

## شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کینوا تحت مدیریت‌های مختلف زراعی با استفاده از مدل AquaCrop

مهرنوش گلابی<sup>۱</sup>، شهرام لک<sup>۱\*</sup>، عبدالعلی گیلانی<sup>۲</sup>، مجتبی علوی فاضل<sup>۳</sup>، اصلان اگدرنژاد<sup>۴</sup>

۱- گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۳- گروه زراعت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

\* مسئول مکاتبه: [sh.lack@yahoo.com](mailto:sh.lack@yahoo.com)

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.378375.1305

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

### چکیده

در این پژوهش با توجه به‌هزینه‌بر بودن آزمایش‌های مزرعه‌ای، از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر عواملی نظیر روش کاشت، زمان کاشت و رقم مورد استفاده بر عملکرد و زیست‌توده کینوا استفاده شد. به‌منظور ارزیابی این مدل گیاهی، طرح تحقیقاتی در سال‌های زراعی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹، در اهواز اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل تاریخ کاشت به‌عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا) بود. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در تاریخ‌های T1، T2، T3 و T4 به‌ترتیب ۲۲۱/۹، ۱۶۱/۸، ۱۰۳/۸ و ۱۰۱/۸ کیلوگرم بر هکتار بود. خطای شبیه‌سازی این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده در تاریخ‌های اشاره شده به‌ترتیب ۶۸۹/۱، ۶۶۲/۹، ۶۳۳/۴ و ۶۳۳/۸ کیلوگرم بر هکتار بود. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده در کشت مستقیم به‌ترتیب ۷۸/۵ و ۳۵/۰ درصد بود. کمترین خطای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده در رقم تیتیکاکا مشاهده شد. خطای شبیه‌سازی عملکرد رقم کیو۲۶ و زیست‌توده گیزا بیشتر از سایر ارقام بود. با این وجود اختلاف خطا در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده رقم‌های مختلف حداکثر ۱۷/۵ و ۵/۳ درصد به‌دست آمد که قابل چشم‌پوشی است. در حالت کلی، کارایی مدل AquaCrop مطلوب می‌باشد (EF>0.90 و d>0.90) و دقت آن عالی (NRMSE<0.1) تعیین شد. براساس نتایج، کاربرد این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی کینوا پیشنهاد می‌شود گرچه خطای آن برای کشت مستقیم در اواسط و انتهای آبان کمتر از سایر شرایط است.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، کاشت نشایی، مدل آب-محور، مدل‌سازی گیاهی

### مقدمه

این گیاه را جایگزین مناسبی برای برنج و برخی غلات با نیاز آبی بالا می‌دانند (Gonzalez et al., 2014) و در سال‌های اخیر کشت آن در ایران توصیه شده است (Salehi et al., 2016). در حال حاضر طرح‌های تحقیقاتی متعددی برای ارزیابی عوامل مؤثر بر عملکرد و زیست‌توده این گیاه زراعی تعریف شده است. ولی انجام کلیه این طرح‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است (Ebrahimipak et al., 2018; Ebrahimipak et al., 2019). به‌همین دلیل ابزارهای جایگزین برای بررسی اثر عوامل مختلف بر رشد گیاهان زراعی از جمله کینوا می‌تواند این مشکل را حل کند. مدل‌سازی گیاهی با استفاده از نرم‌افزارهای ارائه شده توسط موسسات معتبر جهانی از جمله ابزارهای مناسب در این خصوص می‌باشد

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa wild*، گیاهی دو لپه، از خانواده تاج خروسیان و با حدود ۹۵ درصد خودگشنی است. کینوا یک‌ساله، پهن‌برگ و دارای ارتفاع یک تا دو متر می‌باشد (Jacobsen et al., 2001; Kia et al., 2022). این گیاه زراعی بومی آمریکای جنوبی است که برای مصرف دانه عموماً کشت می‌شود ولی مصرف زیست‌توده آن نیز به‌عنوان سبزیجات برگ‌ریز رواج دارد. دانه این گیاه کم‌حجم بوده و منبع غنی از بسیاری از ویتامین‌ها و پروتئین است (Aliyar et al., 2022). ارزش غذایی بالای این گیاه سبب شده است تا سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد آن را با شیر خشک برابر بداند (Jacobsen et al., 2005). به‌همین دلیل بسیاری از محققان

برای آن‌ها به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۷۱ به دست آمد. از این رو، کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در شرایط تنش آبی توصیه شد (Emdad *et al.*, 2022).

