنالیز حساسیت مدل از رابطه (۴) استفاده شد (Geerts et al., 2009):

کود سوپرفسفات تریپل به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، براساس توصیه کودی براساس آزمون خاک، پیش از کاشت در تمام تیمارها به صورت یکسان در سطح خاک پخش گردید. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از علف‌کش پیش‌کاشتی و هم‌چنین و جین دستی طی فصل رشد انجام گرفت. پس از استقرار کامل بوته‌ها و برای حصول تراکم مناسب، اقدام به تنک کردن بوته‌های اضافی در مرحله ۱۰ برگی گردید. روند توسعه پوشش گیاهی نیز با فواصل ۳۰ روزه در طول آزمایش اندازه‌گیری شد. در پایان فصل رشد و بعد از رسیدن فیزیولوژیکی، عملیات برداشت محصول از سه جویچه وسط به طول حدود پنج متر از هر تکرار به صورت تصادفی اجرا شد. عملکرد دانه در رطوبت ۱۴ درصد تعیین گردید. برای محاسبه بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری نیز از رابطه زیر استفاده شد (عباسی و چوگان، ۱۳۹۰):

$$WP = \frac{Y}{W} \quad (1)$$

که در آن، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و W حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) است.

مدل SWAP

در مدل SWAP، شبیه‌سازی رشد و تولید محصول به کمک فاکتورهای زراعی اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه انجام می‌شود. بدین منظور، با استفاده از رابطه (۲)، میزان تولید محصول تعیین می‌شود (Van Dam et al., 1997).

مدل است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۳، ۰/۳-۰/۴ و بیش‌تر از ۰/۴ به ترتیب نشان دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیان‌گر این است که مدل SWAP در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب ذرت عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده کارایی مدل SWAP است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند، بهتر است. آماره R^2 نشان دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد. در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌ها، محاسبه آماره‌ها و رسم نمودارها در محیط نرم افزار Microsoft Excel انجام شد.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل

در مدل SWAP از مدل مبسوط گیاهی تفصیلی برای شبیه‌سازی استفاده گردید. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی این مدل تفصیلی در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مدل SWAP نسبت به تغییرات بیش‌تر عوامل ورودی دارای حساسیت متوسط بود. به همین دلیل این پارامترها برای مرحله‌ی واسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مقادیر پارامترهای ورودی پس از واسنجی در جدول (۳) نشان داده شده است.

واسنجی مدل SWAP

نتایج عملکرد و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مقادیر و تقسیم مختلف کود نیتروژن در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP به‌طور متوسط اختلاف چهار درصدی وجود داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱/۶ و ۷/۷ درصد بود که این اختلاف برای تیمار شاهد نسبت به سایر تیمارها بیش‌تر بود.

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

که در آن، S_c ضریب حساسیت، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. برای آنالیز حساسیت مدل نسبت به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل را به مقدار ± 25 درصد تغییر و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند. در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $S_c > 15$ حساسیت بالا، $2 < S_c < 15$ حساسیت متوسط، $S_c < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts et al., 2009).

واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل گیاهی SWAP، دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی انجام شد. ابتدا مدل SWAP با استفاده از داده‌های برداشت شده از هر دو آزمایش در سال اول به صورت جداگانه واسنجی شد. در ادامه، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال دوم انجام گردید. برای تعیین صحت نتایج به دست آمده در هر دو مرحله ارزیابی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۵ تا ۱۰ نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}_i}} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (7)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

آماره‌های RMSE و NEMSE به ترتیب برای تعیین خطا و دقت

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی SWAP

عامل	مقدار S_e در حالت +۲۵٪	مقدار S_e در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
دمای پایین برای جوانه‌زنی	۷/۳	۶/۱	متوسط
دمای بالای رشد	۵/۵	۶/۴	متوسط
سطح ویژه برگ	۶/۹	۴/۰	متوسط
ضریب خاموشی نور جذب شده	۸/۵	۵/۲	متوسط
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۱۱/۰	۱۰/۴	متوسط
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۲/۹	۳/۵	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۴/۴	۴/۷	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۳/۰	۲/۶	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۴/۲	۴/۷	متوسط
سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	۲/۶	۳/۹	متوسط

