

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت

نیازعلی ابراهیمی‌پاک^{۱*}، محسن احمدی^۲، اصلان اکدرنژاد^۳ و عباس خاشعی‌سیوکی^۴

۱- دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: nebrahimipak@yahoo.com

۲- دکتری آبیاری و زهکشی، پژوهشگر شرکت معدنی افرازند

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

۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۳

چکیده:

این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد و زیست‌توده زعفران با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop تحت گزینه‌های مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت با استفاده از نتایج آزمایش سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ انجام شد. در تحقیق انجام شده، ۲۶ داده اندازه‌گیری شده برای هر پارامتر تحت تیمارهای سطح آبیاری (عرف محلی: I1، کم‌آبیاری با کاهش ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه: I2 و آبیاری براساس نیاز آبی کامل گیاه: I3) و کاربرد زئولیت (صفر: Z0، ۰/۵ درصد: Z1، ۱ درصد: Z2 و ۲ درصد: Z3 درصد وزنی خاک) به صورت تصادفی به دو دسته تقسیم شدند. دسته نخست (شامل ۷۰ درصد داده‌ها) به منظور واسنجی و دسته دوم (شامل ۳۰ درصد داده‌ها) برای صحت‌سنجی مدل AquaCrop مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، تیمارهای شامل آبیاری عرف محلی بیش‌ترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. در برخی موارد تیمارهای حاوی زئولیت این اختلاف را کاهش دادند لیکن رابطه معنی‌داری بین نتایج به دست آمده مشاهده نشد. آماره‌های RMSE، MBE و NRMSE برای شبیه‌سازی عملکرد زعفران در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۴۸ (کیلوگرم در هکتار)، ۰/۲۱- (کیلوگرم در هکتار) و ۰/۰۹ و برای زیست‌توده در همین مرحله به ترتیب برابر با ۱۵۱/۹ (کیلوگرم در هکتار)، ۷۴/۲ (کیلوگرم در هکتار) و ۰/۱۳ به دست آمدند. این مقادیر نشان دادند که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده زعفران داشت. کارایی این مدل با استفاده از مقادیر EF مطلوب بود به طوری که مقدار این آماره برای عملکرد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۳۲ و ۰/۴۲ و برای زیست‌توده در همین دو مرحله به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بود. براساس نتایج به دست آمده، این مدل دقت کافی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده زعفران در شرایط کم‌آبیاری و کاربرد زئولیت را داشت. بنابراین استفاده از این مدل، به عنوان یک مدل مطلوب گیاهی برای شبیه‌سازی زعفران پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: تنش آبی، زئولیت پتاسیک، سناریوهای آبیاری، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

به طوری که برخی محققان نیز منشأ اولیه این گیاه را ایران می‌دانند (کافی و همکاران، ۱۳۸۱؛ Mollafilabi, 2004). این گیاه به سرما نسبتاً مقاوم بوده و دوره رشد آن از پاییز تا بهار است. در تابستان بنه‌های این گیاه در زمین باقی مانده و رشد دوباره خود را از پاییز ادامه می‌دهند

زعفران^۱ گران‌ترین ادویه جهان به‌شمار می‌رود. بیش‌ترین سطح زیر کشت این محصول در ایران قرار دارد

^۱-Crocus sativus L.

خشک و نیمه‌خشک ایران (احمدی، ۱۳۹۳) اهمیت بیشتری خواهد داشت. بدین منظور، برخی محققان علاوه بر آبیاری استفاده از مواد جاذب رطوبت را برای تأمین بهتر نیاز آبی این گیاه پیشنهاد کرده‌اند (خرم‌دل و همکاران، ۱۳۹۲؛ فلاحی و همکاران، ۲۰۱۶؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۷). زئولیت از جمله مواد جاذب رطوبت ارزان و در دسترس در ایران است (خاشعی‌سیوکی و احمدی، ۱۳۹۴) که اثرات مثبت کاربرد آن بر زعفران نیز گزارش شده است (خاشعی‌سیوکی و همکاران، ۱۳۹۵ الف، ب و پ؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). اهمیت این محصول استراتژیک برای اقتصاد ایران و اشتغال در مناطق شرقی کشور از یک سو و واکنش متفاوت این محصول به مقدار آب آبیاری و مواد جاذب رطوبت از سوی دیگر سبب می‌شود تا لزوم انجام آزمایش‌های متفاوت مزرعه‌ای برای دستیابی به سناریوهای مناسب آبیاری احساس شود. از طرف دیگر، انجام کلیه سناریوهای ممکن، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر و در برخی موارد غیرممکن است. به همین دلیل محققان مدل‌های گیاهی مختلفی برای ارزیابی واکنش گیاه به شرایط مزرعه‌ای بسط داده‌اند (Van Dam *et al.*, 1997; Boogard *et al.*, 1998; Geerts and Raes, 2009; Raes *et al.*, 2012). مدل AquaCrop یکی از مهم‌ترین مدل‌های گیاهی است که برای شبیه‌سازی محصولات مختلف در سناریوهای کم‌آبی توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO) ارائه شده است (Geerts and Raes, 2009; Raes *et al.*, 2012). این مدل برای شبیه‌سازی بسیاری از گیاهان مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به شبیه‌سازی عملکرد محصولات جو (Araya *et al.*, 2010)، ذرت و چغندر قند (Stricevic *et al.*, 2011)، ذرت (Heng *et al.*, 2009; Hisao *et al.*, 2009; Masanganise *et al.*, 2013; Katerji *et al.*, 2013) و آفتابگردان (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۱) اشاره کرد.