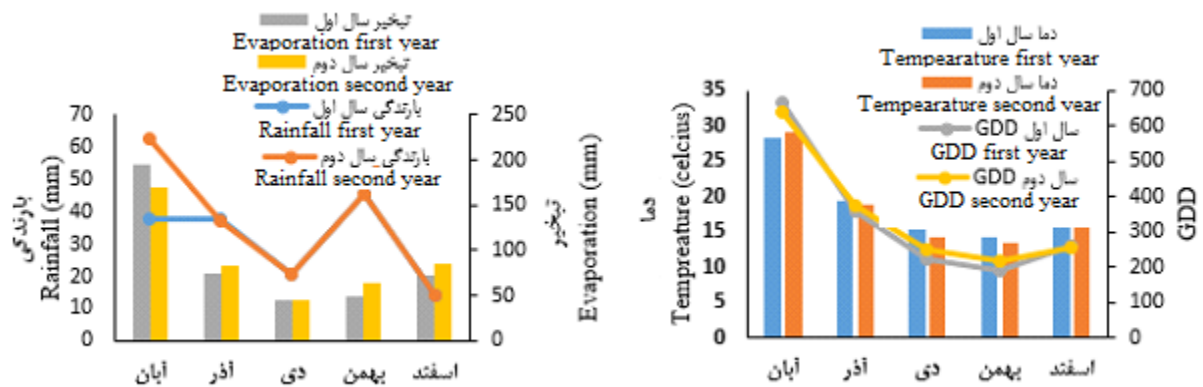
استان خوزستان یکی از مناطقی است که کشت کینوا در آن در حال گسترش است. در این استان ارقام مختلف برای کاشت پیشنهاد شده است. با توجه به اقلیم متفاوت در جنوب، مرکز و شمال آن، تاریخ‌های مختلفی برای کاشت آن پیشنهاد گردیده است. هم‌چنین دو روش نشایی و مستقیم به صورت آزمایشی در این استان اجرا شده است (Golabi *et al.*, 2022). تحقیقات انجام شده نشان داده است که عواملی مانند تاریخ کاشت، رقم و روش کاشت روی عملکرد و زیست‌توده کینوا مؤثر است. با این وجود تاکنون تحقیقی در خصوص ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی کینوا تحت شرایط مورد استفاده انجام نشده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر این مدل گیاهی تحت شرایط مورد اشاره ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

### نحوه انجام آزمایش

پژوهش حاضر در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۸ متر از سطح دریا در شهر اهواز در سال‌های زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. متوسط ده ساله بارندگی منتهی به زمان آزمایش ۲۴۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۲۵/۳ درجه سانتی‌گراد است. مشخصات هواشناسی در آزمایش در شکل ۱ مشاهده می‌شود. آزمایش به صورت کرت‌های دوبار خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در ۴ تکرار مطابق نقشه آزمایش ارائه شده در شکل ۲ انجام گردید. تیمارهای آزمایش شامل تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲ و C3: تیتیکاکا) بود. عملیات خاک‌ورزی در اواخر شهریور برای همه تیمارها انجام شد. برای نمونه‌برداری به منظور آزمایش خاک، نمونه‌برداری از چند نقطه تصادفی مزرعه با استفاده از آگر از عمق ۳۰-۶۰ و ۰-۳۰