جدول ۳- مقادیر برخی پارامترهای ورودی مدل رشد گیاهی SWAP

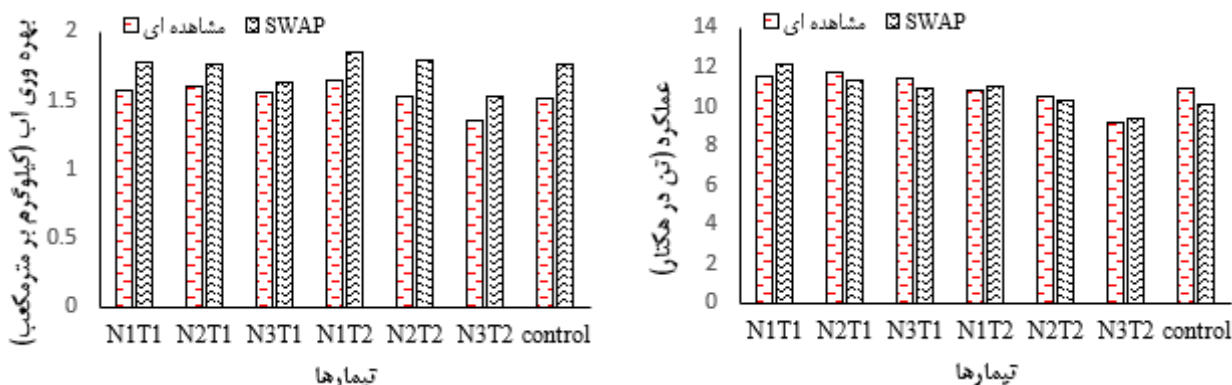
عامل	مقدار	حالت	توضیحات	مقدار	حالت	توضیحات
	آزمایش اول (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)			آزمایش دوم (مقدار و تقسیم کود نیتروژن)		
دمای پایین برای جوانه‌زنی	۴	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض	۴	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
دمای بالای رشد	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
سطح ویژه برگ	۰.۰۰۰۲۵	هکتار بر کیلوگرم	پیش فرض	۰.۰۰۰۲۶	هکتار بر کیلوگرم	پیش فرض
ضریب خاموشی نور جذب شده	۰.۰۰۰۶۰	-	واستجی	۰.۰۰۰۶۲	-	واستجی
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۰.۰۰۰۵۵	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واستجی	۰.۰۰۰۵۵	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واستجی
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۰/۷۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی	۰/۶۸	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی	۰/۶۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۷۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی	۰/۶۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واستجی
سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	۰.۰۰۰۷۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت	واستجی	۰.۰۰۰۷۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت	واستجی

دلیل احتمالی می‌تواند مربوط به این موضوع باشد که چون مدل SWAP کربن‌محور است، تأمین مواد مغذی بر شبیه‌سازی عملکرد در این مدل اثر می‌گذارد (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷)؛ کاهش مقدار نیتروژن سبب افزایش خطای شبیه‌سازی شده است. این موضوع در تحقیقات سایر محققان مشاهده نشد ولی در مدل‌های آب-محور نظیر AquaCrop، اثر کاهش آب آبیاری روی افزایش خطای شبیه‌سازی توسط برخی محققان گزارش شده است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). با افزایش تقسیم نیتروژن، اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای از ۴/۷ به ۲/۰ درصد کاهش یافت. اختلاف بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در سه و چهار تقسیم به ترتیب ۹/۲ و ۱۳/۸ درصد به دست آمد. افزایش خطای شبیه‌سازی بهره‌وری آب نسبت به عملکرد به

