

## Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Canola (*Brassica napus*) Yield under Deficit Irrigation Scenarios in Gazvin Plain

NIAZ ALI EBRAHIMIPAK<sup>1\*</sup>, ASLAN EGDERNEZHAD<sup>2</sup>, ARASH TAFTEH DAVOUD KHODADADI DEHKORDI<sup>3</sup>

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

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

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

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

### ABSTRACT

This study was conducted in Qazvin plain (with latitude 50° 8' and longitude 36° 8' and elevation 1240 m) during 2010-2012 to evaluate AquaCrop model for simulation of canola yield. The results showed that this model is very sensitive to transpiration crop coefficient and low to medium sensitive to other input parameters. Normalized root mean square errors (NRMSE) were 0.10, 0.04, 0.11 and 0.04 for yield, biomass, water use efficiency and harvest index, respectively. The values of agreement index (d) for the all parameters were greater than 0.98. Although, AquaCrop model tended to overestimate outputs; however, the simulation results could be acceptable.

**Keyword:** Biomass, Water Use Efficiency, Crop Model, Irrigation Scheduling

---

\*Corresponding Author's Email: Email: nebrahimipak@yahoo.com

## بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم‌آبیاری در دشت قزوین

نیازعلی ابراهیمی پاک<sup>۱\*</sup>، اصلان اگدرنژاد<sup>۲</sup>، آرش تافته<sup>۳</sup>، داود خدادادی دهکردی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

کرج، ایران

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

۳. استادیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

کرج، ایران

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۳۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶)

### چکیده

این پژوهش به منظور شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد قزوین واقع در  $8^{\circ} 50'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 8'$  شمالی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا در دو سال زراعی انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت این مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی برای تعرق بود و نسبت به سایر عوامل ورودی حساسیت متوسط و کم داشت. مقادیر جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) به‌دست‌آمده برای عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۰۴، ۰/۱۱ و ۰/۰۴ بود. مقادیر آماره شاخص توافق (d) نیز برای کلیه عوامل بزرگتر از ۰/۹۸ به دست آمد. گرچه این مدل در برآورد عوامل مورد نظر برای اکثر تیمارها دچار خطای بیش‌برآوردی شد؛ لیکن بر اساس این نتایج می‌توان دقت شبیه‌سازی آن را قابل قبول دانست.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، زیست‌توده، کارایی مصرف آب، مدل گیاهی

### مقدمه

نیاز روزافزون جمعیت دنیا به مواد غذایی از جمله روغن‌های گیاهی سبب شده تا کشت گیاهان دانه‌های روغنی برای پاسخ به این نیاز افزایش یابد (Rasooli et al., 2016). از جمله گیاهان دانه‌های روغنی، گیاه کلزا (*Brassica napus*) می‌باشد که با دارا بودن اسیدهای چرب غیراشباع و پروتئین به عنوان یکی از روغن‌های خوراکی سالم، سهم چشم‌گیری در بازار روغن داشته است (Reddy and Reddi, 2003). این گیاه به دلیل سازگاری با اقلیم‌های مختلف در بسیاری از نقاط کشور کشت می‌شود (Zomorodian et al., 2010). رژیم آبیاری آن نیز بر اساس نوع منطقه مورد کشت متفاوت است (Mousavizadeh et al., 2016). اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و بالا بودن مصرف آب در بخش کشاورزی (Ziaii et al., 2014) سبب شده است تا سناریوهای مختلف کم‌آبیاری برای گیاهان مختلف ارائه شود. کم‌آبیاری گرچه سبب کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود، لیکن یکی از راه‌کارهای اساسی در بالا بردن بهره‌وری

مصرف آب به شمار می‌رود (Debaek and Aboudrare, 2004; Fereres, E.M., and Soriano, 2007; Farre and Fasi, 2009; Gert and Raes, 2009; Blum, 2009). تولید این محصول در شرایط کمبود آب و وابسته بودن آن به شرایط کاشت، نیاز به آگاهی از وضعیت این گیاه به شرایط مختلف را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. انجام این شرایط مستلزم انجام آزمایش‌های بسیار بوده که کاری پرزحمت و هزینه‌بر است. برای رفع این مشکل، نیاز است تا از مدل‌های رشد گیاهی به منظور رفع محدودیت‌های زمانی و هزینه‌ای استفاده شود (Van Dam et al., 1997; Boogaard et al., 1998; Gert and Raes, 2009; Raes et al., 2012). مدل رشد گیاهی AquaCrop یکی از مدل‌های رشد گیاهی توسعه‌یافته توسط سازمان خوار و بار جهانی (فائو) است که به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت بالا (Heng et al., 2009; Todorovic et al., 2009; Raes et al., 2012) مورد توجه بسیاری از محققان و کاربران قرار گرفته و از آن به منظور شبیه‌سازی بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله جو (Arraya et al., 2010)، ذرت و چغندر (Stricevic et al., 2011)، گندم (Alizadeh et al., 2011)، ذرت (Heng et al., 2009; Hisao et al., 2009; Masanganise et al., 2013; Katerji et al., 2013; Hasanli et