(Egdernezhad *et al.*, 2019; Ahmadee *et al.*, 2021) مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد، کاربرپسند و رایگان است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی بسط داده شده است (Geerts *et al.*, 2009). نظر به اینکه این مدل توانایی شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر عملکرد و زیست‌توده گیاهان را دارد، این مدل تاکنون در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به ارزیابی عملکرد گیاهان زراعی ذرت (Heng *et al.*, 2013; Katerji *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009)، پنبه (Farahani *et al.*, 2009)، آفتابگردان (Todorovic *et al.*, 2009)، چغندر قند (Alishiri *et al.*, 2014)، زعفران (Ebrahimipak *et al.*, 2008)، کلزا (Egdernezhad *et al.*, 2019)، گلرنگ (Behmanesh *et al.*, 2021) و گندم (Ahmadee *et al.*, 2021) اشاره کرد. علی‌رغم اینکه گیاه کینوا از جمله اولین گیاهانی بود که توسط مدل AquaCrop مدل‌سازی شد (Geerts *et al.*, 2009; Geerts *et al.*, 2010)، ولی شبیه‌سازی رشد آن در شرایط مختلف با استفاده از مدل AquaCrop، نسبت به سایر گیاهان زراعی، کمتر مورد توجه محققان بوده است. در پژوهشی آماره‌های  $RMSE$  و  $R^2$  برای کاربرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا تحت تنش کودی در کشور بولیوی به ترتیب ۹/۶ درصد و ۰/۹۸ به دست آمد. این نتایج بیانگر خطای پایین و تطابق بالای نتایج شبیه‌سازی شده با شرایط مزرعه بود. به همین دلیل کاربرد مدل AquaCrop در شرایط کمبود مواد مغذی خاک توصیه شد (Van Gaelen *et al.*, 2015). در تحقیقی به مقایسه شبیه‌سازی عملکرد کینوا در کشور ایتالیا با دو روش یادگیری ماشین و مدل AquaCrop پرداخته شد. نتایج نشان داد که فرایند پیچیده یادگیری ماشین مشابه مدل کاربرپسند AquaCrop بود. نتایج آماره MAE برابر با ۰/۹۶۲ بود که قابل قبول بود (Chumbe *et al.*, 2022). در پژوهشی در کرج عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری توسط مدل AquaCrop مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج آماره  $RMSE$  در مرحله واسنجی برای عملکرد و زیست‌توده به ترتیب ۹ و ۸ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۷ بود. در مرحله‌ی صحت‌سنجی مقادیر آماره‌ی  $RMSE$  برای صفات مورد مطالعه به ترتیب ۹ و ۶ درصد و کارایی مدل



شکل ۱- مقادیر متغیرهای هواشناسی اهواز

Figure 1-The values of Ahvaz meteorological variables

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

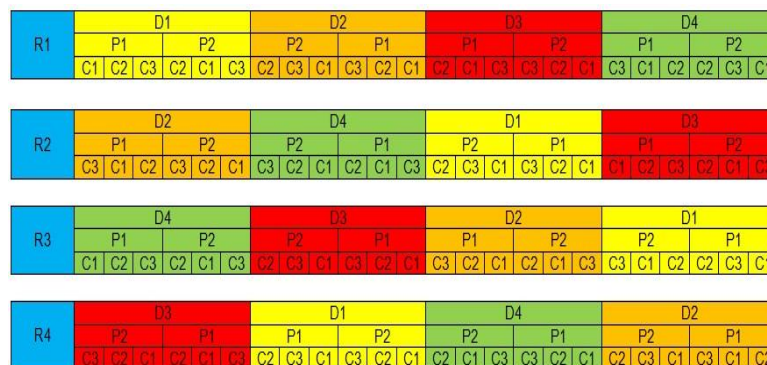
Table 1- Physicochemical characteristics of the soil

سال	عمق	شوری	اسیدیته	کربن آلی	نیترژن	فسفر	پتاسیم	رس	سیلت	شن	بافت خاک
Year	Depth (Cm)	Salinity (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	C (%)	N (mg.kg <sup>-1</sup> )	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Soil texture
2018	0-30	5.4	9.7	0.58	0.058	10.5	245	22	30	48	Loamy
2019	30-60	4.4	8	0.53	0.053	11.2	265	24	30	46	Loamy

بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته‌شد. در روش نشاکاری، یک ماه قبل از هر تاریخ کاشت، عملیات تهیه نشا در سینی مخصوص حاوی خاک برگ انجام گردید و نشاها هم‌زمان با کشت بذری به مزرعه انتقال یافتند. کنترل علف‌های هرز به‌صورت دستی (عملیات وجین) و مبارزه با آفات و بیماری‌ها به‌صورت شیمیایی و با استفاده از حشره‌کش پروتئوس با غلظت ۲ در هزار انجام شد. در انتهای فصل رشد، برای تعیین عملکرد و زیست‌توده، از هر کرت ۰/۵ متر برای حذف اثر حاشیه‌ای جدا گردیده و عملیات برداشت در سطح یک متر مربع صورت گرفت. با توجه به نوع رقم و تاریخ کاشت، عملیات برداشت برای هر تیمار متفاوت و در بازه‌ی ۱۰ اسفند تا ۱۰ فروردین متغیر بود.