دلیل عدم رشد عملکرد در شرایط واقعی نسبت به مقدار آب آبیاری است. در واقع، چون این مدل عملکرد شبیه‌سازی شده را بر حسب مقدار آب آبیاری شبیه‌سازی نمی‌کند تغییرات آب آبیاری با دقت لازم توسط این مدل شبیه‌سازی نمی‌گردد. متوسط اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حدود ۱۲/۳ درصد و کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف به ترتیب ۵/۱ و ۱۷/۲ درصد به دست آمد. این نتایج نیز نشان داد که مدل SWAP در شبیه‌سازی بهره‌وری آب دقت لازم را نداشت. این نتایج با مراجعه به جدول (۴) نیز قابل مشاهده است. براساس آماره RMSE، خطای شبیه‌سازی مدل SWAP برای عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب ۰/۳۷ تن در هکتار و ۰/۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. با مقایسه این نتایج با متوسط عملکرد (۱۰/۸ تن در هکتار) و بهره‌وری آب (۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب) ذرت مشاهده می-

دقت عالی ($NRMSE < 0.1$) داشت. اگرچه دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد حدود ۲/۶ برابر بهره‌وری آب بود. کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر قابل قبول بود ولی مقدار آماره EF برای عملکرد حدود ۱/۵ برابر بهره‌وری آب به دست آمد.

شود که خطای شبیه‌سازی بهره‌وری آب حدود ۸ درصد بود که نسبت به خطای شبیه‌سازی عملکرد، ۳/۴ درصد بیش‌تر به دست آمد. آماره NRMSE نیز دقت مدل SWAP را نشان می‌دهد و براساس نتایج جدول (۴)، مدل SWAP برای هر دو پارامتر عملکرد و بهره‌وری آب



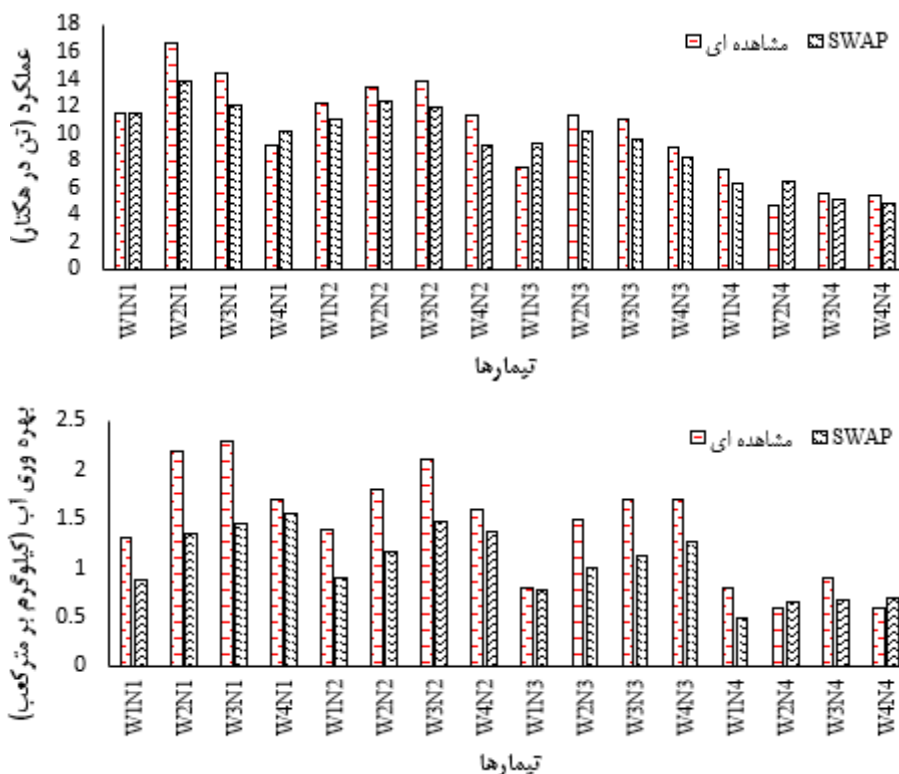
شکل ۳- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ذرت در مقادیر و تقسیمات مختلف کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی

جدول ۴- نتایج آماره‌های مختلف برای مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف آزمایش در مرحله واسنجی