برداشت این گیاه انجام شد.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسماعیل‌آباد قزوین واقع در طول جغرافیایی  $8^{\circ} 50'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 8'$  شمالی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا در طی دو سال زراعی (۹۰-۹۱ و ۸۹-۹۰) انجام شد. این منطقه از نظر طبقه‌بندی روش دومارتن جز مناطق نیمه‌خشک سرد محسوب می‌شود. در جدول (۱) میانگین برخی از عوامل هواشناسی در این منطقه نشان داده شده است. تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق با تقسیم دوره رشد کلزا به شش دوره جوانه‌زنی، رشد اولیه، ساقه‌دهی، گلدهی، غلاف‌بندی و رسیدگی کامل به صورت زیر در نظر گرفته شدند: FI: آبیاری کامل (۱۰۰ درصد)؛ T1: کم‌آبیاری در دوره ساقه‌دهی (عدم آبیاری یا صفر درصد FI) و در دوره گلدهی (۳۵ درصد FI)؛ T2: کم‌آبیاری در دوره گلدهی (۳۵ درصد FI) و رسیدگی کامل (عدم آبیاری یا صفر درصد FI)؛ T3: کم‌آبیاری در دوره گلدهی (۳۵ درصد FI)، دوره غلاف‌بندی (۱۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (عدم آبیاری یا صفر درصد FI)؛ T4: کم‌آبیاری فقط در دوره گلدهی (۳۵ درصد FI)؛ T5: کم‌آبیاری در دوره غلاف‌بندی (عدم آبیاری یا صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (عدم آبیاری یا صفر درصد FI)؛ T6: کم‌آبیاری در دوره گلدهی (۷۰ درصد FI)، غلاف‌بندی (عدم آبیاری یا صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (عدم آبیاری یا صفر درصد FI)؛ T7: کم‌آبیاری در دوره غلاف‌بندی (۷۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۷۰ درصد FI)؛ T8: کم‌آبیاری در دوره رشد اولیه (۵۰ درصد FI)، گلدهی (۷۰ درصد FI)، غلاف‌بندی (صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛ T9: کم‌آبیاری در دوره جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۷۰ درصد FI)؛ T10: کم‌آبیاری در دوره جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۷۵ درصد)؛ T11: کم‌آبیاری در دوره جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI) و غلاف‌بندی (۱۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (عدم آبیاری یا صفر درصد FI)؛ T12: کم‌آبیاری در دوره جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۸۰ درصد FI). بدین منظور کرت‌هایی با مساحت ۲۴ مترمربع (طول ۶ و عرض ۴ متر) برای هر تیمار در نظر گرفته شد. پیش از آزمایش از خاک مزرعه در دو عمق ۵۰-۰ سانتی‌متر و آب آبیاری نمونه‌برداری انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب آبیاری به ترتیب در

al., 2015) و آفتابگردان (Heidarinia et al., 2012) استفاده شده است. Abedinpour et al., (2012) در ارزیابی مدل رشد گیاهی AquaCrop در تخمین زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب برای گیاه ذرت نشان دادند که این مدل به خوبی توانست شاخص‌های ذکر شده را برآورد نماید و مدل رشد گیاهی AquaCrop بر اساس واکنش گیاهان به میزان آب قابل دسترس و شرایط مختلف آبیاری بسط داده شد (Ahmadi et al., 2015). به همین دلیل مدل رشد گیاهی AquaCrop کارایی خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط کم‌آبیاری دارد و لذا مطالعات گسترده‌ای در خصوص کاربرد این مدل در سطوح مختلف کاربرد آب آبیاری توسط (Khoshravesht et al., 2013; Araya et al., 2010; Farahani et al., 2009) استراتژی‌های گوناگون کم‌آبیاری (Andarzian et al., 2011; Paradas et al., 2011; Ahmadi et al., 2015) و مدیریت آبیاری در مزرعه (Garcia-Vila et al., 2009; Heng et al., 2009) انجام شد. در خصوص گیاه کلزا تحقیقات محدودی انجام شده است. از جمله این تحقیقات، Arvaneh et al. (2011) با استفاده از داده‌های به دست آمده از یک مزرعه کلزا در دهلران به واسطه و سلامت‌سنجی مدل رشد گیاهی AquaCrop پرداختند. نتایج نشان داد که نتایج حاصل از این مدل مطابقت خوبی با داده‌های واقعی داشت و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب و عملکرد کلزا استفاده کرد. Zeleke et al. (2011) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کلزا پرداختند و نشان دادند که این مدل نتایج رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی عوامل مورد نظر در شرایط تنش شدید آبی نداشت و نتایج آزمایش Mousavizadeh et al. (2016) در ارزیابی مدل رشد گیاهی AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد کلزا تحت شرایط مختلف آبیاری نشان داد که این مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کلزا در شرایط مختلف آبیاری داشت ولی نتایج حاصل از آن در شرایط دیم قابل قبول نبود.

بررسی منابع پژوهش‌های قبلی نشان داد که هرچند که مدل رشد گیاهی AquaCrop در شبیه‌سازی بسیاری از گیاهان مورد استفاده قرار گرفته است؛ لیکن آزمایش‌های محدودی در زمینه ارزیابی مدل رشد گیاه AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد کلزا انجام شده است. لذا نتایج به دست آمده در خصوص کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد محصول گیاه کلزا در شرایط مختلف مدیریت آبیاری محدود می‌باشد. بدین منظور، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه کلزا، کارایی مصرف آب و شاخص

کیلوگرم در هکتار محاسبه شد و در هر کرت در تاریخ ۲۵ شهریور کاشته شد. کلیه عملیات کاشت، داشت و برداشت به صورت دستی برای کلیه تیمارها انجام شد.

جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است. بر اساس توصیه کودی آزمایشگاه کود نیترات به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و کود فسفات به مقدار ۵۰ کیلوگرم در هکتار (از منبع سوپر فسفات تریپل) برای آزمایش در نظر گرفته شدند. بذر به مقدار چهار

جدول ۱. میانگین داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی اسماعیل‌آباد

ماه	ساعات آفتابی	سرعت باد در دو متری	بارش	رطوبت هوا	دمای حداقل	دمای حداکثر
	-	m.s <sup>-1</sup>	Mm	%	°C	
فروردین	۶/۴۸	۲۰	۹۸	۴۹	۴	۱۸
اردیبهشت	۶/۹۶	۲۰	۳۴	۵۳	۱۰	۲۶
خرداد	۸/۸	۱۵	۹	۴۲	۱۴	۳۲
مهر	۸/۲	۱۰	۳۴	۵۴	۹	۲۳
آبان	۷/۱۲	۱۰	۴۴	۵۵	۴	۱۶
آذر	۷	۷	۱۷	۶۳	۰/۵	۹
دی	۵/۷۴	۷	۳۰	۵۸	-۱/۵	۱۰
بهمن	۵/۷	۱۲	۴۵	۶۲	-۴	۶
اسفند	۶/۳۲	۱۰	۴۱	۵۳	۱	۱۵

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق	پتاسیم	فسفر	کلسیم	سدیم	منیزیم	نیترات	EC	pH	رطوبت در ظرفیت زراعی	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم	جرم مخصوص ظاهری	فراوانی نسبی و اندازه ذرات خاک (درصد)			
												شن	سیلت	رس	
۰-۳۰	۵/۷	۰/۲۵	۱/۸	۴	۰/۴۸	۰/۷	۰/۷۴	۸/۱	۰/۲۲	۰/۱۳	۱/۴۴	لومرسی	۲۸	۳۹	۳۳
۳۰-۶۰	۶/۱	۰/۳۲	۲/۱	۵	۰/۵۲	۱/۲	۰/۸۷	۸	۰/۲۴	۰/۱۴	۱/۴۷	لومرسی	۳۲	۲۹	۳۹

جدول ۳. نتایج تجزیه کیفیت آب آبیاری در مزارع آزمایشی

EC	pH	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	کربنات بی‌کربنات	کلر	سولفات
dS.m <sup>-1</sup>	-	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>	meq.l <sup>-1</sup>
۰/۳۷	۷/۳	۲/۴	۱/۴	۰/۵	۰/۰۱	۰	۲/۹	۰/۴

گاه به دست آمده در هر تیمار تعیین شد.