به دلیل محدود بودن کشت زعفران به چند کشور، تاکنون تلاشی برای ارائه مدل اختصاصی برای آن انجام

(احمدی، ۱۳۹۳). این گیاه عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران کشت می‌شود. از طرفی مصادف شدن دوره رشد این گیاه با بارش‌های پاییز و زمستان سبب شده است که کشاورزان گمان کنند نیاز آبی این گیاه پایین است. تحقیقات نشان داده است که عملکرد فعلی در مزارع زعفران ایران قابل قبول نیست و این گیاه عمدتاً تحت تنش آبی قرار دارد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

تحقیقات متعدد نشان داده است که با فراهم آوردن نیاز آبی این گیاه، می‌توان به عملکرد بالایی نسبت به وضعیت موجود در مزارع دست یافت (کریمی‌فرزقی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Juan *et al.*, 2009). در برخی موارد پژوهش‌ها بر زمان مناسب قطع آبیاری این گیاه معطوف بوده و نشان داده است که انتخاب زمان مناسب قطع آبیاری نیز می‌تواند سبب بهبود عملکرد این گیاه شود (فیضی و همکاران، ۱۳۹۷). تحقیقات محدودی نیز نشان داده است که کاربرد آب آبیاری در برخی موارد تأثیری منفی در عملکرد گیاه دارد. در تحقیق فلاحی و محمودی (۱۳۹۷) مشاهده شد که کاهش دور آبیاری از چهار هفته (با مجموع آبیاری ۳۶۰۰ متر مکعب در سال) به دو هفته (با مجموع آبیاری ۷۲۰۰ متر مکعب در سال) سبب کاهش ۱۳/۶ درصدی عملکرد شد. گرچه این محققان نیز بیان کرده‌اند که واکنش این گیاه به آب آبیاری در شرایط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. همچنین با توجه به اینکه نتایج این آزمایش در سال اول کشت به دست آمد؛ این محققان اظهار نموده‌اند که در سال بعد ممکن است نیاز آبی این گیاه تغییر کند. مطالعه حسینی و رحیمی (۱۳۹۶) نیز نشان داد که تفاوتی بین تأمین نیاز آبی کامل گیاه زعفران و برخی سناریوهای کم‌آبیاری این محصول وجود نداشت. لیکن این محققان نیز گزارش کردند که با افزایش تنش آبی، عملکرد زعفران کاهش می‌یابد.

با توجه به سابقه تحقیق، تنش آبی تنش آبی از جمله مهم‌ترین مشکلات برای دستیابی به عملکرد مناسب محصول زعفران خواهد بود. این معزل با توجه به اقلیم

دریا استفاده شد (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۵ب) در این آزمایش که در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل در نظر گرفته شده بود؛ تیمارهای سطح آبیاری (عرف محلی: I_1 ، کم آبیاری با کاهش ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه: I_2 و آبیاری براساس نیاز آبی کامل گیاه: I_3) و کاربرد زئولیت (صفر: Z_0 ، ۰/۵ درصد: Z_1 ، ۱ درصد: Z_2 و ۲ درصد: Z_3 درصد وزنی خاک) در سه تکرار در نظر گرفته شد. به منظور در نظر گرفتن تیمارهای زئولیت، مقادیر مورد نظر قبل از انجام آزمایش با خاک مزرعه به صورت کامل ترکیب شد. مشخصات خاک آزمایش و زئولیت مورد استفاده به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

تیمار آبیاری I_1 براساس نحوه آبیاری عرف محلی در منطقه در سه نوبت در طی فصل زراعی و هر نوبت به میزان ۶۳/۵ میلی متر در نظر گرفته شد. دو تیمار آبیاری I_2 و I_3 براساس نیاز آبی گیاه و پایش میزان رطوبت خاک در طی آزمایش اعمال شدند. به منظور اعمال تیمارهای I_2 و I_3 از روش وزن کردن گلدانها استفاده شد. بدین منظور گلدان هادر گودالهای معینی که در مزرعه حفر شده بودند قرار داده شدند به طوری که لبه آن ها بالای خاک قرار گرفته بود. گلدان ها به منظور آبیاری، روزانه مورد بازدید و توزین قرار می گرفتند و دوباره در جای خود قرار داده می شدند. براساس آزمایش های قبلی و با استفاده از رابطه (۱)، عمق آب آبیاری لازم برای هر گلدان محاسبه می شد.

$$I = (Fc - \theta) \times \rho_b \times D \quad (1)$$

که در این رابطه، I عمق آب آبیاری (میلی متر)، FC رطوبت در حد ظرفیت زراعی (درصد حجمی)، θ رطوبت اندازه گیری شده (درصد حجمی) و ρ_b عمق ریشه می باشد. به منظور تعیین حجم آب مصرفی در هر بار آبیاری (I' بر حسب لیتر) از رابطه (۲) استفاده شد.

$$I' = I \times A \quad (2)$$

نشده است. گرچه برخی محققان مدلی برای شبیه سازی جذب آب توسط این محصول ارائه کردند (Sepaskhah and Yarami, 2010)؛ لیکن این مدل نمی تواند برای شبیه سازی عملکرد محصول مورد استفاده قرار گیرد. مدل گیاهی AquaCrop به دلیلی مانند کاربر پسند بودن، نیاز به داده های کمتر و دقت بالا می تواند مدل مناسبی برای شبیه سازی این محصول در نظر گرفته شود (Heng et al., 2009). بررسی های نویسندگان در خصوص مدل سازی زعفران با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد که تنها یک پژوهش در این زمینه انجام شده است. در این پژوهش، (Mir safi et al., 2016) نشان دادند که این مدل توانایی قابل قبولی برای مدل سازی این محصول دارد. همچنین بیان کردند که با توجه به اینکه تحقیق ایشان اولین مطالعه در زمینه است؛ براساس نتایج آن ها می توان از مدل گیاهی مذکور برای سایر گیاهان چندساله نیز استفاده کرد.

با توجه به سابقه تحقیق، کاربرد سناریوهای کم آبیاری و مصرف زئولیت برای گیاه زعفران توسط محققان پیشنهاد شده است. به همین منظور، ارزیابی دقت مدل های شبیه سازی گیاهی از جمله AquaCrop در شبیه سازی این گیاه در شرایط ذکر شده ضروری به نظر می رسد. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در این خصوص انجام نشده است؛ موارد مورد اشاره از جمله نوآوری های این تحقیق محسوب می شوند. از این رو، هدف این تحقیق ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد زعفران در شرایط استفاده از سناریوهای مختلف آبیاری و استفاده از زئولیت بود.