R ²	D	EF	NRSME	RMSE	MBE	نام پارامتر	نوع آزمایش
۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۶۰	۰/۰۳	۰/۳۷	-۰/۰۱	عملکرد (تن بر هکتار)	آزمایش اول (مقدار و تقسیم کود نیتروژن)
۰/۶۸	۰/۹۹	۰/۴۰	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۹	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	
۰/۸۷	۰/۹۹	۰/۷۹	۰/۱۰	۱/۰۹	-۰/۳۳	عملکرد (تن بر هکتار)	آزمایش دوم (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)
۰/۸۰	۰/۹۶	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۶	-۰/۱۸	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	

به ترتیب ۳۹/۰، ۳/۷ و ۲۶ درصد تعیین گردید. متوسط اختلاف بهره‌وری آب برای تیمارهای کودی N1 الی N4 به ترتیب ۲۹/۰، ۲۹/۱، ۲۴/۰ و ۲۲/۳ درصد و برای تیمارهای آبی W1 الی W4 به ترتیب ۲۷/۸، ۲۹/۵، ۳۱/۴ و ۱۵/۷ درصد بود. با افزایش تنش کودی، نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری آب به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک شد ولی رابطه مستقیمی بین بهره‌وری آب و مقادیر آب مصرفی مشاهده نشد. براساس نتایج جدول (۴)، مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در این شرایط دچار خطای بیش‌برآوردی شد. آماره‌های RMSE و NRMSE برای عملکرد نشان داد که خطای شبیه‌سازی قابل قبول و دقت مدل SWAP در دسته عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار داشت. در حالی که خطای این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب زیاد بود و دقت این مدل در دسته متوسط ($0.2 < NRMSE \leq 0.3$) قرار داشت.

بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در مقادیر مختلف نیتروژن و آب آبیاری به ترتیب ۳۸/۰ و یک درصد به دست آمد (شکل ۴) که در مقایسه با شرایط استفاده از مقدار و تقسیم کود به اندازه ۱۴ درصد بیش‌تر بود. متوسط اختلاف عملکرد برای تمام تیمارهای کودی N1، N2، N3، N4 به ترتیب ۱۱/۲، ۱۲/۸، ۱۴/۲ و ۱۴/۹ درصد بود. در حالی که این اختلاف عملکرد برای تیمارهای آبی W1، W2، W3، W4 به ترتیب ۱۲/۲، ۱۸/۵، ۱۲/۶ و ۱۲/۸ درصد بود. عدم رابطه یکنواخت بین تیمارهای مورد مطالعه در مقادیر مختلف تأمین آب آبیاری نشان داد که مقدار آب آبیاری بر خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل SWAP اثری نداشت. این نتایج در شکل (۳) نیز مشاهده شد و علت آن کربن‌محور بودن مدل SWAP است. بیش‌ترین و کم‌ترین و متوسط اختلاف بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف آب آبیاری و نیتروژن مصرفی



شکل ۴- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ذرت در مقادیر مختلف کود نیتروژن و آب آبیاری در مرحله صحت‌سنجی

