

## Evaluation of AquaCrop Model in Simulating Safflower Yield, Biomass and Water Productivity under Different Irrigation Amounts

ABDOLLAH BEHMANESH<sup>1</sup>, ASLAN EGDERNEZHAD<sup>1\*</sup>, SALOOMEH SEPEHRI SADEGHIYAN<sup>2</sup>

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

2., Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

(Received: July. 15, 2021- Revised: Oct. 5, 2021- Accepted: Oct. 11, 2021)

### ABSTRACT

Safflower is one of the most important oily plants whose yield decreases under water stress. Therefore, determining its response to different amounts of irrigation is very important. Hence, the AquaCrop model for simulating safflower under different amounts of irrigation water was evaluated in this research. For this purpose, surface drip irrigation at three levels (T1, T2, and T3 represent 100, 66, and 33% of water requirement, respectively), furrow irrigation at three levels (T4: 100% water supply, T5: application of 50 mm of water at one time during flowering and T6: rainfed), and subsurface drip irrigation (T7) were considered. The results showed that the accuracy of this model for simulating yield (NRMSE <0.2), biomass (NRMSE <0.2) and water productivity (NRMSE <0.3) were in the categories of good, good and medium, respectively. In addition, the error of this model for simulating yield, biomass and water productivity was 22, 12, and 23%, respectively. AquaCrop efficiency was optimal for the three parameters so that the EF values for these three parameters were more than 0.5. According to these results, the use of the AquaCrop model to simulate safflower is recommended.

Keywords: Crop Modeling, Drip Irrigation, Furrow Irrigation, Water Requirement, Water Stress.

---

\* Corresponding Author's Email: a\_eigder@ymail.com

## ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری

عبدالله بهمنش<sup>۱</sup>، اصلا ن اگدرنژاد<sup>۱\*</sup>، سالومه سپهری صادقیان<sup>۲</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۷/۱۹)

### چکیده

گلرنگ یکی از گیاهان روغنی مهم به شمار می‌رود که تحت تنش آبی عملکرد آن کاهش می‌یابد. بنابراین تعیین واکنش آن نسبت به مقادیر مختلف آب آبیاری بسیار حائز اهمیت است. از این رو، در این پژوهش به ارزیابی مدل گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری در کرمانشاه پرداخته شد. بدین منظور، آبیاری قطره‌ای سطحی در سه سطح (T1، T2 و T3 به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۰۰، ۶۶ و ۳۳ درصد نیاز آبی)، آبیاری جویچه‌ای در سه سطح (T4: تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، T5: اعمال ۵۰ میلی‌متر آب آبیاری در یک نوبت در دوره گلدهی و T6: شرایط دیم) و آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (T7) به عنوان تیمارهای این پژوهش در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد ( $NRMSE < 0.2$ )، زیست‌توده ( $NRMSE < 0.2$ ) و بهره‌وری آب ( $NRMSE < 0.3$ ) به ترتیب در دسته‌های خوب، خوب و متوسط قرار داشت. همچنین خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب به ترتیب برابر با ۲۲، ۱۲ و ۲۳ درصد بود. کارایی این مدل برای سه پارامتر مذکور مطلوب بود به طوری که مقادیر EF برای این سه پارامتر بیشتر از ۰/۵ به دست آمد. با توجه به این نتایج، استفاده از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گلرنگ پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری جویچه‌ای، آبیاری قطره‌ای، تنش آبی، مدل‌سازی گیاهی، نیاز آبی.

### مقدمه

و عدم آبیاری قبل از کاشت گلرنگ، برای تأمین رطوبت خاک در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در تیمارهای آبیاری شده در پیش از شروع فصل زراعی، گیاه گلرنگ ۷۰ میلی‌متر از رطوبت خاک را استفاده نمود. این در حالی بود که در تیمارهایی که پیش از فصل زراعی آبیاری نشده بودند تنها ۲۸ میلی‌متر از رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفت. این مهم سبب تفاوت معنی‌داری بین عملکرد و بهره‌وری آب در این تیمارها شد و گزارش گردید که تأمین رطوبت خاک از علل اصلی افزایش بهره‌وری آب و عملکرد گلرنگ می‌باشد (Bhattarai et al., 2020). تغییرات رطوبت خاک در دهه‌های آتی به شدت متأثر از تغییر اقلیم خواهد بود و به همین دلیل اثرات شدیدی بر رشد گلرنگ خواهد داشت. از طرف دیگر، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و افزایش دما و کاهش بارندگی در دهه‌های آتی، نیاز آبی گلرنگ نسبت به شرایط فعلی متفاوت خواهد بود. بنابراین لازم است عملکرد گلرنگ در شرایط مختلف تأمین آب آبیاری مورد بررسی قرار گیرد.

گلرنگ یکی از گیاهان زراعی می‌باشد که کشت آن در سال‌های اخیر در بسیاری از استان‌های کشور گسترش یافته است. اما کمبود آب در دسترس سبب اعمال تنش آبی به این گیاه زراعی شده است. تنش آبی یکی از عوامل محیطی است که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ebrahimian et al., 2019). گرچه، سیستم ریشه‌ای گلرنگ سبب شده است تا این گیاه برای شرایط تنش آبی و مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب باشد (Bhattarai et al., 2020)؛ لیکن نمی‌توان اثرات تنش آبی بر عملکرد آن را نادیده گرفت. در تحقیقی که اثرات چهار سطح تنش آبی ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد تبخیر از تشت تبخیر در طول فصل زراعی بر عملکرد گلرنگ مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که کم آبیاری سبب کاهش عملکرد دانه گلرنگ به میزان ۹/۴ درصد شد و علت اصلی کاهش عملکرد این گیاه زراعی، کاهش وزن دانه و تعداد آن گزارش گردید (Ebrahimian et al., 2019). در پژوهش دیگری دو تیمار آبیاری

با توجه به واکنش متفاوت گلرنگ به مدیریت و مقادیر آب آبیاری در مناطق مختلف کشور، لازم است اثرات تأمین آب آبیاری بر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گلرنگ مورد بررسی قرار گیرد. لیکن انجام همه سناریوهای مدیریت آب آبیاری امری وقت‌گیر و نیازمند صرف هزینه‌های بسیار است که در شرایط فعلی از عهده مراکز تحقیقاتی خارج است (Ebrahimipak et al., 2019). از این رو لازم است از روش‌هایی مانند مدل‌سازی گیاهی استفاده شود. مدل AquaCrop یکی از این مدل‌ها می‌باشد که توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) برای بررسی واکنش گیاهان زراعی به مقادیر مختلف آب آبیاری ارائه شده است (Raes et al., 2012) و تاکنون برای برخی از گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهشی اشاره نمود که در آن با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی تاج پوشش گیاهی کاهو پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که این مدل گیاهی با دقت مطلوب توانست عملکرد، کارایی مصرف آب و تاج پوشش گیاه کاهو را شبیه‌سازی کند (Sabzian et al., 2021). همچنین از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری شامل چهار سطح غرقاب دائم، دور آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار خطای این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده به ترتیب برابر با ۹ و ۵ درصد بود. به همین دلیل گزارش شده است که دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی برنج مطلوب بود (Aalae Bazkiaee et al., 2020). در پژوهشی دیگر برای شبیه‌سازی گندم از سه تیمار تأمین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آب آبیاری برای اعتبارسنجی مدل AquaCrop استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر خطای این مدل ۳/۱۴ و شاخص آماری  $R^2$  بین ۰/۲۵ تا ۰/۹۹ متغیر بود. بر این اساس دقت و کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم قابل قبول گزارش شد (Ghadirian et al., 2021). استفاده از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی کلزا در دشت قزوین با استفاده از دوازده سناریوی مختلف آبیاری نشان داد که دقت و کارایی این مدل قابل قبول بود. به همین دلیل محققان برای برنامه‌ریزی آبیاری کلزا نیز از آن استفاده کردند (Egdernezhad et al., 2019). کاربرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم در دشت بروجرد نشان داد که گرچه این مدل گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی شد؛ لیکن دقت آن مطلوب بود (Ahmadede et al., 2021). از جمله دیگر گیاهان زراعی که با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده‌اند می‌توان به زعفران (Ebrahimipak et al., 2018)، ذرت (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009)، پنبه (Garcia-Villa et al., 2009)، آفتابگردان

(Todorovic et al., 2009) و کینوا (Geerts et al., 2009) اشاره نمود. علی‌رغم اهمیت گیاه گلرنگ، ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده آن کمتر مورد توجه محققان بوده است. از جمله مطالعات محدودی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به بررسی اثر شوری‌های مختلف آب آبیاری تحت آبشویی‌های مختلف بر میزان دقت مدل AquaCrop اشاره نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده گلرنگ بین ۱۰-۸ درصد بود. لیکن حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای ورودی بررسی نگردید (Mousavi Zadeh Mojarad et al., 2018).