مواد و روش ها

در این تحقیق از داده های دو سال زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ برای گیاه زعفران در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند واقع در طول جغرافیایی $29^{\circ}59'$ و عرض جغرافیایی $70^{\circ}32'$ و با ارتفاع ۱۴۹۱ متر از سطح

حداقل دمای روزانه، بارندگی، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) و میانگین غلظت CO_2 سالیانه بود. تبخیر و تعرق از معادله فائو-پنمن-مانتیث و توسط نرم افزار ET-calculator تعیین شد و خروجی آن به مدل معرفی گردید. غلظت CO_2 نیز براساس مقدار پیش فرض، که در رصدخانه مائونالوای هاوایی اندازه گیری شده است، به مدل معرفی گردید. داده های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم براساس آزمایش خاک (جدول ۱) تعیین و به مدل معرفی شدند. برای در نظر گرفتن اثر کاربرد زئولیت توسط مدل AquaCrop، تغییرات رطوبت در دو نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی و هدایت هیدرولیکی اشباع در هر تیمار اندازه گیری و به نرم افزار معرفی شد (احمدی، ۱۳۹۳). داده های مدیریت مزرعه نیز شامل: الف) مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و ب) آبیاری بود که مدیریت مزرعه بدون محدودیت و آبیاری نیز براساس هر تیمار به مدل معرفی شد. برخی از داده های گیاهی با توجه به داده های برداشت شده از آزمایش به مدل وارد شد. لیکن چون تعداد داده های گیاهی مورد نیاز در مدل AquaCrop به نسبت زیاد است و اکثراً قابل اندازه گیری نیستند؛ بسط دهندگان مدل پیشنهاد کرده اند که این پارامترها توسط تحلیل حساسیت و واسنجی مشخص گردند (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت سنجی مدل

به منظور تعیین درصد حساسیت این مدل به تغییرات پارامترهای ورودی و نیز تعیین پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی، از تحلیل حساسیت استفاده شد. به منظور انجام تحلیل حساسیت از رابطه (۶) استفاده گردید (Geerts and Raes, 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده های

که در این رابطه، A سطح مقطع گلدان (متر مربع) می باشد. در تیمار آبیاری کامل (I_3)، میزان رطوبت در حد ظرفیت زراعی ($\pm 5\%$) نگه داشته شد. برای اعمال تیمار I_2 نیز تا زمانی که 0.7 رطوبت ظرفیت زراعی خاک از دست رود آبیاری انجام نمی شد. پس از آن آبیاری تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی انجام می شد.

مشخصات آب آبیاری در جدول (۳) نشان داده شده است. پس از ظهور گل، نمونه های مورد نظر جمع آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. سپس با استفاده از ترازو با دقت 0.0001 گرم وزن کلاله و سایر اندام های برداشت شده اندازه گیری شد.

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با استفاده از تبخیر-تعرق (رابطه ۳) و تفکیک آن به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr) به شبیه سازی عملکرد می پردازد. البته در این مدل مفهوم پوشش تاج گیاه براساس رابطه (۴) جایگزین شاخص سطح برگ شده است.

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (3)$$

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (4)$$

در این معادلات، 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 و تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر و تعرق، 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) می باشد. بدین ترتیب میزان تعرق گیاه براساس پوشش تاج از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (5)$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند.

به منظور شبیه سازی با این مدل گیاهی، داده های ورودی در چهار گروه اقلیم، گیاه، خاک و مدیریت مزرعه به مدل معرفی می شوند. داده های اقلیمی شامل حداکثر و

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

در این رابطه‌ها، 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. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده دقت عالی مدل AquaCrop است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۱-۰/۲، ۰/۲-۰/۳ و بیش‌تر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل AquaCrop مورد نظر 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 کوچک‌تری به دست داده است. 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 R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. 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. 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.

با توجه به اینکه زعفران گیاهی چند ساله است و معمولاً در سال اول عملکرد چندانی ندارد؛ برای افزایش دقت واسنجی مدل از داده‌های سال اول کشت صرف نظر شد. بنابراین داده‌های سال دوم کشت به صورت تصادفی به دو دسته تقسیم شد. دسته اول که شامل هفتاد درصد داده‌های برداشت شده بود به منظور واسنجی و داده‌های سال دوم به منظور صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ارزیابی دقت مدل‌های گیاهی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا^۱، جذر میانگین مربعات نرمال شده^۲، میانگین خطای اریب^۳، کارایی مدل^۴، شاخص توافق^۵ و ضریب تبیین^۶ استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۷) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

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

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

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

1- RMSE
2- NRMSE
3- MBE
4- EF
5- d
6- R²

جدول ۱. مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده

ماده آلی	اسیدیته	EC	جرم مخصوص ظاهری	درصد وزنی رطوبت قابل نگهداشت در خاک	شن	سیلت	رس	بافت
۰/۲۹	۷/۹۸	۰/۴۶	۱/۵۲	۲۰/۹	۴۸	۴۲	۱۰	لومی

جدول ۲. مشخصات زئولیت پتاسیک

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	نوع زئولیت
۷/۲۵	۷/۶۸	۰/۹۱	۱/۱۲	۳/۱	۳/۴۳	۰/۲۹	۰/۱۵۳	۰/۰۱۷	۰/۰۰۶	پتاسیک
L.O.I (%)	SO ₃ (%)	Cl (ppm)	Ba (ppm)	Sr (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	نوع زئولیت
۱۱/۸۴	۰/۶	۲۰۴۹	۱۱۵۸	۶۶۶	۵۶	۲	۲۷	۵	۶	پتاسیک

جدول ۳. مشخصات شیمیایی آب آبیاری

کلر	بی‌کربنات	کربنات	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	کل املاح محلول (mg.l-1)	نسبت جذبی سدیم	اسیدیته	هدایت الکتریکی (dS.m-1)
۴/۲۵	۲/۲	۴/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۴/۱۹	۵/۳	۶۸/۴۸	۲/۲۴	۷/۲۶	۰/۹۹۱

نتایج و بحث

حد قابل قبول بوده و کارایی مدل نیز براساس مقادیر آماره‌های EF و d بالا است.

شبیه‌سازی عملکرد زعفران در مرحله واسنجی با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد که در بسیاری از تیمارها مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک بود (شکل ۱). براساس این نتایج حداقل و حداکثر تفاوت بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۰/۰۴ و ۱۸/۲ درصد بود. متوسط اختلاف بین این مقادیر نیز برابر با ۶/۸ درصد به‌دست آمد. اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارها کم‌تر از ۷ درصد بود. در ۲۵ درصد موارد اختلاف این مقادیر بیش‌تر از ۱۰ درصد بود. گرچه روند منظمی بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل AquaCrop و مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله واسنجی مشاهده نشد؛ لیکن بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در تیمار بدون زئولیت و آبیاری عرف محلی (Z_{0H}) مشاهده شد.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل در جدول (۴) نشان داده شده است. براساس این نتایج، مشاهده می‌شود که مدل AquaCrop به افزایش پارامترهای رطوبت اشباع، عمق مؤثر ریشه، بهره‌وری آب نرمال شده و پوشش تاج اولیه حساسیت کم داشت. همچنین این مدل به کاهش پارامترهای رطوبت اشباع، عمق مؤثر ریشه، پوشش گیاهی هر بنه هنگام جوانه‌زنی، پوشش تاج اولیه و ضریب کاهش پوشش حساسیت کم داشت. این مدل نسبت به افزایش و کاهش سایر پارامترها حساسیت متوسط داشت. براساس نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی مدل انجام شد. مقادیر پارامترهای ورودی حاصل از واسنجی در جدول (۵) و نتایج حاصل از این مرحله در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مقادیر خطای مدل براساس مقادیر آماره‌های RMSE، NRMSE و MBE در