#### مدل رشد گیاهی AquaCrop

در مدل رشد گیاهی AquaCrop همانند بسیاری از مدل‌های گیاهی دیگر، عملکرد با استفاده از تبخیر-تعرق محاسبه شده (رابطه ۲) ولی با تفکیک تبخیر-تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr)، از مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر (رابطه ۳) جلوگیری می‌شود. این فرایند با فرض پوشش تاج گیاه به جای شاخص سطح برگ (LIA) انجام می‌شود (Raes et al., 2009):

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

برای تعیین میزان آب آبیاری، از رابطه (۱) استفاده شد.

$$I_n = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \cdot MAD \cdot \rho_b \cdot D_r \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن:  $I_n$ : عمق خالص آب آبیاری (cm)،  $\theta_{fc}$  و  $\theta_{pwp}$ : به ترتیب درصد وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی و شرایط فعلی، MAD: حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک (ضریب سهل‌الوصول) به صورت اعشار،  $\rho_b$ : جرم مخصوص ظاهری ( $g/cm^3$ ) و  $D_r$ : عمق توسعه ریشه گیاه (cm) می‌باشد. مقدار آب آبیاری بر حسب میلی‌متر برای هر تیمار در جدول (۴) نشان داده شده است. رطوبت خاک در هر تیمار با استفاده از نوترون‌متر اندازه‌گیری می‌شود. پس از برداشت محصول و خشک نمودن، نسبت به کوبیدن و جداکردن دانه از گاه اقدام شد و وزن دانه و

هستند. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۵) برآورد می‌گردد:

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

که در این رابطه،  $Tr$  مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی،  $WP^*$  بهره‌وری آب نرمال شده،  $ET_0$  تبخیر-تعرق گیاه مرجع و  $B$  عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه ( $Y$ ) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۶})$$

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

که در این معادلات،  $Y_a$  و  $Y_x$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول،  $ET_x$  و  $ET_a$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه و  $K_y$  ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق،  $CC$  پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)،  $CC_0$  پوشش تاج اولیه (درصد)،  $CGC$  ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و  $t$  زمان (روز) می‌باشد. بدین ترتیب میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

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

جدول ۴. مقدار آب آبیاری (بر حسب میلی‌متر) برای تیمارهای مختلف

تیمار	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
*FI	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۱۹۶	۱۳۱	۱۳۲
T1	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۰	۶۹	۱۳۱	۱۳۲
T2	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۶۹	۱۳۱	۰
T3	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۶۹	۱۴	۰
T4	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۶۹	۱۳۱	۱۳۲
T5	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۱۶۹	۰	۰
T6	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۱۳۸	۰	۰
T7	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۱۹۶	۸۹	۹۸
T8	۱۵۲	۳۷	۲۸	۲۶	۲۶	۲۵	۱۳۸	۰	۰
T9	۱۰۶	۴۴	۴۴	۱۹	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱۳۱	۱۳۲
T10	۱۰۶	۴۴	۴۴	۱۹	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱۰۰	۰
T11	۱۰۶	۴۴	۴۴	۱۹	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱۵	۰
T12	۱۵۲	۷۵	۵۷	۲۶	۲۶	۲۵	۱۹۶	۱۳۱	۱۳۲

\* منظور آبیاری کامل است.

### تحلیل حساسیت و واسنجی مدل

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

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در این رابطه،  $Sc$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $P_m$  مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و  $P_b$  مقدار برآورد پارامتر مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه عوامل ثابت نگاه‌داشته می‌شدند (گیرتس و همکاران، ۲۰۰۹). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس،  $Sc > 15$  حساسیت بالا،  $15 > Sc > 2$

حساسیت متوسط،  $2 > Sc$  حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts and Raes., 2009).

داده‌های ورودی مدل AquaCrop در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه تقسیم‌بندی می‌شوند. داده‌های اقلیمی شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، بارندگی، تبخیر-تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) و میانگین غلظت  $CO_2$  سالیانه بود. تبخیر-تعرق از معادله فائو-پنمن-مانتیتث (Allen et al., 1998) و توسط نرم‌افزار ET-calculator تعیین شد و خروجی آن به مدل معرفی گردید. غلظت  $CO_2$  نیز بر اساس مقدار پیش‌فرض که در رصدخانه هاوایی اندازه‌گیری شده است، به مدل معرفی گردید. داده‌های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم بر اساس آزمایش خاک (جدول ۲)

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، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی AquaCrop مقدار پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر مورد نظر عدد 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.

### نتایج و بحث

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که مدل رشد گیاهی AquaCrop نسبت به تغییرات عوامل رطوبت اشباع، دمای حداقل، عمق مؤثر ریشه، مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی، مدت زمان کاشت تا دوره پیری و حد آستانه بالای دما حساسیت کمی دارد (جدول ۵). هم‌چنین این مدل نسبت به رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، دمای حداکثر، بارندگی، مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی و مدت زمان کاشت تا برداشت محصول حساسیت متوسط داشت. بر اساس نتایج به دست آمده، این مدل نسبت به پارامتر ضریب گیاهی برای تعرق<sup>۱</sup> ( $K_{CT}$ ) حساسیت بالا داشت. نتایج مطالعات *Mohammadi et al.*, (2015) نشان داد که مدل AquaCrop نسبت به عوامل دمای حداقل حساسیت کم و نسبت به تغییرات دمای حداکثر، حساسیت متوسط داشت که نتایج این تحقیق با نتایج *Mohammadi et al.*, (2015) مطابقت داشت. هم‌چنین گزارش‌های *Mohammadi et al.*, (2015) و *Salemi et al.*, (2011) نشان داد که پارامتر ضریب گیاهی برای تعرق نسبت به سایر عوامل ورودی مدل AquaCrop حساسیت بیشتری داشت که نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز با این گزارش‌ها همخوانی دارد.