بررسی منابع نشان داد که برای توسعه کشت گلرنگ در سطح کشور، لازم است تحقیقات متعددی انجام شود و استفاده از مدل AquaCrop می‌تواند به تسریع و کاهش هزینه‌های تحقیقاتی کمک شایانی نماید. با توجه به اینکه ارزیابی این مدل تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری تاکنون انجام نشده و بررسی این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت و کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ تحت شرایط مختلف مدیریت آب آبیاری در کرمانشاه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### عملیات مزرعه‌ای

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده در دو سال زراعی در یک مزرعه تحقیقاتی در کرمانشاه انجام شد. این مزرعه در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا قرار گرفته است. گیاه گلرنگ در تاریخ ۲۲ اسفند و به مقدار ۳۰ کیلوگرم در هکتار کاشته شد. کشت به صورت خطی انجام شده و برای هر یک از تیمارها ۵ خط کاشت به فاصله ۳۵ سانتی‌متر و به طول ۱۵ متر در نظر گرفته شد. در مرحله ۳ تا ۴ برگگی خطوط کشت تنک شده و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر تنظیم شد، به طوری که تراکم ۲۰ بوته در متر مربع حاصل شد. براساس آزمایش خاک (جدول ۱)، میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد برای دوره رشد گیاه در نظر گرفته شد.

آزمایشات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل آبیاری قطره‌ای سطحی در سه سطح (T1، T2، T3) به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۰۰، ۶۶ و ۳۳ درصد نیاز آبی، آبیاری جویچه‌ای در سه سطح

خاک قرار داده شدند. کلیه آبیاری‌ها بعد از کاشت تا سبز شدن گیاه، در تمام تیمارها یکسان و پس از آن آبیاری مطابق تیمارهای ذکر شده اعمال گردید. مشخصات آب آبیاری در جدول (۲) نشان داده شده است.

(T4): تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، T5: اعمال ۵۰ میلی‌متر آب آبیاری در یک نوبت در دوره گلدهی و T6: شرایط دیم) و آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی (T7) در نظر گرفته شدند. در تیمار آبیاری قطره‌ای زیر سطحی، نوارهای آبیاری قطره‌ای تیپ قبل از کاشت بذور در عمق ۱۵ سانتی‌متری از سطح

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

بافت خاک	Clay	Silt	Sand	Zn	Fe	Mn	کربن آلی (درصد)	پتاسیم قابل		EC (دسی‌زیمنس بر متر)
								جذب	فسفر قابل جذب	
سیلتی رسی	۴۵	۴۲/۳	۳/۷	۱/۳۶	۷/۸	۱/۳۸	۱/۳۸	۴۴۰	۲۶	۱/۲

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه

سدیم محلول (درصد)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> + Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CL <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	pH	TDS (میلی‌گرم بر لیتر)	EC (میکرو موس بر سانتی‌متر)
۱۱/۷	۱/۰۸	۸/۱۵	۱/۱۸	۱/۹	۶/۱۵	۰	۷/۱	۶۴۰	۱۰۰۰

ایستگاه جهت برآورد مشخصات آب و هوایی طرح شامل میانگین دراز مدت ماهیانه پارامترهای درجه حرارت حداکثر و حداقل، بارندگی، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، رطوبت نسبی و مجموع ساعات آفتابی می‌باشد که در جدول (۳) آورده شده است.

آمار و اطلاعات هواشناسی به‌کار رفته در این طرح از ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (واقع در فرودگاه شهید اشرفی اصفهانی) اخذ شد. این ایستگاه در ۴۷ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۱۹/۸ متر می‌باشد. آمار استخراج شده از این

جدول ۳- میانگین طولانی مدت پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ماه	تبخیر و تعرق (mm/day)	ساعات آفتابی (hr)	سرعت باد (Km/d)	رطوبت نسبی (%)	مینیمم درجه حرارت (°C)	ماکزیمم درجه حرارت (°C)
ژانویه	۱/۱۸	۴/۶	۱۶۲/۲	۷۲	-۳/۲	۷/۶
فوریه	۱/۸۱	۵/۷	۱۹۷	۶۵/۸	-۲/۲	۹/۹
مارس	۲/۹۷	۶/۱	۲۶۶/۶	۵۹/۱	۱/۳	۱۴/۵
آوریل	۴/۴۲	۷/۳	۲۶۶/۶	۵۳	۵/۸	۲۰/۷
مه	۵/۸۲	۸/۸	۲۴۰	۴۵/۱	۸/۸	۲۶/۵
ژوئن	۷/۸۴	۱۱/۷	۲۳۱/۱	۲۶/۵	۱۲/۸	۳۳/۸
جولای	۸/۳۸	۱۱/۲	۲۲۶/۸	۲۱/۹	۱۷/۲	۳۸/۱
آگوست	۷/۸۵	۱۱	۲۲۲/۲	۲۱/۴	۱۶/۴	۳۷/۸
سپتامبر	۶/۱۸	۱۰/۳	۲۰۴/۵	۲۳/۱	۱۱/۵	۳۳
اکتبر	۳/۶۴	۷/۹	۱۵۷/۲	۳۸/۳	۷/۴	۲۵/۴
نوامبر	۱/۲	۶/۱	۱۶۴/۴	۵۶/۹	۲/۵	۱۶/۹
دسامبر	۱/۳۳	۴/۶	۱۷۳/۳	۶۹/۱	-۰/۷	۱۰/۷
میانگین	۴/۴۶	۷/۹	۲۰۹/۳	۴۶	۶/۵	۲۲/۹

نوارهای تیپ مورد استفاده در هر قطعه بر روی این انشعابات قرار گرفت.

آبیاری سطحی به روش جوی و پشته (نشتی) با دور آبیاری ۵-۷ روز انجام شده و طراحی سیستم آبیاری نشتی با توجه به شرایط مزرعه انجام شد. میزان آب کاربردی در این تیمار نیز با استفاده از کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. در طراحی سیستم

در این تحقیق آب مورد نیاز با استفاده از سیستم پمپاژ و لوله پلی اتیلن با قطر ۶۳ میلی‌متر به محل مزرعه آزمایشی انتقال داده شد، که از این لوله چهار لوله دیگر با قطر ۶۳ میلی‌متر برای آبیاری قطره‌ای منشعب گردید. در روی هر کدام از این لوله‌ها در ابتدای خط یک شیر ۲ اینچی جهت قطع و وصل جریان و یک کنتور ۲ اینچی برای اندازه‌گیری حجم آب کاربردی نصب شد.

جویچه (متر)،  $P$  محیط خیس شده (متر) که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد و  $a$ ،  $b$  و  $c$  که ضرایب ثابت بودند. این ضرایب به ترتیب برابر با  $۱/۷۸۶$ ،  $۰/۷۸۵$  و  $۷$  به دست آمدند. برای محاسبه میزان دبی ورودی به جویچه، از پارشال فلوم با عرض گلوگاه ۳ اینچ استفاده شد.

$$p = 0.265 \left[ \frac{Qn}{S^{0.5}} \right]^{0.425} + 0.227 \quad (\text{رابطه ۳})$$

آبیاری قطره‌ای با استفاده از نوارهای تیپ و به دورش قرارگیری نوارها روی سطح خاک (آبیاری قطره ای تیپ سطحی) و همچنین قرارگیری نوارهای تیپ در عمق ۱۵ سانتی‌متری از سطح خاک (آبیاری قطره‌ای تیپ زیرسطحی) انجام گرفت. میزان نیاز آبی خالص گلرنگ بر اساس داده‌های روزانه تشتک تبخیر کلاس A در کل دوره کشت که از ایستگاه هواشناسی در مجاورت مزرعه تحقیقاتی اخذ گردید، و با لحاظ کردن ضریب تشتک (جدول ۴) و مقدار  $K_c$  روزانه گیاه گلرنگ (شکل ۱)، و با استفاده از رابطه (۴) بدست آمد.