سانتی‌متر انجام شد و از ترکیب نمونه‌ها، نمونه مرکب تهیه و به آزمایشگاه ارسال گردید (جدول ۱).

کود پایه براساس آزمون خاک و نیاز غذایی گیاه، به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۱۰۰ کیلوگرم پتاس و فسفات از منابع سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل در نیمه دوم مهر ماه به خاک اضافه شد. نحوه کاشت به‌صورت جوی و پشته و با فاصله خطوط کاشت ۵۰ سانتی‌متر بود. فاصله نشاها روی ردیف و فاصله بذرها در کاشت مستقیم روی ردیف پنج سانتی‌متر و عمق کاشت دو سانتی‌متر در نظر گرفته‌شد. هر کرت دارای پنج خط کاشت به طول چهار متر بود. فاصله بین کرت‌های اصلی یک متر، فاصله بین کرت‌های فرعی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین



شکل ۲- نقشه آزمایش کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۴ تکرار

Figure 2- Experimental design of twice-sliced plots in the form of a basic design of randomized complete blocks in 4 replications

## مدل AquaCrop

مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۱) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جزء تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۲) (Geerts *et al.*, 2009).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (2)$$

در این روابط،  $Y_a$  و  $Y_x$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول،  $ET_a$  و  $ET_x$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه، و  $K_y$  ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق، که در آن،  $K_c$  و  $K_s$  به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و  $CC$  پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Geerts *et al.*, 2009).

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t}$$

در این رابطه،  $CC_0$  پوشش تاج اولیه (درصد)،  $CGC$  ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و  $t$  زمان (روز) می‌باشد. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه ۴ برآورد می‌گردد (Geerts *et al.*, 2009):

$$B = WP^* \left[ \frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (4)$$

در این رابطه،  $Tr$  مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی،  $WP$  ضریب بهره‌وری آب،  $ET_0$  تبخیر-تعرق گیاه مرجع و  $B$  عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Geerts *et al.*, 2009):

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

در این رابطه،  $Y$  عملکرد،  $HI$  شاخص برداشت و  $B$  بیوماس خشک است. در این مدل، شدت تنش آبی ( $K_s$ ) مؤثر بر توسعه پوشش تاج ( $CC$ )، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد  $CC$ )، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به پیروی از آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد.

## تحلیل حساسیت

پیش از انجام واسنجی و مدل‌سازی با مدل AquaCrop ابتدا متغیرهای ورودی این مدل‌ها با استفاده از رابطه ۶ مورد تحلیل حساسیت قرار گرفتند (Geerts and Raes, 2009).

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

در این رابطه،  $S_c$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $P_m$  مقدار برآورد شده عامل مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و  $P_b$  مقدار برآورد عامل مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. به منظور تحلیل حساسیت، مقدار هر عامل ورودی ۲۵ درصد افزایش و کاهش می‌یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس،  $S_c > 15$  حساسیت بالا،  $15 > S_c > 2$  حساسیت متوسط،  $S_c < 2$  حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts and Raes, 2009).

## واسنجی مدل

با توجه به اینکه داده‌های این پژوهش در دو سال زراعی برداشت شدند، برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های سال اول استفاده شد. جهت ارزیابی مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد (Ahmaded *et al.*, 2015). این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۷ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

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

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

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

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

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

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

گیاهی نیز وابسته بود، بر این اساس مقدار آن نسبت به حالت پیش‌فرض تغییر یافت. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات دو متغیر بهره‌وری آب نرمال شده و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق در دسته زیاد قرار داشت. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Ebrahimipak et al., 2019). حساسیت سایر متغیرها در دسته متوسط قرار داشت و به همین دلیل این متغیرها مورد واسنجی قرار گرفتند. نتایج مقادیر واسنجی شده در جدول ۲ آورده شده است.

### واسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای عملکرد کینوا در تاریخ‌های کاشت مختلف، ارقام متفاوت و دو روش کاشت مورد استفاده در شکل ۳ آورده شده است. مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان داد که به صورت متوسط ۹/۲۵ درصد اختلاف در شبیه‌سازی عملکرد وجود داشت. کمترین و بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۶۳ و ۳۰۳ کیلوگرم بر هکتار بود. این مقایسه به ترتیب ۴/۳ و ۲۰/۵ درصد نسبت به مقادیر مشاهده‌ای بود. در نه تیمار، مقادیر شبیه‌سازی شده از متوسط عملکرد مشاهده‌ای بیشتر و در سایر تیمارها از مقدار متوسط کمتر بود. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مشاهده‌ای بود. مقایسه زیست‌توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نیز در شکل ۴ آورده شده است. متوسط، حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۶۴۳، ۴۱۶ و ۸۱۷ کیلوگرم بر هکتار بود. در ۱۲ تیمار، اختلاف موجود از متوسط زیست‌توده مشاهده‌ای بیشتر بود. ولی در اکثر تیمارها زیست‌توده شبیه‌سازی شده کمتر از مقدار مشاهده‌ای بود. به همین دلیل، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج براساس آماره‌ی MBE در جدول ۳ مشاهده می‌شود. این نتایج با مشاهدات سایر محققان روی گیاه کینوا مطابقت داشت (Chumbe et al., 2022). خطای مدل AquaCrop برای عملکرد و زیست‌توده براساس آماره‌ی RMSE به ترتیب ۱۵۵/۳ و ۶۵۵/۲ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به متوسط مقدار مشاهده شده برای این دو متغیر قابل قبول بود. دقت مدل AquaCrop برای هر دو متغیر مورد بررسی کمتر از ۱۰ درصد

در معادله‌های فوق  $P_i$  مقدار شبیه‌سازی شده نفوذ،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده نفوذ،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده نفوذ،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ و  $n$  برابر تعداد تیمارها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل AquaCrop مقدار متغیر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل‌ها در برآورد متغیر مورد نظر عدد کوچکتری به دست داده است. مقدار آماره NRMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده‌ی 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 نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار EF 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.

### صحت‌سنجی مدل

پس از واسنجی مدل AquaCrop، از داده‌های سال دوم برای صحت‌سنجی استفاده شد. در این مرحله، متغیرهای ورودی مدل از مرحله‌ی واسنجی برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مرحله نیز از آماره‌های ۷ تا ۱۲ برای ارزیابی مدل استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### تحلیل حساسیت و داده‌های ورودی

پیش از واسنجی، تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی مدل AquaCrop انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات متغیرهای دمای پایه، دمای بالا و پوشش گیاهی اولیه در دسته کم قرار داشت. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Egdernezhad et al., 2019; Ahmaded et al., 2021). به دلیل حساسیت کم این متغیرها، مقادیر دمای پایه و بالا به صورت پیش‌فرض باقی‌ماند. پوشش گیاهی اولیه به تراکم

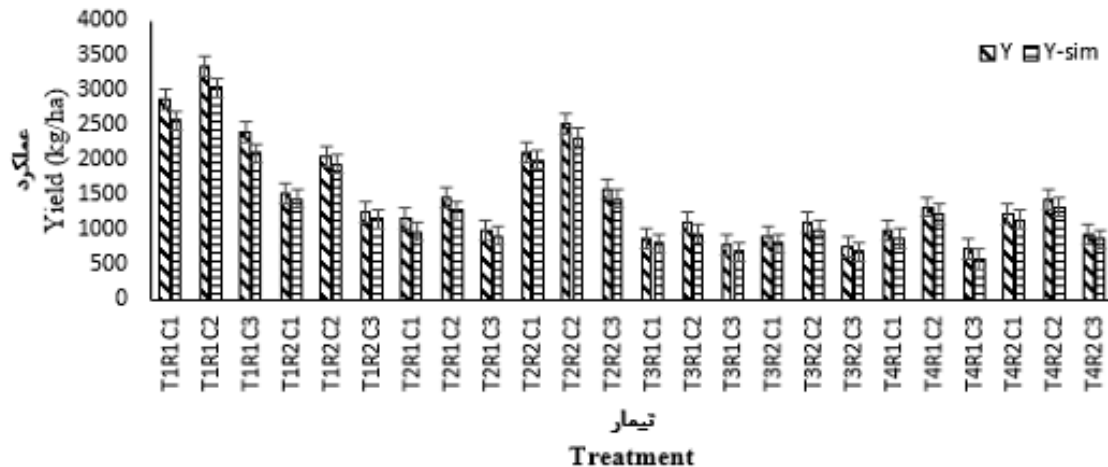
(شکل ۵). این نتایج توسط سایر محققان روی گیاه کینوا نیز گزارش شده است (Van Gaelen *et al.*, 2015; Emdad *et al.*, 2022). براساس مجموع نتایج حاصل شده در مرحله واسنجی، می‌توان از مدل AquaCrop برای عملیات صحت‌سنجی استفاده نمود.