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم آبیاری و مصرف ژئولیت / ۱۲۳

جدول ۴. ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد زعفران

پارامتر	مقدار Se در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۶/۷	۲/۱	متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۴/۹	۴/۱	متوسط
رطوبت اشباع	۱/۵	۰/۸	کم
دمای حداقل	۵/۳	۴/۵	متوسط
دمای حداکثر	۸/۵	۷/۲	متوسط
بارندگی	۳/۳	۱۱/۹	متوسط
عمق مؤثر ریشه	۱/۲	۱/۷	کم
مدت زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه	۹/۴	۴/۱	متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول †	۱/۰	۳/۸	کم-متوسط
ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه ها	۵/۵	۶/۲	متوسط
ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری	۱۱/۲	۷/۹	متوسط
پوشش گیاهی هر بنه هنگام جوانه زنی	۴/۹	۰/۲	متوسط-کم
بهره وری آب نرمال شده	۰/۶	۲/۹	کم-متوسط
پوشش تاج اولیه	۰/۸	۱/۳	کم
بیشینه رشد تاج گیاه	۹/۲	۹/۶	متوسط
ضریب رشد پوشش	۶/۹	۷/۴	متوسط
ضریب کاهش پوشش	۲/۸	۰/۵	متوسط-کم

جدول ۵. مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
عمق مؤثر ریشه	۳۰	سانتی متر	واسنجی
مدت زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه	۱۴۰	روز	واسنجی
شاخص برداشت مرجع *	۴۵	درصد	واسنجی
مدت زمان کاشت تا جوانه زنی	۵	روز	اندازه گیری
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	۱۵۵	روز	اندازه گیری
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول †	۱۹۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۲۴۰	روز	اندازه گیری
ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه ها	۰/۶۰	-	واسنجی
ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری	۰/۶۰	-	واسنجی
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی گراد	پیش فرض ††
ضریب تنش پیری پوشش گیاهی	۰/۶۹	-	پیش فرض
آستانه پایین رشد	۰/۱۴	-	پیش فرض
آستانه بالای رشد	۰/۷۲	-	پیش فرض
پوشش گیاهی هر بنه هنگام جوانه زنی	۵	سانتی متر مربع	واسنجی
بهره وری آب نرمال شده **	۳۵	گرم بر متر مربع	واسنجی
پوشش تاج اولیه	۱	درصد	واسنجی
بیشینه رشد تاج گیاه	۷۵	درصد	واسنجی
دمای پایه رشد	۱۰	درجه سانتی گراد	پیش فرض
ضریب رشد پوشش	۴/۴	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۸/۰	درصد روز	واسنجی
ضریب گیاهی برای تعرق	۰/۶۵	درصد بر روز	پیش فرض
طول مرحله گلدهی	۳۰	روز	اندازه گیری

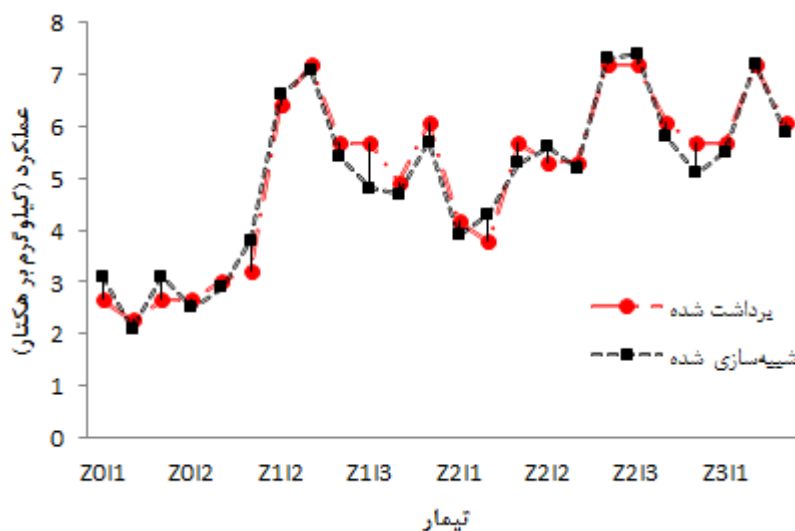
* و **: به دلیل کوچک بودن مقادیر این دو شاخص برای گیاه زعفران، به ترتیب با ضرایب ۱۰۰ و ۱۰ در مدل وارد شدند.

† به دلیل شرایط خاص رشد گیاه زعفران، برای مدل سازی این گیاه فرض شد که محصول در انتهای سال زراعی به دست می آید.

†† مقادیر پیش فرض براساس تجربه (Mirsafi et al., 2016) در نظر گرفته شد.

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های آماری عملکرد و زیست توده زعفران در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

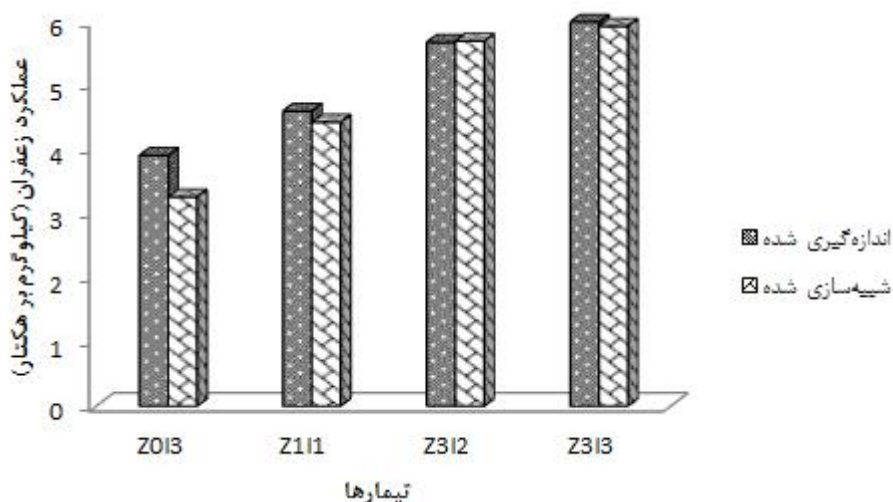
پارامتر	مرحله شبیه‌سازی	RMSE (کیلوگرم بر هکتار)	NRMSE	MBE (کیلوگرم بر هکتار)	d	EF	R ²
عملکرد	واسنجی	۰/۳۵	۰/۰۷	-۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۹۵
	صحت‌سنجی	۰/۴۸	۰/۰۹	-۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۴۲	۰/۹۸
زیست توده	واسنجی	۱۳۳/۹	۰/۱۲	۵۲/۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۷۰
	صحت‌سنجی	۱۵۱/۹	۰/۱۳	۷۴/۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۲