آبیاری جویچه‌ای برای اینکه مقدار کافی آب، بدون آنکه تلفات زیادی در بر داشته باشد، در سرتاسر جویچه به داخل خاک نفوذ کند، زمان قطع آبیاری  $T_{co}$  با توجه به زمان پیشروی ( $T_r$ )، زمان نفوذ عمق خالص آب ( $T_n$ ) و زمان پسروی ( $T_r$ ) طبق رابطه (۱) محاسبه شد (Walker and Skogerboe, 1987).

$$T_{co} = T_r + T_n - T_r \quad (\text{رابطه ۱})$$

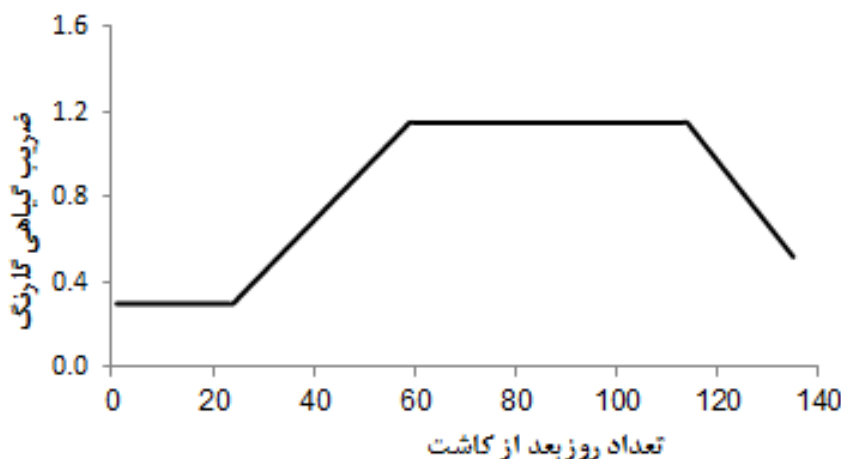
در این طرح چون شیب زمین  $۰/۵$  درصد و انتهای فاروها باز بود، زمان پسروی صفر فرض شد. مقدار  $T_n$  از رابطه (۲) به دست آمد:

$$T_n = \left[ \frac{i_n \left[ \frac{w}{p} \right] - c}{a} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه،  $i_n$  مقدار خالص آب مورد نیاز جهت نفوذ یا مقدار نیاز آبی (میلی‌متر)،  $Q$  دبی ورودی به جویچه (لیتر در ثانیه)،  $n$  ضریب مانینگ،  $S$  شیب جویچه (متر بر متر)،  $W$  عرض

جدول ۴- ضریب تشتک کلاس A برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب (Doorenbos and Pruitt, 1977)

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Agu	Sep	Oct	Nov	Dec
ضریب	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۵۸

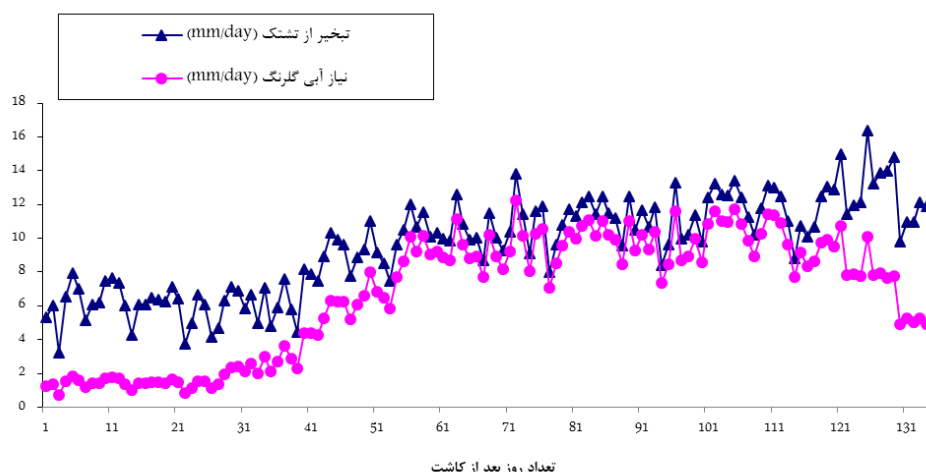


شکل ۱- ضریب گیاهی گلرنگ در طول دوره رشد (Ghamarnia and Sephiri, 2010)

آبیاری‌های جویچه‌ای، قطره‌ای تیپ سطحی و قطره‌ای تیپ زیرسطحی محاسبه گردید. مقادیر تبخیر از تشتک کلاس A و همپنین نیاز آبی گلرنگ در طول دوره رشد در منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نمایش داده شده است. تعداد آبیاری‌های انجام شده در طول دوره رشد گیاه و میزان آب کاربردی در هر یک از تیمارهای مورد بررسی در جدول (۵) ارائه شده است.

$$ET_c = K_c \times K_p \times E_{pan} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن:  $ET_c$  نیاز آبی خالص گیاه گلرنگ (میلی‌متر بر روز)،  $E_{pan}$  میزان تبخیر از تشتک کلاس A (میلی‌متر بر روز) و  $K_c$  و  $K_p$  به ترتیب ضریب گیاهی گلرنگ (جدول ۳) و ضریب تشتک تبخیر کلاس A (جدول ۴) است. سپس نیاز ناخالص آبیاری با احتساب راندمان ۵۰، ۹۰ و ۹۵ درصد به ترتیب برای



شکل ۲- مقادیر تبخیر از تشنگ کلاس A و همپنین نیاز آبی گلرنگ در طول دوره رشد در منطقه مورد مطالعه

جدول ۵- تعداد آبیاری و میزان آب کاربردی در تیمارهای مختلف

تیمار	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
تعداد آبیاری	۳۱	۳۱	۳۱	۱۲	۱	۰	۳۱
مقدار آب کاربردی (mm)	۷۸۷/۳	۵۲۴/۹	۲۶۲/۴	۱۳۹۰/۸	۵۰	۰	۷۴۵/۹

در این روابط،  $Y_x$  و  $Y_a$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول (تن بر هکتار)،  $ET_x$  و  $ET_a$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه (میلی متر بر روز)، و  $K_y$  ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-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 (۳) محاسبه می شود:

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه،  $K_s$  و  $K_c$  به ترتیب ضرایب تنش آبی (-) و گیاهی (-) هستند. میزان تولید روزانه شاخص برداشت نیز از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$HI_i = \frac{HI_{ini} HI_0}{HI_{ini} + (HI_0 - HI_{ini}) \exp^{-HI_i t}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این رابطه،  $HI$  شاخص برداشت در روز  $t$ ،  $HI_0$ ،  $HI_{ini}$  شاخص برداشت مرجع (-)، شاخص برداشت اولیه (-)، ضریب رشد شاخص برداشت (عکس روز) و  $t$  زمان (روز) است.

#### تحلیل حساسیت

پیش از انجام واسنجی، ابتدا مدل AquaCrop با استفاده از رابطه (۱۰) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت (Geerts et al., 2009):

$$S_c = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این رابطه،  $S_c$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $P_m$  مقدار

در طول فصل رشد، مقادیر پوشش گیاهی برای همه تیمارها در زمان های ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۲۵ روز پس از کاشت اندازه گیری شد. همچنین میزان رطوبت خاک در سه عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری، سه مرتبه در طول دوره رشد گیاه گلرنگ در مراحل رشد توسعه ای، میانی و پایانی به ترتیب ۶۰، ۸۵ و ۱۱۰ روز پس از کاشت بذور قبل و بعد از آبیاری برای تیمارهای T1، T2، T3 و T7 اندازه گیری شد. در انتهای فصل رشد، برداشت محصول به صورت دستی انجام گرفت، میزان زیست توده پس از خشک شدن به وسیله ترازو اندازه گیری شد و پارامتر شاخص برداشت (HI) نیز بر اساس عملکرد اقتصادی  $Y$ : عملکرد دانه (kg/ha) و  $Ps$ : عملکرد کاه و کلش (kg/ha) با استفاده از رابطه (۵) تعیین شد.

$$HI = \frac{Y}{P_s + Y} \quad (\text{رابطه ۵})$$

#### تشریح مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با استفاده از تبخیر-تعرق (رابطه ۶) 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 (۷) جایگزین شاخص سطح برگ شده است.

$$\left( \frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left( \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (\text{رابطه ۷})$$

دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل‌های رشد گیاهی مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل 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.

### نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی متفاوت بود (جدول ۶). برخی از پارامترها نظیر پوشش گیاهی اولیه، طول دوره گلدهی، عمق ریشه و زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه اثر کمی بر نتایج مدل AquaCrop داشتند. این مدل به تغییرات پارامترهای زمان از کاشت تا حداکثر پوشش و نرخ کاهش پوشش گیاهی حساسیت متوسط و نسبت به تغییرات پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده و شاخص برداشت حساسیت زیاد نشان داد. تغییرات برخی پارامترها نظیر ضریب گیاهی و زمان از کاشت تا گلدهی در حالت کمتر از مقدار اولیه بر میزان حساسیت این مدل تاثیر زیادی داشته در حالی که در حالت بیشتر از مقدار اولیه حساسیت متوسطی بر نتایج مدل AquaCrop نشان دادند. این نتایج با مشاهدات (Ghadirian *et al.*, 2021) مطابقت داشت. براساس این نتایج، در مرحله واسنجی می‌بایست دقت بیشتری نسبت به تغییرات پارامترهای با حساسیت متوسط و زیاد داشت. با توجه به این موضوع، واسنجی مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های سال اول کاشت برای گیاه گلرنگ انجام شد. مقادیر به دست آمده از این مرحله در جدول (۷) نشان داده شده است.

عملکرد و زیست‌توده شبیه‌سازی شده و مشاهداتی گیاه گلرنگ در مرحله واسنجی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، حداقل و حداکثر اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به ترتیب برابر با ۳ و ۶۸ درصد بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای T1 و T6 مشاهده شد. اختلاف بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در شرایط دیم (T6) برابر با ۳۸۹ کیلوگرم بر هکتار بود که از نظر کمی نیز مقدار بالایی را نشان داد. این اختلاف برای تیمارهای T2، T7 و T4 به ترتیب برابر با ۸/۵، ۸/۴ و ۷/۵ درصد بود. در تیمار T3 که تنها ۳۳ درصد نیاز آبی گلرنگ تأمین شد؛ اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر با ۵۸ درصد بود. با توجه به این نتایج، دقت مدل AquaCrop در شرایط کم‌آبیاری شدید و شرایط کاهش یافت. علت آن، کاهش دقت این مدل در شبیه‌سازی

برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. به‌منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می‌یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس،  $S_c > 15$  حساسیت بالا،  $2 < S_c < 15$  حساسیت متوسط،  $S_c < 2$  حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (Geerts *et al.*, 2009). سپس، جهت تعیین مقادیر پارامترهای ورودی این مدل، با استفاده از داده‌های سال اول واسنجی انجام شد. واسنجی برای کلیه داده‌های ورودی انجام شد و جهت صحت نتایج به دست آمده در این مرحله از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF) و شاخص توافق (d) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۱۱) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند. پس از واسنجی، مقادیر پارامترهای ورودی این مدل گیاهی تعیین شد. سپس با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از سال دوم مدل AquaCrop مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در این مرحله نیز از شاخص‌های آماری ذکر شده استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}_i}} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

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. 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. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲۱ و بیشتر از ۰/۳۱ به ترتیب نشان

این عامل به تنهایی بر رشد گلرنگ اثر نداشته باشد. به همین دلیل مدل AquaCrop یک مدل آب-محور است (Ebrahimipak *et al.*, 2018). از این رو اعمال کم‌آبیاری، به خصوص در تیمار T3، سبب شد تا این مدل عملکرد گلرنگ را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کند.

رطوبت خاک و واکنش گیاه به این شرایط در شرایط کم‌آبیاری است. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Ebrahimipak *et al.*, 2018; Egdernezhad *et al.*, 2019). علت آن به ماهیت این مدل گیاهی برمی‌گردد. ساختار مدل AquaCrop به گونه‌ای است که رشد گیاه تحت تأثیر میزان رطوبت موجود در خاک قرار می‌گیرد در حالی که ممکن است

جدول ۶- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گلرنگ

پارامتر	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
پوشش گیاهی اولیه	۱/۱	۰/۵	کم
نرخ رشد پوشش گیاهی	۰/۵	۱۲/۰	کم-متوسط
حداکثر پوشش گیاهی	۱/۳	۲/۲	کم-متوسط
نرخ کاهش پوشش گیاهی	۸/۳	۲/۲	متوسط
زمان از کاشت تا سبز شدن	۲۰/۲	۰/۸	زیاد-کم
زمان از کاشت تا حداکثر پوشش	۱۲/۷	۱۰/۸	متوسط
زمان از کاشت تا پیری	۰/۲	۱۸/۰	کم-متوسط
زمان از کاشت تا بلوغ	۱۷/۷	۱۲/۲	زیاد-متوسط
زمان از کاشت تا گلدهی	۸/۳	۱۵/۲	متوسط-زیاد
طول دوره گلدهی	۰/۲	۰/۲	کم
عمق ریشه	۰/۸	۰/۵	کم
زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه	۰/۲	۱/۱	کم
ضریب گیاهی	۱۰/۰	۱۶/۳	متوسط-زیاد
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۷/۷	۲۰/۵	زیاد
شاخص برداشت	۲۴/۱	۱۷/۵	زیاد

جدول ۷- مقادیر برخی پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

پارامتر	واحد	مقدار اولیه	مقدار نهایی	توضیحات
پوشش گیاهی اولیه	درصد	۱/۵	۰/۲۹	واسنجی شده
ضریب رشد پوشش گیاهی	درصد بر روز	۸/۷	۲۲	واسنجی شده
نرخ رشد پوشش گیاهی	درصد بر روز	۸/۷	۲۲	واسنجی شده
حداکثر پوشش گیاهی	درصد	۸۵	۹۸	واسنجی شده
ضریب کاهش پوشش	درصد بر روز	۸	۱۳/۶	واسنجی شده
زمان از کاشت تا جوانه‌زنی	روز	۴	۱۸	واسنجی شده
زمان از کاشت تا حداکثر پوشش	روز	۸۵	۵۶	واسنجی شده
زمان از کاشت تا پیری	روز	۱۲۰	۱۰۵	واسنجی شده
زمان از کاشت تا بلوغ	روز	۱۳۵	۱۲۷	واسنجی شده
زمان از کاشت تا گلدهی	روز	۹۰	۷۸	واسنجی شده
طول دوره گلدهی	روز	۳۰	۱۶	واسنجی شده
حداکثر عمق ریشه	متر	۱	۲	واسنجی شده
زمان برای رسیدن به حداکثر عمق ریشه	روز	۷۰	۱۰۰	واسنجی شده
بهره‌وری آب نرمال شده	گرم بر متر مربع	۱۸	۱۷	واسنجی شده
شاخص برداشت	-	۳۰	۳۱	واسنجی شده
حد بالای مربوط به توسعه پوشش گیاهی	-	۰/۲۵	۰	واسنجی شده
حد پایین مربوط به توسعه پوشش گیاهی	-	۰/۵۵	۰/۳۵	واسنجی شده
ضریب شکل برای توسعه پوشش گیاهی	-	۳/۰	۲/۵	واسنجی شده
حد بالای مربوط به بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۵	۰/۲۵	واسنجی شده
ضریب شکل منحنی مربوط به بسته شدن روزنه‌ها	-	۳	۲/۵	واسنجی شده
حد بالای زوال پوشش گیاهی	-	۰/۸۵	۰/۵۵	واسنجی شده
ضریب شکل منحنی مربوط به زوال پوشش گیاهی	-	۳/۰	۲/۵	واسنجی شده