به منظور اجرای مدل رشد گیاهی AquaCrop، داده‌های گیاهی اندازه‌گیری شده به همراه سایر عوامل به دست آمده وارد مدل شدند. برخی از عوامل رشد گیاهی نیز بر اساس نتایج سایر محققان از جمله *Zeleeke et al.*, (2011) و *Mousavizadeh et*

تعیین و به مدل معرفی شدند. داده‌های مدیریت مزرعه نیز شامل: الف) مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و ب) آبیاری بود که مدیریت مزرعه بدون محدودیت در نظر گرفته و به مدل معرفی شد. آبیاری نیز بر اساس تیمارهای مورد نظر به مدل به عنوان ورودی مدل فرض گردید. مدل AquaCrop از پارامترهای گیاهی مختلفی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند. چون اندازه‌گیری این پارامترها در آزمایش سخت یا غیرقابل انجام است، نیاز است تا واسنجی شوند (*Raes et al.*, 2009; *Steduto et al.*, 2009). بر این اساس، در این مطالعه داده‌های اقلیمی، خاک و مدیریت مزرعه بر اساس داده‌های آزمایش و داده‌های گیاهی بر اساس واسنجی به مدل معرفی شدند.

### ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی دقت مدل رشد گیاهی AquaCrop، 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 (۸) تا (۱۳) نشان داده شده‌اند (*Ahmadee et al.*, 2016).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

در معادله‌های فوق  $P_i$  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

al., (2016) به صورت پیش‌فرض به مدل معرفی شده‌اند. برخی از عوامل رشد گیاهی نیاز به واسنجی داشت که بر اساس نتایج سال اول آزمایش و بر اساس میزان عملکرد محصول، واسنجی این داده‌ها انجام شد (جدول ۶).

جدول ۵. ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا

پارامتر	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۲/۹	۷/۱	متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۱۲/۵	۱۴/۲	متوسط
رطوبت اشباع	۰/۸	۰/۳	کم
دمای حداقل	۰/۱	۰/۹	کم
دمای حداکثر	۵/۵	۲/۶	متوسط
بارندگی	۳/۴	۹/۲	متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۲۱/۳	۱۷/۶	بالا
عمق مؤثر ریشه	۱/۷	۰/۸	کم
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱/۱	۰/۹	کم
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۲/۴	۸/۱	متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۸/۹	۳/۵	متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۰/۴	۰/۸	کم
حد آستانه بالای دما	۱/۴	۱/۹	کم

جدول ۶. مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	صفر	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	۷۵۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۸/۵	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۳	متر	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۰	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۹۵	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۳۵	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۶۰	روز	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴/۳	گرم بر مترمربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۹/۲	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۸۱	درصد	واسنجی
حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۵	-	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۵۵	-	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۹/۱	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۵	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه	۰/۶	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۶	-	واسنجی

کم‌آبیاری در دوره گلدهی کلزا بیشترین اثر را بر کاهش عملکرد این گیاه دارد (Tesfamriam et al., 2010) نتایج به دست آمده

بیشترین و کمترین عملکرد کلزا به ترتیب در تیمارهای آبیاری کامل (FI) و T3 به دست آمد. با توجه به اینکه

در شکل (۲) نشان داده شده است. بیشترین عملکرد در تیمار آبیاری کامل (FI) و کمترین عملکرد در تیمار T3 مشاهده شد. تیمارهای T1، T10، T11 و T5 نیز مقادیر زیست‌توده پایینی داشتند به طوری که نسبت به FI به ترتیب کاهش ۳۸/۲، ۳۲/۶، ۳۴/۲ و ۳۳/۴ درصدی نشان دادند. مقادیر شبیه‌سازی زیست‌توده کلزا تقریباً مشابه مقادیر اندازه‌گیری بود و بیشترین و کمترین خطای برآورد به ترتیب در تیمارهای T1 (۱۰ درصد) و T7 (۲ درصد) مشاهده شد. مدل AquaCrop در برآورد زیست‌توده تیمارهای FI، T7 و T11 دچار خطای کم‌برآوردی شد به طوری که این خطا برای تیمارهای FI و T11 به ترتیب برابر با ۳/۵ و ۵/۸ درصد بود. این مدل در پیش‌بینی زیست‌توده سایر تیمارها دچار خطای بیش‌برآوردی بود. این خطا مشابه خطای مشاهده شده در برآورد عملکرد کلزا بود و توسط بسیاری از محققان از جمله *Heng et al.*, (2009)، *Ahmadi et al.*, (2015) و *Hisao et al.*, (2009) نیز گزارش شده است. علت کاهش خطای این مدل در تیمار T7 نزدیکی اعمال تنش به دوره‌های پایانی رشد این محصول است که سبب شده است تا در شرایط واقعی نیز کاهش چشمگیری در تولید زیست‌توده این گیاه رخ ندهد. لیکن اعمال سایر تنش‌ها در دوره‌های مختلف به خصوص گلدهی، سبب شده است تا شرایط رشد برای این محصول از آنچه در این مدل فرض شده است، دور شود. البته با توجه به جدول (۱)، مصادف شدن تنش‌های آخر دوره رشد این گیاه با بارش‌های بهاره نیز سبب تخفیف اثرات تنش آبی بر عملکرد و زیست‌توده شده است. با این وجود، گرچه این مدل در شرایط تنش آبی شدید از دقت کمتری برخوردار است (*Heng et al.*, 2013; *Katerji et al.*, 2009) ولی نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که خطای بیش‌برآوردی برای اکثر تیمارها کمتر از ۵ درصد است؛ بنابراین می‌توان به نتایج آن اعتماد نمود.