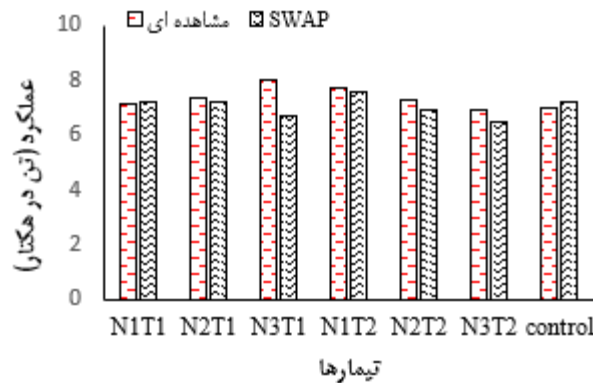
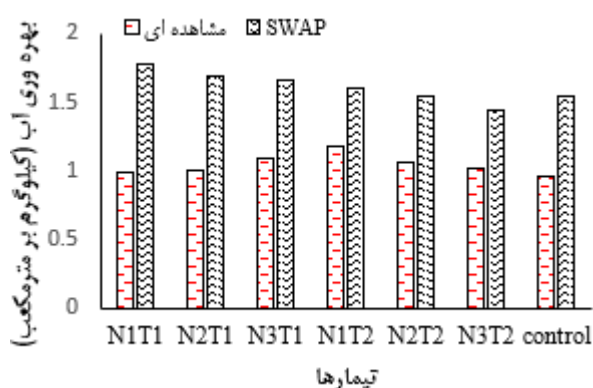
بود. کارایی این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد مطلوب بود ولی کارایی آن برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب پایین بود. براساس آماره MBE، مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در شرایط مقادیر مختلف کود و آب آبیاری به‌ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی شد (جدول ۵). این نتایج در شکل (۶) نیز قابل مشاهده است. خطای مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد ۰/۵۱ تن در هکتار بود که تقریباً نزدیک به خطای شبیه‌سازی برای آزمایش اول بود. خطای شبیه‌سازی بهره‌وری آب ۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد که در مقایسه با متوسط بهره‌وری آب مشاهده‌ای (۱/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب)، بسیار زیاد است. مقدار NRMSE برای بهره‌وری آب نیز این موضوع را تأیید می‌کند زیرا دقت مدل SWAP در دسته ضعیف ($0.3 < NRMSE$) قرار داشت. از طرف دیگر، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد در دسته عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار گرفت. کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر مطلوب بود. متوسط، بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به‌ترتیب ۰/۲۶، ۰/۴۳ و ۰/۱ درصد به‌دست آمد. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ۰/۱ و ۰/۳۸ درصد و متوسط این اختلاف ۰/۱۴ درصد محاسبه شد. این اختلاف در تیمارهای N1 الی N4 به‌ترتیب ۰/۱۱، ۰/۱۲، ۰/۱۴ و ۰/۱۷ درصد و

صحت‌سنجی مدل SWAP

نتایج عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در مقادیر و تقسیمات مختلف کود نیتروژن در مرحله واسنجی در شکل (۵) نشان داده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۱۶/۰ و ۱/۰ درصد به‌دست آمد. این مقادیر برای بهره‌وری آب به‌ترتیب ۳۶/۷ و ۸۱/۰ درصد بود. متوسط اختلاف عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۵/۱ و ۵/۴ درصد به‌دست آمد. با افزایش تقسیمات کود نیتروژن از سه (T1) به چهار (T4)، این اختلاف برای عملکرد از ۶/۶ به ۴/۴ درصد و برای بهره‌وری آب از ۶/۶ به ۴/۰ درصد کاهش نشان داد. احتمالاً علت آن رشد متناسب گیاه در دوره‌های مختلف رشد است. این موضوع سبب شد تا مدل SWAP، که از روابط ریاضی برای تعیین رشد ذرت استفاده می‌کند، نتایج نزدیک‌تری به شرایط واقعی ارائه کند. مقایسه آماره‌های به‌دست آمده در جدول (۵) نیز نشان داد که خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل SWAP برابر با ۰/۵۵ تن در هکتار بود که نسبت به متوسط عملکرد ذرت (۷/۳۶ تن در هکتار) قابل‌قبول است. اگرچه مقدار آماره RMSE برای بهره‌وری آب کم‌تر از عملکرد بود؛ ولی با مقایسه آن با متوسط بهره‌وری آب (۱/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب) قابل‌قبول نیست. دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد عالی ($NRMSE < 0.1$) و برای بهره‌وری آب خوب ($0.1 < NRMSE \leq 0.2$)

الی W4 به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۳۶، ۰/۲۱ و ۰/۱۳ درصد و در تیمارهای W1 الی W4 به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۳۰، ۰/۲۰ و ۰/۱۶ درصد تعیین گردید. براساس این نتایج، افزایش تنش آبی سبب کاهش خطای شبیه‌سازی شد ولی رابطه مستقیمی بین میزان کود مصرفی و خطای مدل SWAP مشاهده نشد.