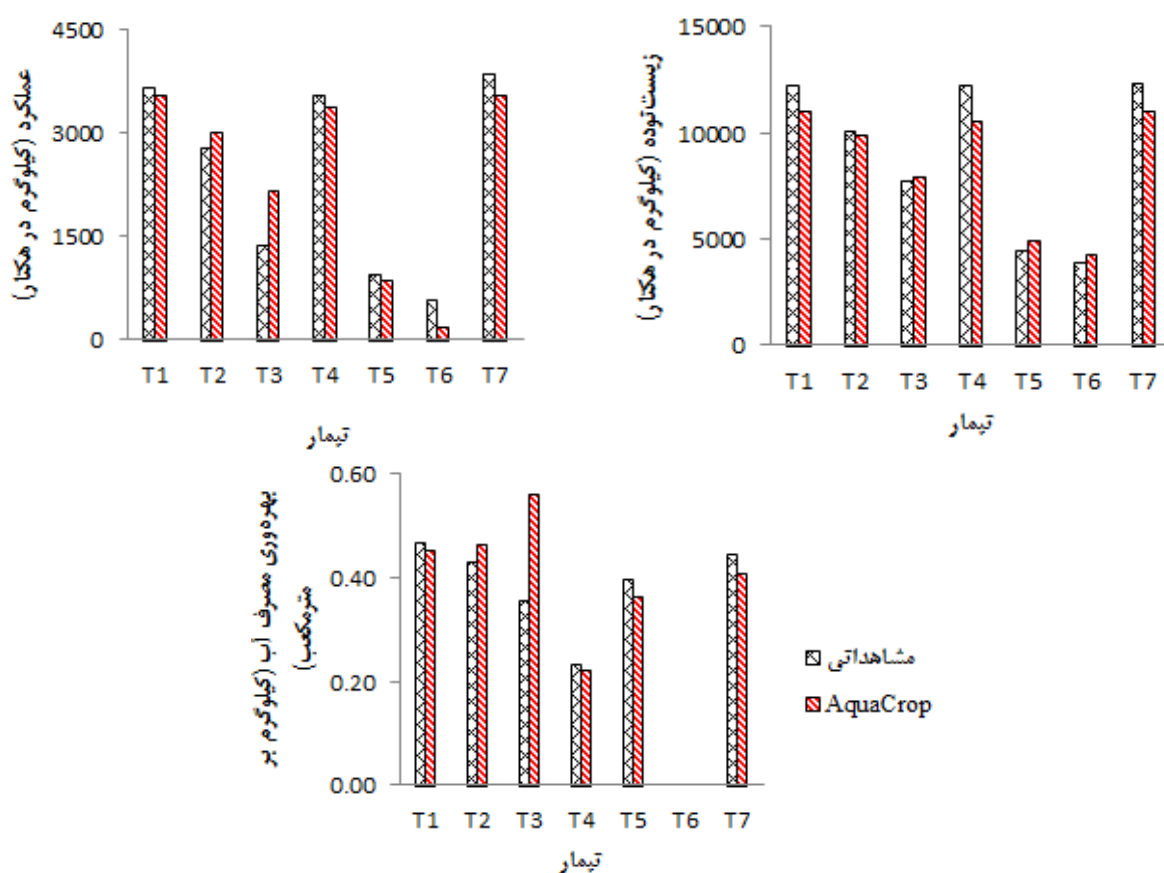
شده و مشاهداتی به ترتیب در تیمارهای T2 و T4 مشاهده شد.

بیشترین و کمترین اختلاف بین زیست‌توده شبیه‌سازی



به ترتیب برابر با ۹ و ۲۳ درصد بود که این نتایج را تأیید می‌کند. مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی گیاه گلرنگ در مرحله واسنجی نیز در شکل (۳) آورده شده است. متوسط اختلاف برای این پارامتر برابر با ۲۳ درصد بود. در دو تیمار T1 و T4 کمترین اختلاف بهره‌وری آب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به دست آمد. این مقادیر به ترتیب برابر با ۳ و ۴ درصد بود. بیشترین اختلاف در تیمار T3 با مقدار ۵۸ درصد مشاهده شد. در سایر تیمارها اختلاف بین بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کمتر از ۸ درصد بود.

مقادیر اختلاف برای این تیمارها به ترتیب برابر با ۲ و ۱۳ درصد بود. اختلاف زیست‌توده شبیه‌سازی شده نسبت به مقدار واقعی برای تیمارهای T1، T3، T5، T6 و T7 به ترتیب برابر با ۹/۷، ۲/۵، ۱۱/۵، ۱۰/۷ و ۱۰/۹ درصد بود. این نتایج نشان داد که روند منظمی بین مقادیر آب آبیاری و خطای شبیه‌سازی زیست‌توده در این تیمارها وجود نداشت لیکن دقت مدل AquaCrop برای همه تیمارها قابل قبول بود. مقایسه این نتایج با مقادیر به دست آمده برای عملکرد نشان داد که دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی زیست‌توده گلرنگ بیشتر از عملکرد آن بود. متوسط اختلاف بین زیست‌توده و عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی



شکل ۳- مقایسه عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب مشاهداتی گیاه گلرنگ نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

بود. آماره NRMSE نشان داد که دقت این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده، عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب در دسته عالی، خوب و متوسط قرار داشت. دو آماره EF و d نشان داد که کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی این سه پارامتر مطلوب بود. در شکل (۴) نیز همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان داده شده است. با توجه به پراکنش مقادیر در اطراف خط ۱:۱، مشاهده می‌شود که تمایل مقادیر عملکرد و زیست‌توده به سمت زیر این خط و تمایل نقاط برای بهره‌وری آب به سمت بالای این خط است. این نتایج با آماره MBE در جدول (۸) مطابقت

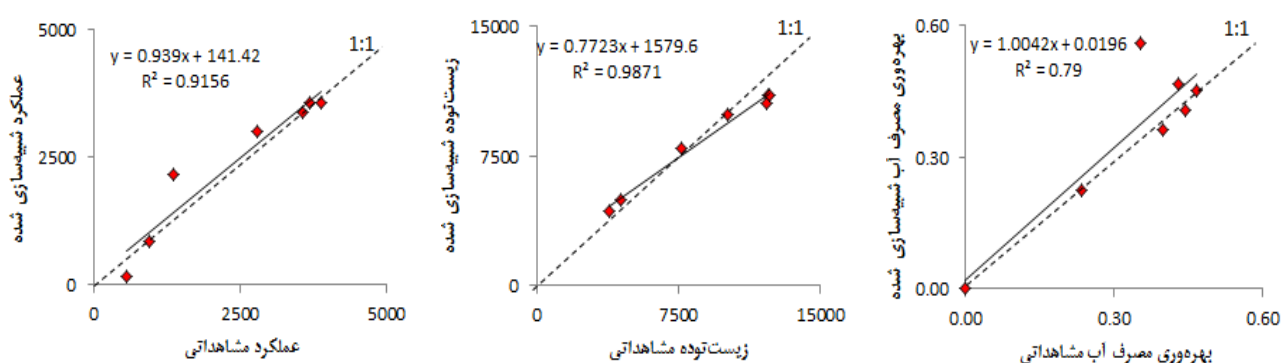
مقایسه آماری نتایج به دست آمده از مدل AquaCrop نسبت به مقادیر مشاهداتی گیاه گلرنگ در مرحله واسنجی در جدول (۸) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر آماره MBE، این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده گلرنگ دچار خطای کم‌برآوردی و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی شد. مقادیر آماره RMSE نشان داد که خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۹۵ تن در هکتار بود. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب برابر با ۰/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب

حالی که در دو پارامتر زیست توده و عملکرد، شیب خط کمتر از یک است. بنابراین با افزایش این دو پارامتر، خطای بیش برآوردی برای مدل AquaCrop و با کاهش این دو پارامتر، خطای کم برآوردی برای مدل AquaCrop انتظار می رود.