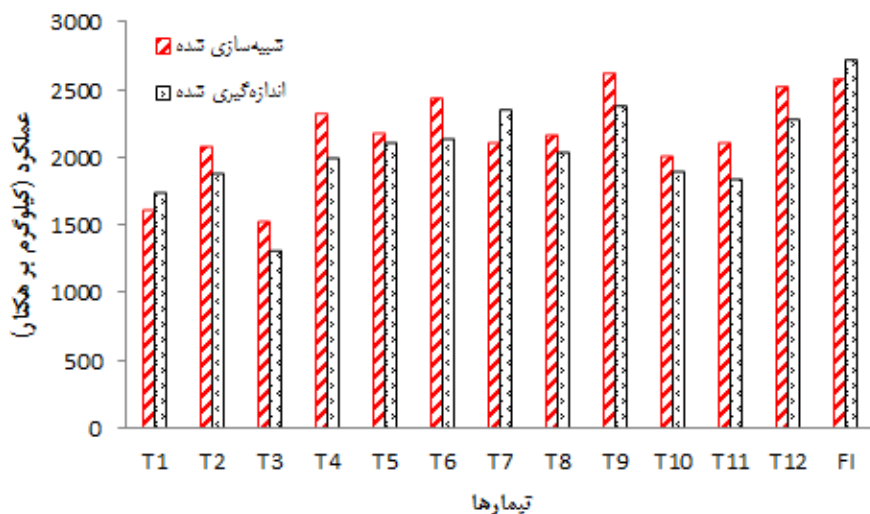
کارایی مصرف آب برای کلزا بین ۰/۲۶ (T1) و ۰/۴۸ (T11) کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود (شکل ۳). مقادیر شبیه‌سازی شده برای همین پارامتر نیز بین ۰/۲۴ (T1) و ۰/۵۵ (T11) کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود. کمترین خطای پیش‌بینی این پارامتر در تیمار T5 مشاهده شد به طوری که تنها یک درصد با میزان واقعی اختلاف داشت؛ گرچه نتایج شبیه‌سازی کارایی مصرف آب برای تیمارهای T1، T10 و FI نیز تنها دو درصد با مقدار واقعی اختلاف داشت. بیشترین اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده در تیمار T11 و به میزان ۷ درصد مشاهده شد. علی‌رغم اینکه این مدل کارایی مصرف آب در تولید روغن را شبیه‌سازی نمی‌کند، نتایج حاصل از آن در

نیز منطقی به نظر می‌رسد. به همین ترتیب تیمارهای T1، T10 و T11 نیز که در دوره گلدهی تنش بیشتری به گیاه وارد شده است عملکرد نیز کاهش داشت. هم‌چنین در تیمارهای T5 و T7 که در این دوره تنش‌ی اعمال نشده، عملکرد به نسبت سایر تیمارها کاهش کمتری داشت. مقدار عملکرد شبیه‌سازی گیاه کلزا در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی نشان داد که کمترین خطای شبیه‌سازی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده مربوط به تیمارهای T1، T5 و T10 است. میزان خطای شبیه‌سازی برای این تیمارها به ترتیب برابر با ۷/۸، ۳/۵ و ۵/۹ درصد بود. بیشترین خطای شبیه‌سازی نیز به تیمارهای T4، T6 و T11 به ترتیب با ۱۶، ۱۳/۹ و ۱۴/۵ درصد اختصاص داشت. این نتایج نشان داد که این مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد کلزا داشت. نتایج بدست آمده با مطالعات *Mousavizadeh et al.*, (2016) و *Zelege et al.*, (2011) مطابقت داشت. این محققان نیز با شبیه‌سازی عملکرد کلزا با مدل AquaCrop نشان دادند که این مدل دقت قابل قبولی دارد. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد تیمارهای FI، T1 و T7 دچار کم‌برآوردی شد ولی نتایج به دست آمده از آن برای سایر تیمارها حاکی از بیش‌برآوردی آن داشت. *Mousavizadeh et al.*, (2016) و *Zelege et al.*, (2011) نیز برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا با AquaCrop نتایج مشابه گزارش کردند. سایر محققان از جمله *Heng et al.*, (2009)، *Katerji et al.*, (2013)، *Ziaei et al.*, (2014) و *Hasanli et al.*, (2015) نیز با کاربرد این مدل در شبیه‌سازی محصولات مختلف گزارش کردند که این مدل دچار خطای بیش‌برآوردی بود. از جمله دلایل بیش‌برآوردی این مدل می‌توان به قلیائیت محیط کشت یا آب آبیاری (جدول ۲ و ۳) اشاره کرد که توسط *Hasanli et al.*, (2015) ارائه شده است. البته تنش‌های مختلف در بسیاری از تیمارها و شرایط کشت نامناسب عمدتاً سبب می‌شود تا عملکرد تئوری حاصل نشود. به همین دلیل در بیشتر تحقیقات انجام شده و از جمله تحقیق حاضر، مشاهده شد که عملکرد واقعی کمتر از مقداری است که در این مدل برای شبیه‌سازی تنش آبی فرض شده است (*Mousavizadeh et al.*, 2016). با وجود دقت مناسب این مدل در پیش‌بینی عملکرد کلزا، مشاهده شد که در شرایط تنش، دقت مدل عمدتاً کمتر از شرایط بدون تنش بود. این نتایج با مشاهدات *Vatankhah and Ibrahimian*, (2016)، *Mohammadi et al.*, (2015)، *Alizadeh et al.*, (2010)، *Heng et al.*, (2009) و *Andarzian et al.*, (2011) مطابقت دارد.

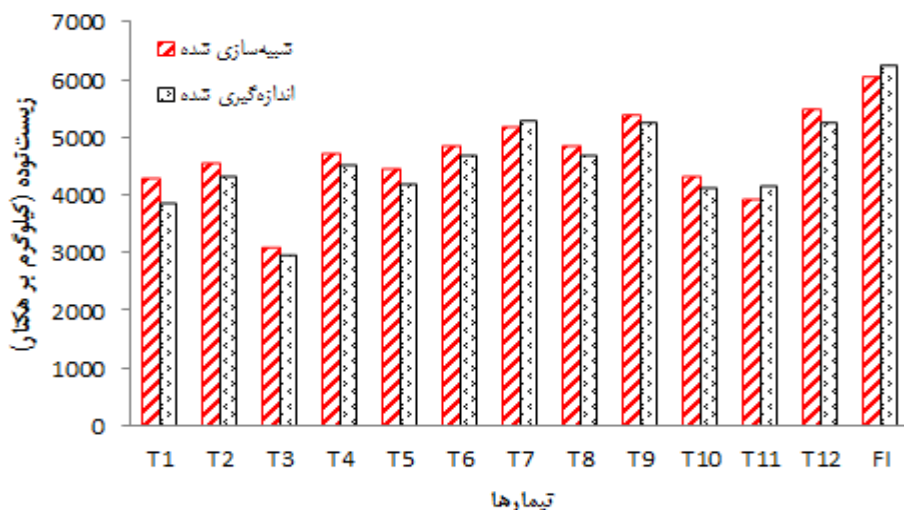
نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده کلزا