در تیمارهای W1 الی W4 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۲ درصد بود. بنابراین افزایش تنش کودی سبب افزایش خطای مدل SWAP گردید که در نتایج به دست آمده در آزمایش اول نیز مشاهده شد. افزایش تنش آبی اثری بر میزان خطای مدل SWAP نداشت که به دلیل ماهیت کربن محور بودن این مدل گیاهی است. متوسط اختلاف بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در تیمارهای N1



شکل ۵- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ذرت در مقادیر و تقسیمات مختلف کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی

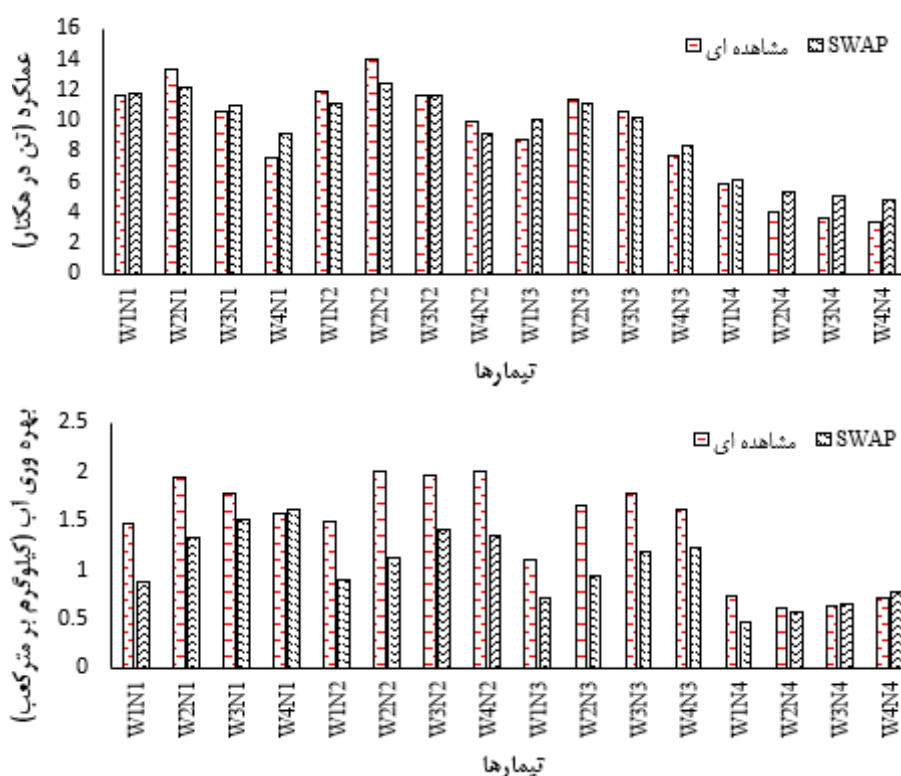
جدول ۵- نتایج آماره‌های مختلف برای مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف آزمایش در مرحله صحت‌سنجی

R ²	D	EF	NRSME	RMSE	MBE	نام پارامتر	نوع آزمایش
۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۰۶	۰/۵۵	۰/۰۸	عملکرد (تن بر هکتار)	آزمایش اول (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)
۰/۴۰	۰/۹۶	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۲۵	-۰/۱۲	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	
۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۵۱	-۰/۲۳	عملکرد (تن بر هکتار)	آزمایش دوم (مقدار و تقسیمات کود نیتروژن)
۰/۶۹	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۳۵	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	