دارد. آماره  $R^2$  برای هر سه پارامتر نشان داد که مدل AquaCrop به خوبی توانست تغییرات عملکرد، زیست توده و بهره‌وری آب را شبیه‌سازی نماید. معادله خط به دست آمده برای بهره‌وری آب دارای شیب بیشتر از یک است. این نشان می‌دهد که این مدل همواره در تعیین این پارامتر دچار بیش برآوردی می‌گردد. در

جدول ۸- نتایج آماری مقایسه پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گلرنگ در مرحله واسنجی

پارامتر	واحد	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D	$R^2$
عملکرد	تن بر هکتار	-۰/۰۴	۰/۳	۰/۱۵	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۹۱
زیست توده	تن بر هکتار	-۰/۴۶	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۹۸
بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۲۲	۰/۷۴	۰/۹۸	۰/۷۹

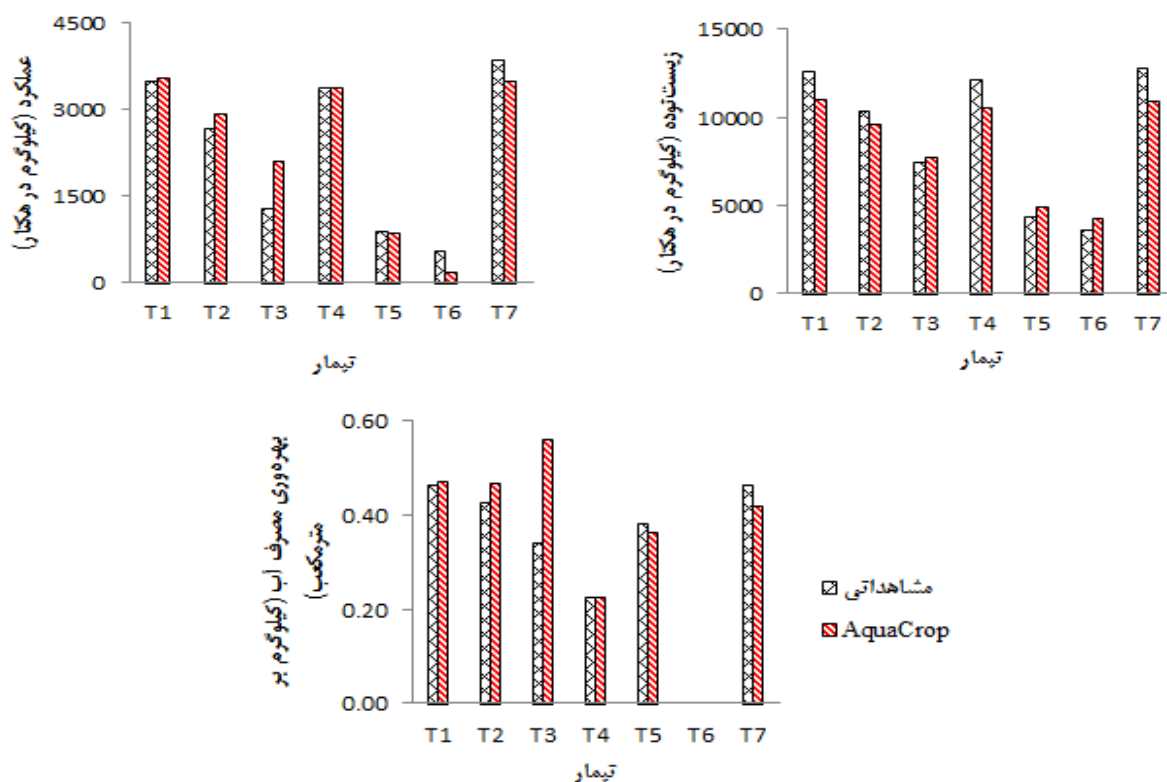


شکل ۴- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد (تن بر هکتار)، زیست توده (تن بر هکتار) و بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) گیاه گلرنگ با استفاده از مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

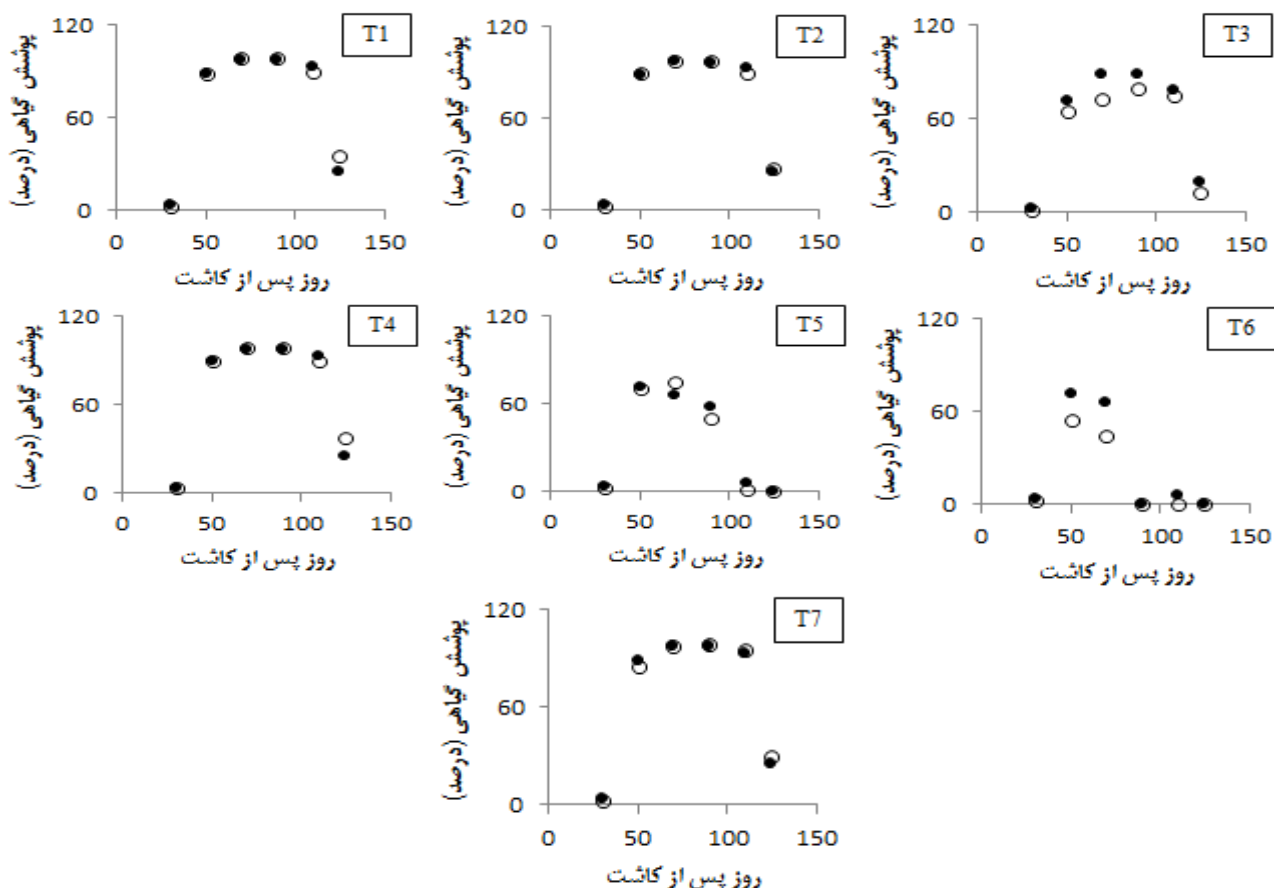
عملکرد برآورد شد.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بهره‌وری آب گیاه گلرنگ در مرحله صحت‌سنجی نیز در شکل (۵) ارائه شده است. در تیمار T3 (تأمین ۳۳ درصد نیاز آبی در آبیاری قطره‌ای)، اختلاف بین بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برابر با ۵۸ درصد بود. در سایر تیمارها این اختلاف کمتر از ۸ درصد بود. این نتایج در مرحله واسنجی نیز مشاهده شد. علت این نتایج در شکل‌های (۶) و (۷) قابل توصیف است. در شکل (۶) مقادیر پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop و مشاهداتی گیاه گلرنگ نشان داده شده است. با توجه به اینکه کارایی این مدل گیاهی به میزان دقت آن در شبیه‌سازی پوشش گیاهی وابسته است؛ افزایش اختلاف بین مقادیر پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی سبب افزایش اختلاف بین عملکرد، زیست توده و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌گردد.

عملکرد و زیست توده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده گیاه گلرنگ در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۵) نشان داده شده است. بیشترین و کمترین اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در این مرحله به ترتیب در تیمارهای T4 (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی در روش جویچه‌ای) و T6 (تیمار دیم) به دست آمد. مقادیر اختلاف برای این دو تیمار به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۶۶ درصد بود. اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای تیمارهای T1، T2، T3، T5 و T7 به ترتیب برابر با ۱/۷، ۹/۷، ۶۳، ۴/۹ و ۹/۶ درصد بود. همانطور که در مرحله واسنجی نیز مشاهده شد، با کاهش مقدار آب مصرفی، خطای این مدل نیز افزایش یافت. با این وجود این روند برای زیست توده مشاهده نشد. اختلاف بین بیشترین و کمترین زیست توده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۳ (T3) و ۱۹/۶ (T6) درصد بود. این نتایج مشابه مرحله واسنجی بود. از طرف دیگر، همانطور که در مرحله واسنجی مشاهده شد، دقت این مدل برای شبیه‌سازی زیست توده بیشتر از



شکل ۵- مقایسه عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب مشاهداتی گیاه گلرنگ نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی



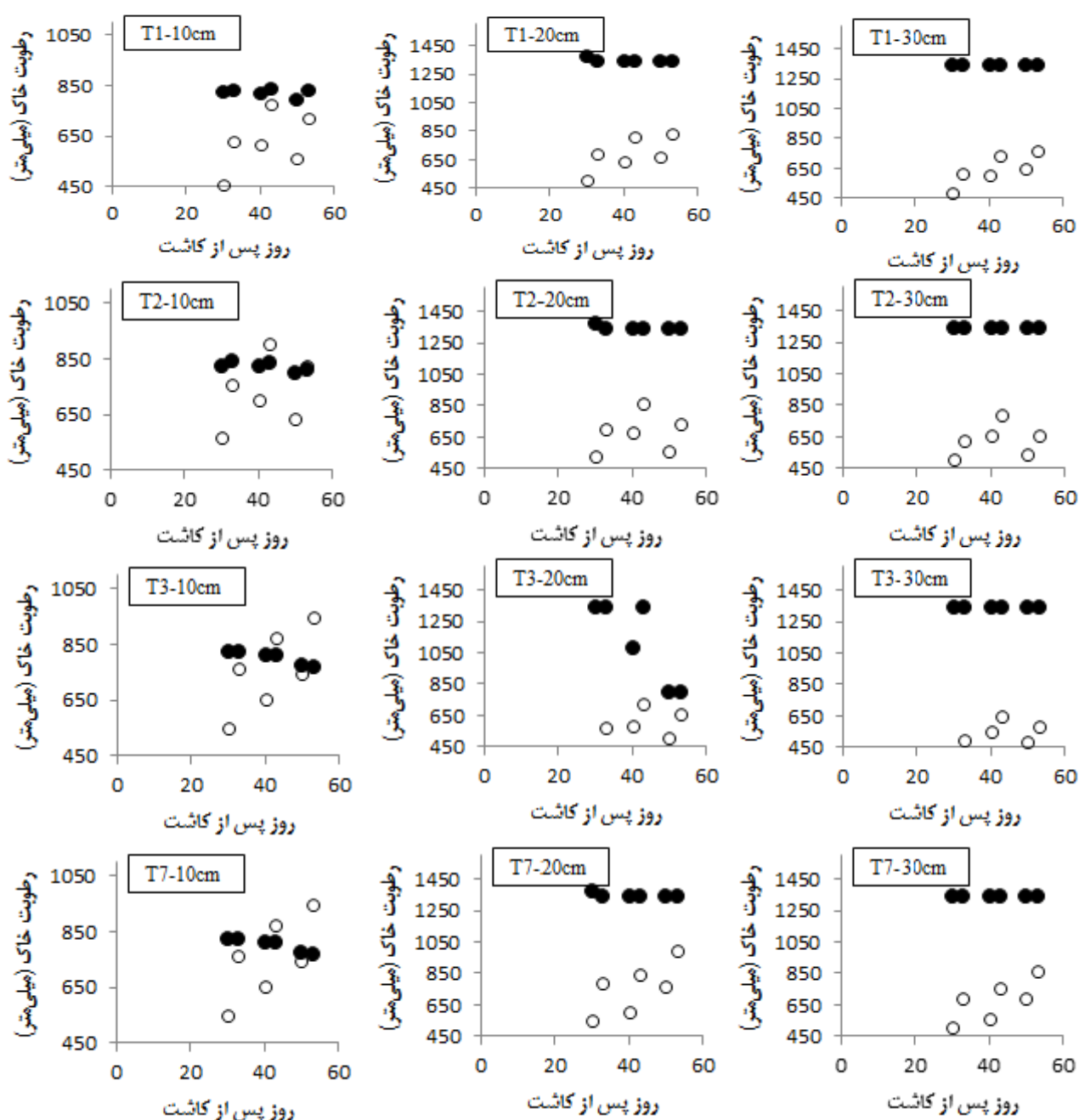
شکل ۶- مقایسه پوشش گیاهی مشاهداتی (سفید) و شبیه‌سازی شده (سیاه) با مدل AquaCrop گیاه گلرنگ در طول دوره رشد

برای پوشش گیاهی در دسته ضعیف قرار گرفت (جدول ۹) و

با افزایش تنش آبی در تیمار T6، مقدار آماره NRMSE

شبیه‌سازی رطوبت خاک بسیار ضعیف عمل کرد به طوری که دقت و کارایی این مدل برای هیچکدام از تیمارها قابل قبول نبود (شکل ۷). با این وجود دقت این مدل در لایه ۱۰-۰ سانتی‌متر بیشتر از لایه‌های زیرین بود. این عامل می‌تواند دلیلی بر خطای مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد گلرنگ باشد. چون این مدل گیاهی بر پایه جذب آب به شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده می‌پردازد (Ebrahimipak et al., 2018)، کاهش دقت در شبیه‌سازی رطوبت خاک سبب کاهش دقت آن به خصوص در تعیین عملکرد و بهره‌وری آب می‌گردد.

کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی در این تیمار کاهش یافت. به همین دلیل دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب در این تیمار کاهش یافت. همچنین چون این مدل در تعیین رطوبت خاک در تیمار T3 دچار خطای بیشتری نسبت به سایر تیمارها شد، مقادیر بهره‌وری آب در این تیمار اختلاف بیشتری با مقادیر مشاهداتی داشت. در حالت کلی، در تیمارهای T5، T3 و T6، مدل AquaCrop مقدار پوشش گیاهی را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرد. بنابراین مقادیر زیست‌توده در این تیمارها نیز بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی شد. مدل AquaCrop در



شکل ۷- مقایسه بین رطوبت خاک مشاهداتی (سفید) و شبیه‌سازی شده (سیاه) با مدل AquaCrop در طول دوره رشد

جدول ۹- نتایج آماری مقایسه پوشش گیاهی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop گیاه گلرنگ

تیمار	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
T1	-۱/۳	۳/۴	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹
T2	-۰/۱	۱/۷	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹
T3	۷/۰	۸/۵	۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۹۹
T4	-۲/۰	۵/۳	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹
T5	۱/۰	۵/۲	۰/۱۵	۰/۹۸	۰/۹۹
T6	۷/۴	۱۱/۲	۰/۶۵	۰/۸۴	۰/۹۷
T7	-۰/۵۵	۲/۵	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹

جدول ۱۰- نتایج آماری مقایسه رطوبت خاک مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در عمق (۳۰-۰) سانتی‌متری