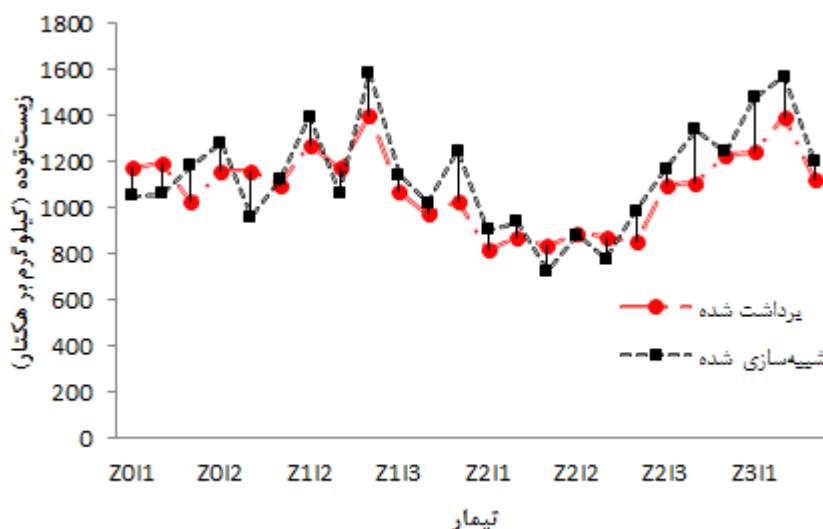
شکل ۱. مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

در شبیه‌سازی را نشان داد. به صورت متوسط نیز در مرحله صحت‌سنجی این مدل دچار خطایی برابر با ۰/۲۲ کیلوگرم در هکتار شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده‌ی زیست توده زعفران با استفاده از مدل AquaCrop و مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله واسنجی نیز نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف به ترتیب برابر با ۲۱ و ۰/۹ درصد بود (شکل ۳).

در شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی عملکرد زعفران با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی نشان داده شده است. با مقایسه این نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود که این مدل در سه تیمار دچار کم‌برآوردی و در یک تیمار دچار بیش‌برآوردی شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین تیمارها به ترتیب برابر با ۰/۶۴ و ۰/۲ کیلوگرم در هکتار بود که خطایی برابر با ۱۶ و ۰/۳ درصد



شکل ۲. مقایسه عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت سنجی



شکل ۳. مقایسه زیست توده اندازه گیری و شبیه سازی شده زعفران با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

خوبی برای شبیه سازی بیوماس داشته باشد. براساس نتایج Mirsafii و همکاران (۲۰۱۶) این مدل در شبیه سازی عملکرد زعفران در تیمار دیم دقت بسیار پایینی داشت. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با مشاهدات این محققان مطابقت داشت.

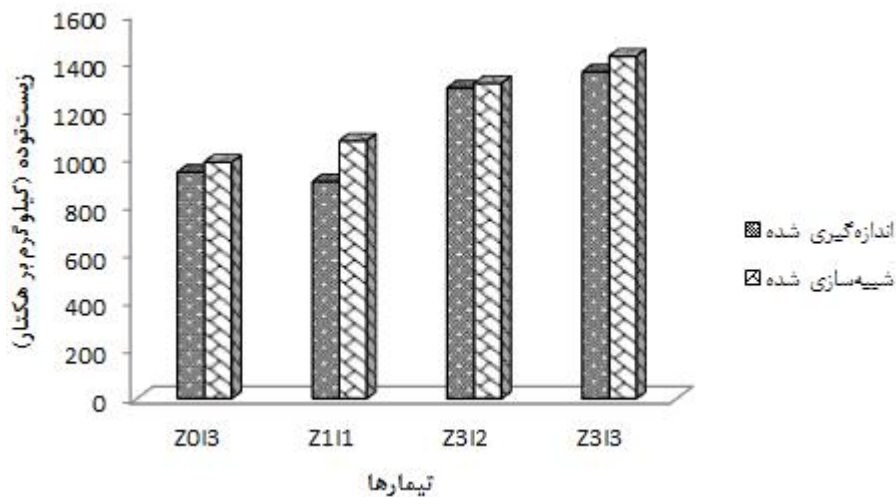
بدیهی به نظر می رسد که در همه مدل های گیاهی انتظار رسیدن به مقادیر اندازه گیری شده غیرمنطقی است. علت آن نیز ساده سازی هایی است که برای شبیه سازی شرایط کشت انجام می شود. این فرضیات در شرایط تنش عمدتاً بیش تر در خوش تغییرات می شود و سبب می شود

با این وجود برای نیمی از تیمارها اختلاف مقادیری بین ۱۰-۱۲ درصد در شبیه سازی زیست توده مشاهده شد. متوسط خطای شبیه سازی زیست توده با استفاده از این مدل برابر با ۱۰/۷۳ درصد به دست آمد. با توجه به مقادیر زیست توده برای این محصول، خطای به دست آمده قابل قبول است. غم اینکه آبیاری عرف محلی برای ۳۷ درصد کل تیمارهای این آزمایش اعمال شد؛ ۲۵ درصد از موارد شامل خطای بالا به این تیمار اختصاص داشت. مطابق شبیه سازی عملکرد زعفران، مدل AquaCrop در تیمارهای با مصرف بسیار پایین آب نتوانسته است دقت

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تنش آبی در شرایط کاربرد زئولیت بیان کرد.

نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۴) مشاهده می‌شود. براساس این نتایج بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱/۵ درصد بود. بیش‌ترین اختلاف در تیمار آبیاری عرف محلی مشاهده شد که نسبت به سایر تیمارها اختلاف بالایی داشت. در این مرحله مدل دارای خطای بیش‌برآوردی شد. به طوری که در همه موارد میزان زیست‌توده کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی شد. به صورت متوسط میزان خطای این مرحله برای شبیه‌سازی زیست‌توده برابر با ۷/۵ درصد (۷۴ کیلوگرم) بود که نسبت به مقادیر به‌دست آمده برای کل زیست‌توده قابل قبول می‌باشد.

که اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده افزایش یابد (موسوی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶). با این وجود، نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی تنش‌های آبی شدید دچار خطای بیشتری می‌گردد. سایر محققان از جمله محمدی و همکاران (۱۳۹۴)، علیزاده و همکاران (۱۳۸۹)، Heng و همکاران (۲۰۰۹) و Andarzian و همکاران (۲۰۱۰) برای سایر گیاهان نیز نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند. در ۲۸ درصد کل تیمارهای مورد آزمایش در مرحله واسنجی، اختلاف بالای مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده متعلق به کاربرد پایین زئولیت بود. گرچه به علت محدود بودن تحقیقات در این زمینه نمی‌توان توجیه مناسبی برای این پدیده بیان کرد؛ لیکن شاید بتوان تغییرات شرایط خاک در اثر کاربرد زئولیت (احمدی، ۱۳۹۳) را عاملی برای افزایش دقت



شکل ۴. مقایسه زیست‌توده اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زعفران با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

خطا در شبیه‌سازی داشته است که این خطا براساس آماره MBE به صورت کم‌برآوردی بوده است. مقدار آماره NRMSE در مرحله واسنجی نشان داد که دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، عالی بود. دقت برازش داده‌ها و کارایی مدل نیز به ترتیب براساس پارامترهای d و EF مطلوب بود. در مرحله صحت‌سنجی

مقایسه مقادیر شاخص‌های آماری برای عملکرد زعفران در مرحله واسنجی نشان داد که میزان خطای این مدل بسیار پایین بود؛ به طوری که مقادیر RMSE و MBE برای این پارامتر به ترتیب برابر با ۰/۳۵ و ۰/۰۶- کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد (جدول ۶). بنابراین مدل AquaCrop در این مرحله تنها ۰/۳۵ کیلوگرم بر هکتار

توسط Mirsaifi و همکاران (۲۰۱۶) ارائه شد. علاوه بر این، مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دچار خطای بیش‌برآوردی شد. کارایی این مدل براساس آماره‌های d و EF در شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله صحت‌سنجی مطلوب بود. نتایج آماره‌های R^2 نیز نشان داد که برازش بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد زعفران بالا بود (شکل ۵). گرچه مقادیر این آماره برای شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران در مرحله واسنجی پایین‌تر از شبیه‌سازی عملکرد بود (شکل ۶). با این وجود، براساس گزارش Mirsaifi و همکاران (۲۰۱۶) می‌توان به این مقادیر اعتماد نمود. این محققان مقادیر R^2 برای شبیه‌سازی زعفران را بین ۰/۴۸ تا ۰/۹۹ گزارش کردند.

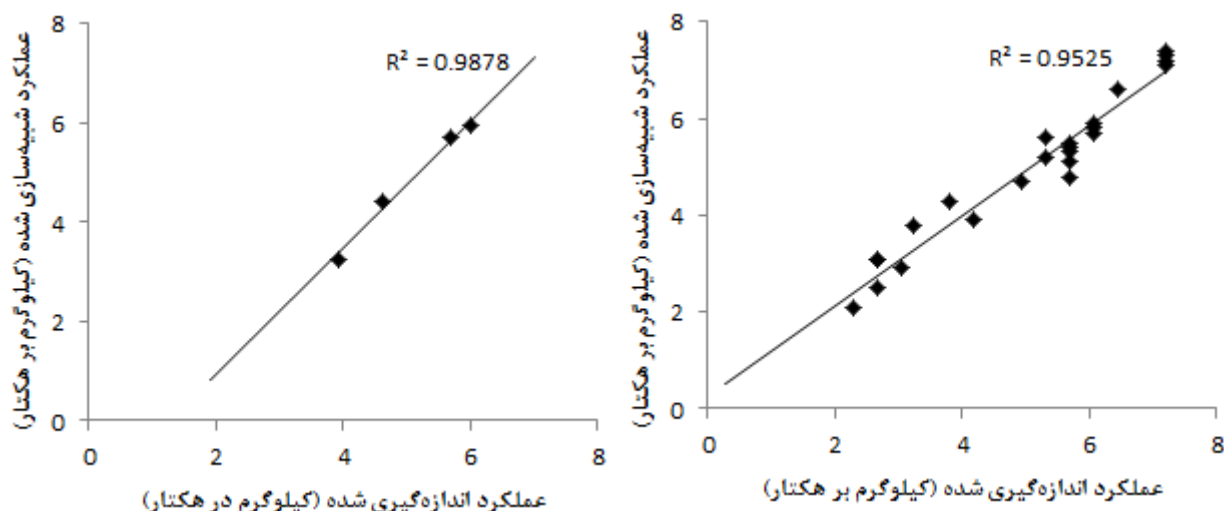
نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور ارزیابی مدل رشد گیاهی AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده زعفران در شرایط کم آبیاری و کاربرد ژئولیت انجام شد. نتایج نشان داد که کم آبیاری سبب افزایش خطای این مدل در شبیه‌سازی شد؛ لیکن کاربرد ژئولیت در شرایط کم آبیاری این میزان خطا را کاهش داد. ارزیابی مدل AquaCrop با استفاده از آماره‌های $RMSE$ ، MBE و $NRMSE$ نشان داد که مقادیر این آماره‌ها در شبیه‌سازی عملکرد زعفران به ترتیب برابر با ۰/۴۸ (کیلوگرم در هکتار)، ۰/۲۱- (کیلوگرم در هکتار) و ۰/۰۹ و برای زیست‌توده به ترتیب برابر با ۱۵۱/۹ (کیلوگرم در هکتار)، ۷۴/۲ (کیلوگرم در هکتار) و ۰/۱۳ بود. این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده به ترتیب دچار خطای کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی شد. با این وجود این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده زعفران داشت. کارایی این مدل اثر شبیه‌سازی عملکرد زعفران با استفاده از مقادیر آماره‌های EF و d به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۰/۹۹ و برای زیست‌توده به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۹