تن در هکتار) و زیاد (۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب نیز به ترتیب در دسته‌های عالی ($NRMSE \leq 0.1$) و ضعیف ($0.3 < NRMSE$) قرار داشت. همچنین در هر دو آزمایش، افزایش تنش کودی، سبب افزایش خطای شبیه‌سازی عملکرد گردید ولی تنش آبی اثری بر دقت و میزان خطای شبیه‌سازی نداشت. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از مدل SWAP برای شبیه‌سازی شرایط تأمین کود پیشنهاد می‌شود ولی در شرایط وجود تیمارهای سطح آب آبیاری نیاز به بررسی و مطالعات بیش‌تری دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل SWAP در شرایط دو آزمایش مجزا مورد ارزیابی قرار گرفت. در آزمایش اول میزان کود نیتروژن و تقسیمات آن توسط مدل SWAP شبیه‌سازی و نتایج نشان داد که خطای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب کم (۰/۵۵ تن در هکتار) و قابل قبول (۰/۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. آماره $NRMSE$ برای این دو پارامتر نیز به ترتیب در دسته‌های عالی ($NRMSE \leq 0.1$) و خوب ($0.1 < NRMSE \leq 0.2$) قرار داشت. با افزایش تقسیمات کود نیتروژن از سه به چهار نوبت، خطای شبیه‌سازی عملکرد ۲/۲ درصد کاهش یافت. در آزمایش دوم، خطای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب، تحت شرایط مقدار کود نیتروژن و آب آبیاری، به ترتیب کم (۰/۵۱)



شکل ۶- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ذرت در مقادیر مختلف کود نیتروژن و آب آبیاری در مرحله صحت‌سنجی

قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵ (۲-۱): ۵۳-۶۴

منابع

انصاری، م. ع.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۴۰۱. ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سبب زمینی و تعیین عمق مناسب آب آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶ (۵-۹): ۸۹۱-۹۰۳.

بی‌نام، ۱۴۰۱. مرکز ملی آمار ایران. دسترسی در <https://www.amar.org.ir>

پرچی عراقی، ف.، سمیع‌پور، ف. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۹. کاربرد توزیعی مدل SWAP برای مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی زیرروزانه یک سیستم زراعی با زهکش زیرزمینی. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۴-۸۲): ۱۱۳۶-۱۱۲۱.

رحمانی، م.، خوشنواز، ص.، دریکوندی، ا. و برومندنسب، س. ۱۴۰۰. تاثیر تنش آبی و استفاده از سطوح مختلف سوپرچادب اکوازورب ۳۰۰۵ بر روی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه ذرت در روش آبیاری قطره‌ای. مجله علوم و مهندسی آبیاری. در دست انتشار.

سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۹. مقایسه دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند تحت دوره‌های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۴-۸۲): ۱۳۱۱-۱۳۲۱.

ابراهیمی پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف ژئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸ (۱): ۱۱۷-۱۳۲.

ابراهیمی پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۳-۷۵): ۷۱۵-۷۲۶.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸ (۱): ۱۵-۳۰.

اسمعیلی، م.، داداشی، م.، فیض‌بخش، م. ت.، کابوسی، م. و شیخ، ف. ۱۴۰۱. ارزیابی اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد، اجزاء عملکرد، محتوای پروتئین و بهره‌وری آب چهار رقم ذرت دانه‌ای در گرگان. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۶ (۳): ۲۶۹-۲۸۵.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت