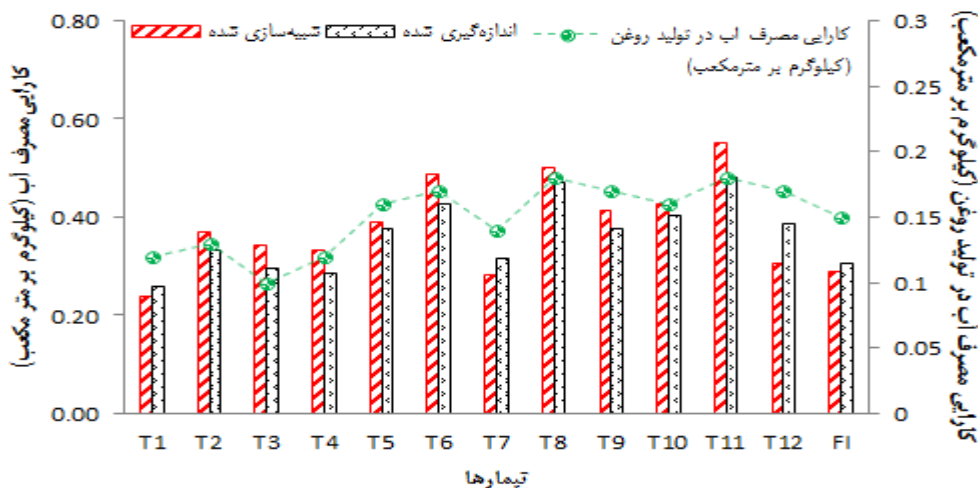
شکل (۳) نشان داده شد. بر اساس این نتایج، مشاهده شد که افزایش این شاخص نیز شده است. شاخص برداشت برای گیاه تقریباً افزایش کارایی مصرف آب در تولید محصول، سبب کلزا نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۱. مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه کلزا (FI نشان دهنده آبیاری کامل و تیمارهای T نشان دهنده اعمال کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف کشت است).



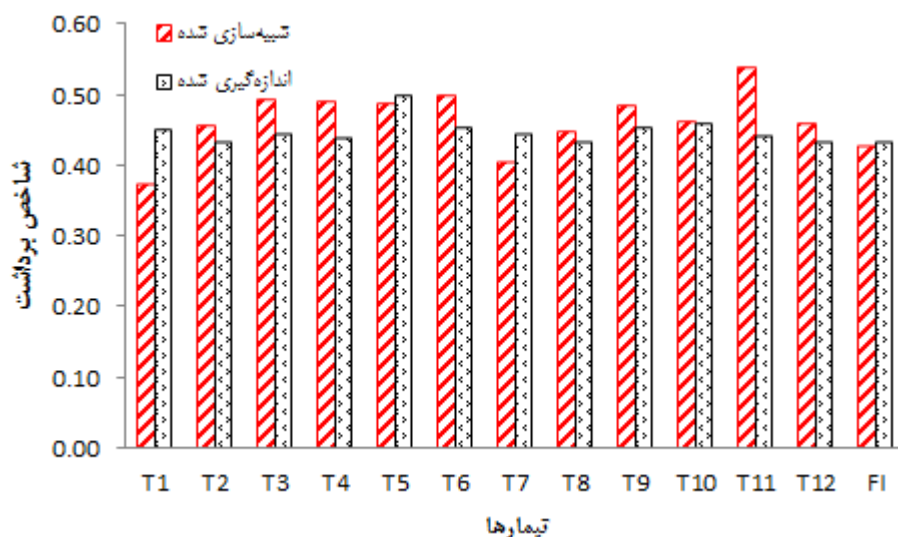
شکل ۲. مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده کلزا (FI نشان دهنده آبیاری کامل و تیمارهای T نشان دهنده اعمال کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف کشت است).



شکل ۳. میزان کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای گیاه کلزا و کارایی مصرف آب در تولید روغن (FI نشان دهنده آبیاری کامل و تیمارهای T نشان دهنده اعمال کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف کشت است).

بیشترین و کمترین مقدار شاخص برداشت به ترتیب برابر با ۰/۴۳ و ۰/۵۰ به ترتیب برای تیمارهای T5 و T2 به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی این پارامتر نیز نشان داد که بیشترین و کمترین مقادیر به تیمارهای T1 و T11 (به ترتیب برابر با ۰/۵۴

و ۰/۳۸) اختصاص داشت. هم‌چنین بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده برای این پارامتر نیز پایین (حداکثر ۱۰ درصد) و در حد قابل قبول است



شکل ۴. مقادیر شاخص برداشت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای گیاه کلزا (FI نشان دهنده آبیاری کامل و تیمارهای T نشان دهنده اعمال کم آبیاری در دوره‌های مختلف کشت است)

در حالت کلی با فرض کلیه تیمارها، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا با استفاده از مدل AquaCrop قابل قبول می‌باشد. این فرض با تکیه بر نتایج به دست آمده از آماره‌های RMSE، NRMSE و MBE مطابق جدول (۷) می‌باشد. نتایج Mousavizadeh *et al.*, (2016) نشان داد که مقدار RMSE حاصل از شبیه‌سازی عملکرد کلزا با مدل AquaCrop برابر با ۰/۲۶ تن بر هکتار بود. نتایج Zeleke *et al.*, (2011) مقدار RMSE را برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا با این مدل بین ۱/۷۵ تا ۲/۵۸ تن بر هکتار نشان داد. بر این اساس تحقیق حاضر نتایج دقیق‌تری را نشان داد. نتایج آماره‌های

RMSE و MBE برای زیست‌توده شبیه‌سازی شده بسیار کمتر از مقادیر گزارش شده توسط Mousavizadeh *et al.*, (2016) و Zeleke *et al.*, (2011) بود. بر اساس مقادیر به دست آمده مشاهده شد که این مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی این پارامتر داشته است. نتایج به دست آمده بر اساس آماره‌های مذکور برای عوامل کارایی مصرف آب و شاخص برداشت نیز حاکی از دقت قابل‌قبول مدل برای شبیه‌سازی این عوامل بود. با تکیه بر آماره‌های EF و d، مشاهده شد که کارایی مدل و شاخص توافق در شبیه‌سازی همه‌ی عوامل مناسب بود. با این وجود کارایی مدل برای عملکرد دانه پایین‌تر از سایر عوامل بود.