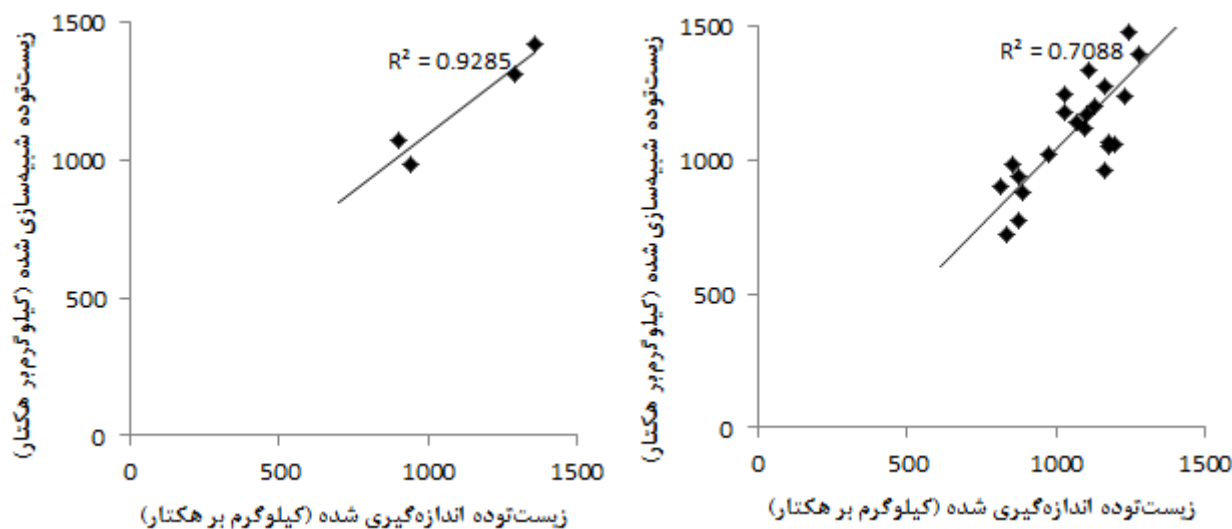
نیز دقت این مدل در شبیه‌سازی عملکرد زعفران قابل قبول بود؛ به طوری که مقادیر $RMSE$ و MBE به ترتیب برابر با ۰/۴۸ و ۰/۲۱- کیلوگرم بر هکتار به دست آمد. گرچه این مقادیر از مرحله واسنجی بزرگ‌تر است لیکن با توجه به مقدار عملکرد زعفران در واحد سطح دقت بالایی را نشان می‌دهند. همانند مرحله واسنجی، در صحت‌سنجی نیز مدل AquaCrop دچار کم‌برآوردی شد. برخی محققان گزارش کرده‌اند که قلیابیت آب آبیاری سبب کم‌برآوردی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد خواهد شد (حسن‌لی و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به جدول (۳) می‌توان این ادعا را دلیلی برای نتایج به دست آمده دانست. مقدار $NRMSE$ در این مرحله نیز برابر با ۰/۰۹ به دست آمد که حاکی از دقت عالی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد زعفران در مرحله صحت‌سنجی است. بنابراین نتایج به دست آمده دقت بهتری نسبت به مقادیر ارائه شده برای این آماره توسط Mirsaifi و همکاران (۲۰۱۶) داشت. مقادیر d و EF نیز برای این مرحله از شبیه‌سازی قابل قبول بود و نشان داد که مدل از کارایی خوبی برای تعیین داده‌ها برخوردار است. مقادیر آماره‌های $RMSE$ و MBE برای شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۱۳۳/۹ و ۵۲/۳ کیلوگرم بر هکتار و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۱۵۱/۹ و ۷۴/۲ کیلوگرم بر هکتار به دست آمدند. مقایسه این آماره‌های نشان می‌دهد که گرچه دقت این مدل در مرحله واسنجی بهتر بوده است؛ لیکن این مدل در هر دو مرحله شبیه‌سازی دقت خوبی داشت. گرچه نسبت به مقادیر زیست‌توده زعفران این مقادیر می‌تواند اندکی بالا باشد. بنابراین برای صحت دقت این مدل به مقادیر $NRMSE$ رجوع شد. با توجه به این آماره، در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، این آماره بزرگتر از ۰/۱ بود. این نتایج نشان داد که گرچه دقت این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران عالی نبود؛ لیکن در بازه خوب قرار داشت. مقادیر این آماره در بازه ۰/۱۲-۰/۴۳

می‌توان بیان کرد که این مدل قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده زعفران در شرایط کم‌آبایی و کاربرد ژئولیت داشت.

بود. مقادیر به دست آمده برای آماره R^2 نیز نشان داد که برازش داده‌ها برای شبیه‌سازی عملکرد $(R^2=0/98)$ و زیست‌توده $(R^2=0/92)$ مطلوب بود. با توجه به این نتایج



شکل ۵. برازش مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد زعفران در دو مرحله واسنجی (راست) و صحت‌سنجی (چپ) با استفاده از مدل AquaCrop



شکل ۶. برازش مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده زعفران در دو مرحله واسنجی (راست) و صحت‌سنجی (چپ) با استفاده از مدل AquaCrop