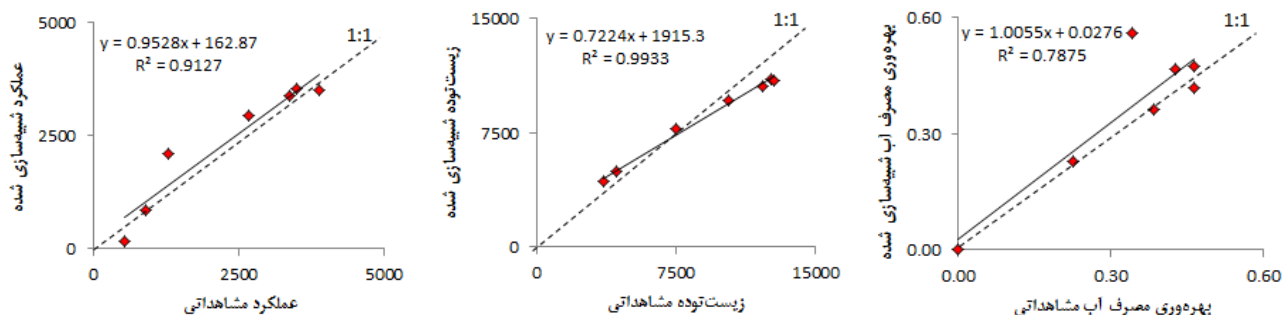
تیمار	عمق (سانتی‌متر)	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
T1	۰-۱۰	۱۹۵/۳	۲۱۸/۵	۰/۳	۰/۸۸	۰/۹۷
	۱۰-۲۰	۵۸۸/۲	۶۰۸/۸	۰/۸	۰/۳۸	۰/۹۱
	۲۰-۳۰	۷۰۱/۸	۷۰۷/۸	۰/۹	-۰/۱۹	۰/۸۷
T2	۰-۱۰	۹۱/۱	۱۴۱/۳	۰/۱۹	۰/۹۶	۰/۹۹
	۱۰-۲۰	۶۶۸/۱	۶۷۸/۵	۰/۹	۰/۰۳	۰/۸۸
	۲۰-۳۰	۷۱۳/۷	۷۱۹/۷	۰/۹	-۰/۲۷	۰/۸۶
T3	۰-۱۰	۴۷/۰	۱۵۳/۳	۰/۲۰	۰/۹۶	۰/۹۹
	۱۰-۲۰	۵۴۰/۷	۶۰۱/۶	۰/۹	-۰/۰۴	۰/۸۷
	۲۰-۳۰	۸۱۵/۶	۸۱۹/۳	۰/۹	-۱/۳	۰/۸۰
T7	۰-۱۰	۰/۱۲	۰/۱۶۰	۰/۱۹	۰/۹۶	۰/۹۹
	۱۰-۲۰	۵۸۸/۴	۶۰۸/۸	۰/۸	۰/۳۸	۰/۹۱
	۲۰-۳۰	۶۶۵/۰	۶۷۵/۲	۰/۹	۰/۰۳	۰/۸۸

نتایج در شکل (۵) مشاهده می‌شود به طوری که در شرایط دیم (T6)، کم‌برآوردی برای عملکرد مشاهده می‌شود. شیب خط نیز برای زیست‌توده کم است (شکل ۸)، بنابراین مدل AquaCrop همواره دچار خطای کم‌برآوردی می‌شود. تنها در صورتی خطای بیش‌برآوردی در شبیه‌سازی زیست‌توده مشاهده می‌شود که مقدار آب آبیاری بسیار کم باشد. در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود که زیست‌توده شبیه‌سازی شده در تیمارهای T3، T5 و T6 بیشتر از زیست‌توده واقعی است. خطای این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر پایین بود. براساس آماره NRMSE، دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده در دسته خوب و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در دسته متوسط قرار داشت. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر مطلوب بود.

مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای پارامترهای عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ در مرحله صحت‌سنجی در جدول (۱۱) نشان داده شده است. مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی و برای شبیه‌سازی زیست‌توده دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج با توجه به شکل (۸) قابل توجیه است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ پراکنش مقادیر عملکرد و بهره‌وری آب در بالای خط ۱:۱ و پراکنش مقادیر زیست‌توده در پایین خط ۱:۱ قرار دارد. همانند مرحله واسنجی، شیب خط برای بهره‌وری آب بیشتر از یک است. بنابراین این مدل برای شبیه‌سازی این پارامتر همواره دچار خطای بیش‌برآوردی می‌گردد. برای عملکرد، چون شیب خط به یک نزدیک است، در تنش‌های بسیار زیاد خطای کم‌برآوردی مشاهده می‌شود. این

جدول ۱۱- نتایج آماری مقایسه پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گلرنگ در مرحله صحت‌سنجی

پارامتر	واحد	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d	R <sup>2</sup>
عملکرد	تن بر هکتار	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۹۰	۰/۹۹	۰/۹۱
زیست‌توده	تن بر هکتار	-۰/۵۹	۱/۱	۰/۱۳	۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۹۹
بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۷۲	۰/۹۸	۰/۷۸



شکل ۸- همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده عملکرد (تن بر هکتار)، زیست‌توده (تن بر هکتار) و بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) گیاه گلرنگ با استفاده از مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

## نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی هر سه پارامتر مورد مطالعه مطلوب برآورد گردید ( $EF > 0.98$ ). با کاهش مقدار آب مصرفی، دقت این مدل برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی کاهش یافت و این موضوع سبب افزایش خطای شبیه‌سازی گردید. همچنین این مدل ضعف زیادی در شبیه‌سازی رطوبت خاک داشت. بنابراین، استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گلرنگ پیشنهاد می‌شود لیکن کاربرد آن برای شبیه‌سازی بیلان رطوبتی خاک توصیه نمی‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در این تحقیق دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گلرنگ بررسی شد. نتایج آماره MBE نشان داد که این مدل در مرحله صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی عملکرد (۰/۰۵ تن در هکتار) و بهره‌وری آب (۰/۰۳ تن در هکتار) دچار خطای بیش‌برآوردی و برای شبیه‌سازی زیست‌توده (۰/۵۹- تن در هکتار) دچار خطای کم‌برآوردی شد. دقت این مدل برای شبیه‌سازی دو پارامتر عملکرد و زیست‌توده خوب ( $NRMSE < 0.2$ ) و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب متوسط بود. ( $NRMSE < 0.3$ ) کارایی این مدل نیز برای

## REFERENCES

- Aalaee Bazkiaee, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., Rezaei, M. and Akbarzadeh, S. (2020). Simulation of growth and yield and evaluation of rice production productivity under irrigation management and planting date using Aquacrop model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 9(2), 17-34. (In Farsi)
- Ahmadee, M., Ghanbarpour, M., Egdernezhad, A. (2021). Determining Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. *Water Management in Agriculture*. In press. (in Persian with extended abstract in English).
- Bhattarai, B., Singh, S., Angadi, S. V., Benga, S., Saini, R. and Auld, D. (2020). Spring safflower water use patterns in response to pre-season and in-season irrigation applications. *Agricultural Water Management*, 228, 105876.
- Ebrahimi, E., Seyyedi, S. M., Bybordi, A. and Damalas, Ch. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, 218, 149-157.
- Ebrahimipak, N. A., Egdernezhad, A., Tafteh, A. and Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3), 715-726. (In Farsi)
- Ebrahimipak, N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A. and Khashei Siuki, A. (2018). Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(1), 117-132. (in Farsi).
- Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Ahmadee, M. (2019). Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, *Water Management in Agriculture*, 5(2): 53-64. (in Persian with extended abstract in English).
- Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. and Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101, 477-487.
- 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.
- 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 Journal*, 101, 499-508.
- Ghadirian, A., Yaghoobzadeh, M., Zamani, G. and Shahidi, A. (2021). Calibration and verification AQUACROP plant model to simulate the performance of three different wheat varieties under drought stress. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(6), 2257-2267. (In Farsi)

- Ghamarnia, H. and Sepehri, S. (2010). Different irrigation regimes affect water use, yield and other yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) crop in a semi-arid region of Iran. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2): 590-593.
- 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. K., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. (2009). AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459.
- Mousavi Zadeh Mojarad, R. A., Feizi, M. and Ghobadina, M. (2018). Prediction of safflower yield under different saline irrigation strategies using AquaCrop model in semi-arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(8), 1241-1249.
- Raes, D., Steduto P., Hsiao, T. C. and Freres, E. (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Sabzian, M., Rahimikhoob, A., Mashal, M. and Aliniaiefard, S. (2021). in Determination of Performance, Water Use Efficiency and Simulation of Lettuce's Canopy Cover in Hydroponic Cultivation and Soil Cultivation by AquaCrop Model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(6), 2075-2088. (In Farsi)
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abisaab, M. and Stwckle, C. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101, 509-521.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). Surface Irrigation: Theory and practice. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc. xiii, 386p.