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت کلزا

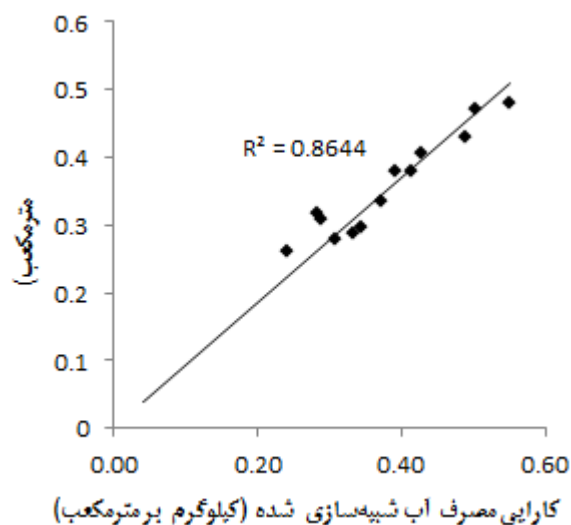
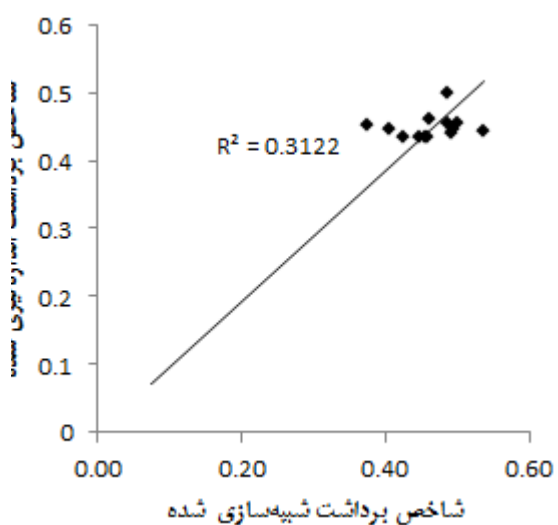
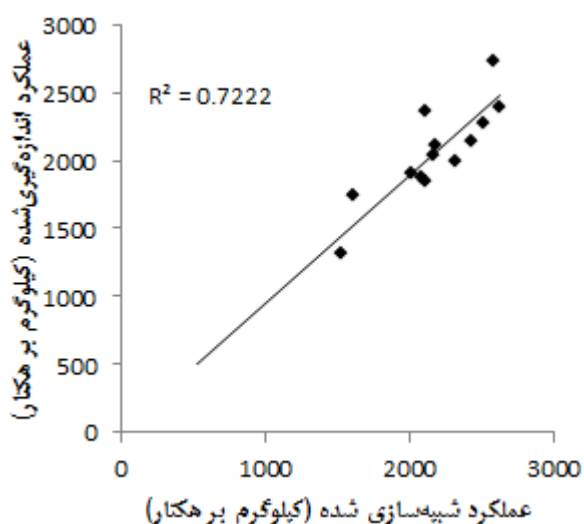
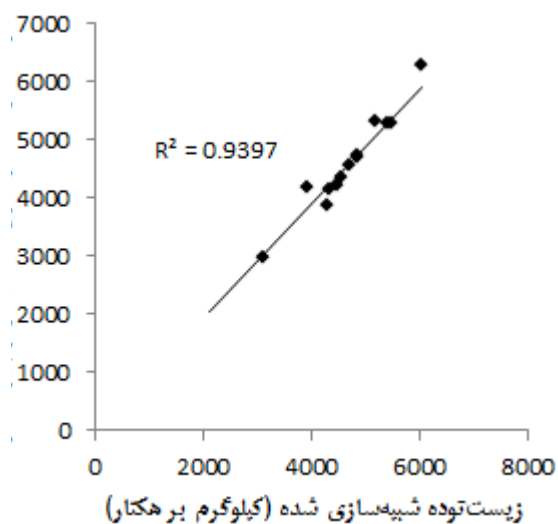
d	EF	پارامتر			
		MBE (تن بر هکتار)	NRMSE (تن بر هکتار)	RMSE (تن بر هکتار)	
۰/۹۹	۰/۵۷	۰/۱۲۱	۰/۱۰	۰/۲۱۶	عملکرد (تن بر هکتار)
۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۱۲۰	۰/۰۴	۰/۲۲۳	زیست‌توده (تن بر هکتار)
۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۴	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۹۹	۰/۸۵	۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۰۴	شاخص برداشت

نتایج برازش مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای همه‌ی عوامل به جز شاخص برداشت قابل قبول بود (شکل ۵). مقادیر گزارش شده

برای عملکرد کلزا توسط Mousavizadeh *et al.*, (2016) برابر با ۰/۹۶-۰/۹۸ بود. مقدار ضریب تبیین گزارش شده برای عملکرد کلزا توسط سایر محققان از جمله Masanganise *et al.*,

قابل قبولی در پیش‌بینی این پارامتر داشت. نتایج مشابه برای عملکرد، زیست‌توده و شاخص برداشت توسط *Mohammadi et al.*, (2015) گزارش شده است. این محققان نیز مقدار  $R^2$  برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده گندم با استفاده از این مدل را به ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۶۹ به دست آوردند در حالی که مقدار این آماره را برای شاخص برداشت برابر با ۰/۴۹ گزارش کردند.