- 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.
- Lei, G., Zeng, W., Jiang, Y., Ao, Ch., Wu, J. and Huang, J. 2021. Sensitivity analysis of the SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) model under different nitrogen applications and root distributions in saline soils, *Pedosphere*, 31 (5): 807-821.
- 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.
- Namihira, T, Shinzato, N., Akamine, H, Nakamura, I, Maekawa, H, Kawamoto, Y. and Matsui, T. 2011. The effect of nitrogen fertilization to the sward on guineagrass (*Panicum maximum* Jacq cv. Gatton) silage fermentation. *Asian-Aust J. Anim. Sci*. 24: 358-363.
- Sadeghi, S. M., Noorhosseini, S. A. and Damalas, Ch. A. 2018. Environmental sustainability of corn (*Zea mays* L.) production on the basis of nitrogen fertilizer application: The case of Lahijan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 95: 48-55.
- 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, 167 pp.
- 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 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. A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed-maize growth under film mulching, *Agricultural and Forest Meteorology*, 108127: 292-293.
- عباسی، ف. و چوگان، ر. ۱۳۹۰. بررسی اثرات کودآبیاری سطحی بر کارایی مصرف آب، عملکرد و اجزا عملکرد ذرت دانه‌ای در کرج. طرح پژوهشی. ۴۴ صفحه.
- عباسی، ف.، چوگان، ر. و غیبی، م. ۱۳۹۴. بررسی امکان کاهش تلفات نیتروژن در کودآبیاری جویچه‌ای ذرت دانه‌ای. طرح پژوهشی. ۵۵ صفحه.
- عباسی، ف.، چوگان، ر.، علیزاده، ح. ع. و لیاقت، ع. م. ۱۳۹۱. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب، عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۳ (۴): ۳۷۵-۳۸۵.
- کریمی، ش.، اگدرنژاد، ا. و نخجوانی مقدم، م. م. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسط‌رس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۶-۸۴): ۱۸۹۳-۱۹۰۷.
- نیسی، ک.، اگدرنژاد، ا. و عباسی، ف. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج. نشریه مدل سازی و مدیریت آب و خاک. ۳ (۱): ۲۶-۴۱.
- Banger, K., Wagner-Riddle, C., Grant, B. B., Smith, W. N., Drury, C. and Yang, J. 2020. Modifying fertilizer rate and application method reduces environmental nitrogen losses and increases corn yield in Ontario. *Science of the Total Environment*. 722: 137851.
- 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.
- 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.
- FAO. 2022. FAO stat. available at <https://www.fao.org/statistics/en/>.
- Geerts S., Raes D., Garcia, M., Miranda, R. and Cusicanqui, J. A. 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

Evaluation of SWAP Model for Simulating Corn Yield and Water Productivity under Different Conditions of Irrigation Water and Nitrogen Fertilizer Management

K. Neysi¹, A. Egdernezhad^{2*}, F. Abbasi³

Received: Jan.16, 2023

Accepted: Apr.16, 2023

Abstract

The purpose of this research was to evaluate the SWAP model in simulating the yield and water productivity of corn under different conditions of irrigation water and nitrogen fertilizer management. For this purpose, the data from two separate research projects were used. In the first research project, fertilizer in four levels (N1: 100, N2: 80, N3: 60 percent of fertilizer requirement and N4: control) and fertilizer splitting (T1: three and T2: four equal splitting) and in the second project, the factors of irrigation water amount in four levels (W1: 120, W2: 100, W3: 80 and W4: 60% of water requirement) and nitrogen fertilizer in four amounts (N1: 100, N2: 80, N3: 60 and N4: zero percent of fertilizer requirement) were considered. The results showed that the SWAP model for simulating yield and water productivity in the first project provided low (0.55 ton.ha^{-1}) and acceptable (0.25 kg.m^{-3}) errors, respectively, and in the second project has low (0.51 ton.ha^{-1}) and high (0.47 kg.m^{-3}) error, respectively. The accuracy of this crop model for simulating the yield and water productivity in the first project was in the excellent ($\text{NRMSE} \leq 0.1$) and good ($0.1 < \text{NRMSE} \leq 0.2$) categories, respectively, and in the second plan, in the excellent ($\text{NRMSE} \leq 0.1$) and poor ($\text{NRMSE} < 0.3$) categories, respectively. Splitting of nitrogen fertilizer from T1 to T2 caused a decrease in yield simulation error from 6.6 to 4.4% and water productivity from 6.6 to 0.4%. The yield simulation error in treatments N1 to N4 were 0.11, 0.12, 0.14 and 0.17 percent, respectively and in treatments W1 to W4 were 0.12, 0.18, 0.12 and 0.12 percent, respectively. There was no proper trend between the changes of water productivity error in different treatments. Based on the results, application of the SWAP model is suggested for the presence of nitrogen fertilizer.

Keywords: Carbon-driven Model, Crop Modeling, Fertilizer Splitting, Fertilizer Stress, Water Stress

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 Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3- 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)