منابع مورد استفاده

- احمدی، ۱۳۹۳. اثر ژئولیت بر کاهش آبشویی نیترات از خاک شور تحت کشت زعفران، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.
- احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، و حسن سیاری، م. ح. ۱۳۹۲. ارزیابی نوع و مقدار ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت بر سبز شدن زعفران (*Crocus sativus L.*). پژوهش های زعفران. ۱(۲): ۱۰۹-۹۷.
- احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، و سیاری، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus L.*) و تعیین میزان تنش های آبی وارده. بوم شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۲۰-۵۰۵.
- حسن لی، م.، افراسیابی، پ.، و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۳): ۴۹۸-۴۸۷.
- حسینی، م.، و رحیمی، ح.، ۱۳۹۶. اثر تنش رطوبت بر عملکرد و شاخص های کیفی زعفران. پژوهش های زعفران. ۵(۲): ۲۵۵-۲۴۷.
- حیدری، س.، عزیزی، خ.، و اسماعیلی، ا. ۱۳۹۷. تأثیر کود زیستی نیتروکسین، پلیمر سوپرجاذب و روش کاشت بر عملکرد گل و بنه زعفران در شرایط دیم خرم آباد. زراعت و فناوری زعفران، زیر چاپ.
- حیدری نیا، م.، ناصری، ع.، و برومندنسب، س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد AquaCrop در برنامه ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مهندسی منابع آب. ۱(۵): ۴۱-۳۹.
- خاشعی سیوکی، ع.، احمدی، م.، هاشمی، س. ر.، و چالاک، ا. ۱۳۹۵ الف. اثر مقدار ژئولیت و مدیریت آبیاری بر برخی خصوصیات بنه زعفران. زراعت و فناوری زعفران. ۴(۳): ۲۱۳-۲۰۱.
- خاشعی سیوکی، ع.، هاشمی، س. ر.، و احمدی، م. ۱۳۹۵ ب. بررسی اثر سطح ژئولیت پتاسیک و مدیریت آبیاری بر خصوصیات زراعی و عملکرد زعفران (*Crocus sativus L.*). پژوهش های زعفران. ۴(۱): ۴۱-۲۹.
- خاشعی سیوکی، ع.، هاشمی، س. ر.، و احمدی، م. ۱۳۹۵ پ. کاربرد روش ناگچی در ارزیابی سبز شدن زعفران (*Crocus sativus L.*) تحت تأثیر ژئولیت و برنامه ریزی آبیاری. ۴(۲): ۲۷۸-۲۶۶.
- خاشعی سیوکی، ع.، و احمدی، م.، ۱۳۹۴. ژئولیت ها: معرفی و خواص و کاربرد آن. دانشگاه بیرجند با همکاری انتشارات آستان قدس رضوی.
- خرم دل، س.، قشم، ر.، امین غفوری، ا.، و اسماعیل پور، ب. ۱۳۹۲. ارزیابی اثر بافت خاک و سطوح پلیمر سوپرجاذب بر خصوصیات زراعی و عملکرد زعفران. پژوهش های زعفران. ۱(۲): ۱۳۵-۱۲۰.
- علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسائی، م.، رضائی، ه.، و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. آبیاری و زهکشی ایران. ۴: ۲۸۳-۲۷۳.
- فلاحی، ح.، و محمودی، س.، ۱۳۹۷. تأثیر کود آلی و شیمیایی بر رشد و گلدهی گیاه زعفران در دو رژیم آبیاری. زراعت و فناوری زعفران. ۶(۲): ۱۶۶-۱۴۷.
- فیضی، ح.، رضایی، ا.، و مرادی، ر. ۱۳۹۷. واکنش خصوصیات کمی و کیفی گل زعفران به زمان قطع آخرین آبیاری و منابع مختلف کودی. زراعت و فناوری زعفران، زیر چاپ.
- کافی، م. ر.، راشد محصل، م. ح.، کوچکی، ع.، و ملافیلابی، ا. ۱۳۸۱. زعفران؛ فناوری تولید و فرآوری. انتشارات زبان و ادب. ۲۷۹ ص.
- کریمی فرزقی، م.، خزاعی، ح.، کافی، م.، و نظامی، ا. ۱۳۹۷. مقایسه تأثیر روش ها و سطوح آبیاری بر سطح برگ و تولید بنه دختری در گیاه زعفران (*Crocus sativus L.*). زراعت و فناوری زعفران، زیر چاپ.
- محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، انصاری، ح.، و حقوردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۳): ۲۹۵-۲۷۷.
- Andarziana, 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.

- 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.
- Fallahi, H.R., Zamani, G., Mehrabani, M., Aghhavan-Shajari, M., and Samadzadeh, A. 2016. Influence of superabsorbent polymer rates on growth of saffron replacement corms. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 19 (1): 77-84.
- Geerts, S., and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize, *Agronomy Journal*. 101(3):488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron.J.* 101(3), 448-459.
- Juan, J.A., Corcoles, H.L., M-Munoz, R., and Picornell, R. 2009. Yield and yield components of saffron under different cropping systems. *Industrial Crops and Products* 30: 212-219.
- 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.
- 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.
- Mirsafi, Z., Sepaskhah, A. R., Ahmadi, S. H., and Kamgar-Haghighi, A. A., 2016. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.), *Scientia Horticulturae*, 211: 343-351.
- Mollafilabi, A. 2004. Experimental Findings of Production and Echophysiological Aspects of Saffron (*Crocus sativus* L.). *Acta Horticulturae (ISHS)* 650: 195-200.
- 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., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Freres, E. 2012. Refrence manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Sepaskhah, A. R., and Yarami, N. 2010. Evaluation of macroscopic water extraction model for salinity and water stress in saffron yield production, *International Journal of Plant Production*, 4(3): 175-186.
- 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. Assessment of AQUACROP, cropsyst, and wofost models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*. 101: 509-521.
- 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 Water Resources, Wageningen Agricultural University, 167 pp.



Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*Crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amounts

Niazali Ebrahimipak^{*1}, Mohsen Ahmadi², Aslan Eigdernezad³ and Abbas Khashei Siuki⁴

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

*Corresponding author email: nebrahimipak@yahoo.com

2) Ph.D. Graduated of irrigation and drainage, Researcher at Afrazand Natural Zeolite Manufacturer.

3) Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

4) Associated professor, Department of Water Sciences and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Received: 08-07-2018

Accepted: 24-11-2018

Abstract

This research was conducted to evaluate AquaCrop to simulate saffron (*Crocus sativus* L.) yield and biomass under water management and zeolite amounts using collected data during 2013-2015. Treatments consisted of irrigation (traditional: I₁, deficit irrigation as 70% moisture depletion: I₂ and full irrigation: I₃) and zeolite rates (0: Z₀, 0.5: Z₁, 1: Z₂ and 2: Z₃ as weight percentage) divided into two groups. The first group (consisted of 70% data) was used to calibrate and the second one (consisted of 30% data) was considered to validate the accuracy of AquaCrop. The highest differences between measured and simulated data was found in traditional irrigation. Mentioned differences in some treatments with zeolite decreased. Nevertheless, there was no significant relation between those results. RMSE, MBE and NRMSE values for saffron yield were 0.48 (kg.ha⁻¹), -0.21 (kg.ha⁻¹), 0.09, respectively. These values for biomass were 151.9 (kg.ha⁻¹), 74.2 (kg.ha⁻¹) and 0.13, respectively. The aforementioned results showed that AquaCrop had a good accuracy to simulate saffron yield and biomass. Efficiency of the model was found in an appropriate range so that values of EF for calibration and validation stages were 0.32 and 0.42 for saffron yield, respectively, and were 0.99 and 0.99 for saffron biomass, respectively. Regarding the results, AquaCrop had a sufficient precision to simulate saffron yield and biomass under different irrigation and zeolite amounts. As an accurate crop growth model, it is recommended to use this model for simulating saffron yield.

Keywords: Cropping model, Irrigation Scheduling, Potassic Zeolite, Water Stress