(2013) و *Hasanli et al.*, (2015) به ترتیب برابر با ۰/۷۲ و ۰/۷۵ بود. نتایج ضریب تبیین برای شاخص برداشت کلزا نسبت به سایر پارامترها پایین بود و این نشان دهنده‌ی عدم وجود رابطه خطی بین شاخص برداشت شبیه‌سازی شده و برداشت شده است. با این وجود دامنه تغییرات شاخص برداشت برابر با ۰/۱۷ بود و بر اساس نتایج جدول (۷) مدل AquaCrop دقت



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

پژمردگی دائم، دمای حداکثر، بارندگی، مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی و مدت زمان کاشت تا برداشت محصول حساسیت متوسط و نسبت به تغییرات ضریب گیاهی برای تعرق حساسیت بالا داشت. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، این مدل در تنش‌های آبی دچار خطای بیشتری می‌گردد به طوری که در تیمارهای T1، T5 و T10 کمترین میزان خطای برآورد عملکرد (به ترتیب برابر با ۳/۸، ۵/۹ و ۵/۹) و در تیمارهای T4، T6 و T11 بیشترین میزان خطای برآورد

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با استفاده از داده‌های دو سال زراعی برای گیاه کلزا در دشت قزوین، مدل رشد گیاهی AquaCrop مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این مدل نسبت به تغییرات عوامل رطوبت اشباع، دمای حداقل، عمق مؤثر ریشه، مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی، مدت زمان کاشت تا دوره پیری و حد آستانه بالای دما حساسیت کم داشت. این مدل نسبت به تغییرات عوامل رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و

عملکرد و  $0/223$ ،  $0/04$  و  $0/120$  تن بر هکتار برای زیست توده) می توان به نتایج آن اعتماد نمود. با این وجود، به دلیل کمبود منابع در دسترس در خصوص شبیه سازی اثرات برنامه ریزی های مختلف آبیاری بر عملکرد کلزا، پیشنهاد می شود تا تحقیقات بیشتری در خصوص صحت سنجی این مدل در شرایط دیگر انجام شود.

عملکرد (به ترتیب با ۱۶، ۱۳/۹ و ۱۴/۵ درصد) مشاهده شد. بر اساس نتایج شبیه سازی شده عملکرد و زیست توده کلزا، مشاهده شد که گرچه این مدل در اکثر تیمارها دچار خطای بیش آوردی بود؛ لیکن بر اساس نتایج آماره های RMSE، NRMSE و MBE (به ترتیب با مقادیر  $0/216$ ،  $0/10$  و  $0/121$  تن بر هکتار برای

## REFERENCES

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M. H., Pathak, H., and Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110: 55-66.
- Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., and Sayyari, M. H. (2016), Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L.) (Case Study: Birjand Plain, Iran), *Agroecology*, 8(4), 505-520. (In Farsi)
- Ahmadi, S.H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.K., and Sepaskhah, A.R., (2015). Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resource Management*. 29, 2837-2853.
- Alizadeh, H. A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, H., Eetedali, H., and Janbaz, H. (2011), Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4, 273-283. (In Farsi)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., and Rahnama, A., (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agr. Water Manage.* 100, 1-8.
- Andarziana, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, 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., Solomon, H., Kiros, M.H., Afewerk, K., and Taddese, D., (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Manage.* 97, 1838-1846.
- Arvaneh, H., Abbasi, F., and Eslami, H. (2011), Validation and testing of AquaCrop under farmers management, 1st *National Conference on Agrometeorology and Agricultural Water Management*.
- Blum, F.A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*. 112, 119-123.
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.M.C.A., and Van Laar, H.H. (1998). WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
- Debaek, P., and Aboudrare, A. (2004). Adaptions of crop manage to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*. 21, 433-446.
- Farahani, H.J., Izzì, G., and Oweis, T.Y., (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron.J.* 101, 469-476.
- Farre, F., and Faci, J.M., (2009). Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96, 384-394.
- Fereres, E.M., and Soriano, A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use: integrated approaches to sustain and improve plant production under drought stress special issue. *Journal of Botany*. 58, 147-159.
- Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., and Steduto, P., (2009). Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 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.
- Hasanli, M., Afrasiab, P., and Ebrahimian, H. (2015), Evaluation of AquaCrop vs SALTMED Models to Estimate Crop Yield and Soil Salinity, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(3), 487-498. (In Farsi)
- Heidarinia, M., Naseri, A., Broumandnasab, S., and Azari, A. (2012). Assessing AquaCrop model application in irrigation management innorth of Khosetan\_Safiabad. (CD) Proceeding of the 1st national water management in farm conference. May 30-31. Iran. (In Farsi)
- 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.
- 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.
- Khoshravesh, M., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., and Kiani, A.R., (2013). AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Sci.Technol.* 67, 232-238.
- 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.
- Mohammadi, M., Davari, K., Ghahraman, B., Ansari, H., Haghverdi, A. 2015, Calibration and Validation of AquaCrop Model for Simulation of Spring Wheat Yield under Simultaneous Salinity and Water Stress, *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 277-295. (In Farsi)
- Mousavizadeh, S. F., Honar, T., and Ahmadi, S. H., (2016). Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area, *International Journal of Plant Production*, 10(4), 1735-6814.
- 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). Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Rasooli, S. J., Nasiri Mahalati, M., Naseri Yazdi, M. T., and Ghorbani, R. (2016), Determining Prediction Model of the Canola) Brassica napus L.( Yields Based on Agrometeorological and Climatic Parameters in Mashhad Region of Iran, *Journal of Water and Soil*, 30(4), 1322-1333. (In Farsi).
- Reddy T.Y., Reddi G.H.S. 2003. Principles of Agronomy. Kalyani Publishers, Ludhiana, pp.48–77.
- Salemi, H., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., and KamilYusoff, M. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610, 2204-2215.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101, 426–437.
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., and Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98, 1615-1621.
- Tesfamariam, E.H., J.G. Annandale, and J.M. Steyn. (2010). Water stress effects on winter canola growth and yield. *Agron. J.* 102,658–666.
- 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.
- Vatankhah, I., and Ibrahimian, H., (2016), Assessment of AquaCrop model for simulating forage maize yield along the furrow, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 495-504. (In Farsi)
- Zelege, K., Luckett, D., and Cowley, R., (2011). Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agron.J.* 103, 1610-1618.
- Ziaii, Gh., Babazadeh, H., Abbasi, F., and Kaveh, F. (2014) Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize models in assessment of soil water balance and maize yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 435-445 (In Farsi).
- Zomorodian A., Kavooosi Z., and Momenzadeh L. (2010). Determination of EMC isotherms and appropriate Mathematical models for canola. *Food and Bioproducts Processing*. 89(4), 407-413.