بود ( $NRMSE \leq 0.1$ ). بنابراین دقت این مدل گیاهی در دسته عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop نیز براساس دو آماره‌ی EF و d مطلوب بود. آماره‌ی  $R^2$  برای عملکرد و زیست‌توده بالا بود ( $R^2 > 90$ ) به‌همین دلیل مدل AquaCrop توانایی قابل‌قبولی برای شبیه‌سازی تغییرات این دو متغیر داشت

جدول ۲- تحلیل حساسیت و مقادیر متغیرهای ورودی به مدل AquaCrop

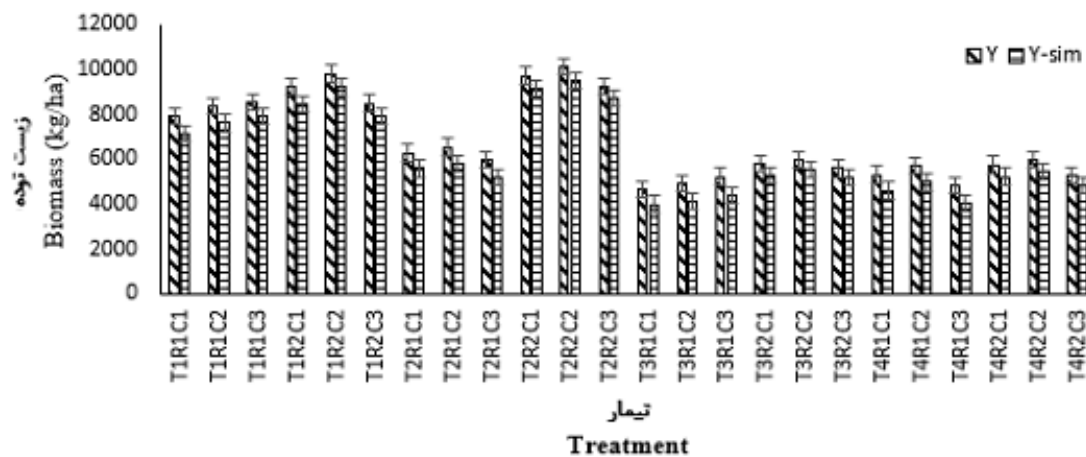
Table 2- AquaCrop sensitivity analysis and input parameters values

متغیر Parameter	Sc-0.25%	Sc+0.25%	مقدار Value	واحد Unit	توضیحات Description
دمای پایه Base temperature	1.2	1.5	2	°C	Default
دمای بالا Upper temperature	1.7	1.1	30	°C	Default
پوشش گیاهی اولیه Initial canopy cover	1.9	1.3	2.6	%	Calibrated
تراکم گیاهی Plant density	2.5	3.0	40	Plant.ha <sup>-1</sup>	Default
ضریب رشد پوشش گیاهی Canopy growth coefficient (CGC)	7.1	5.9	9.9	%/day	Calibrated
ضریب زوال پوشش گیاهی Canopy decline coefficient (CDC)	2.3	2.8	9.0	%/day	Calibrated
زمان از کاشت تا سبز شدن Time from transplanting to emergence	3.0	2.2	8	Day	Calibrated
زمان از کاشت تا بیشینه پوشش Time from transplanting to maximum canopy	4.8	4.2	66	Day	Calibrated
زمان از کاشت تا پیری Time from transplanting to senescence	3.6	3.3	165	Day	Calibrated
زمان از کاشت تا بلوغ Time from transplanting to maturity	4.0	5.7	180	Day	Default
زمان از کاشت تا شروع تشکیل محصول Time from transplanting to start yield formation	3.6	2.8	90	Day	Default
بیشینه طول ریشه Maximum effective rooting depth	9.2	8.4	1	M	Default
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق Crop coefficient for transpiration (KCTr)	15.2	17.0	1.15	-	Calibrated
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity (WP*)	18.6	17.9	11	g.m <sup>-2</sup>	Calibrated
شاخص برداشت Harvest index (HIo)	11.3	10.5	50	%	Default



شکل ۳- مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 3- Comparison of observed and simulated yield in calibration stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca).



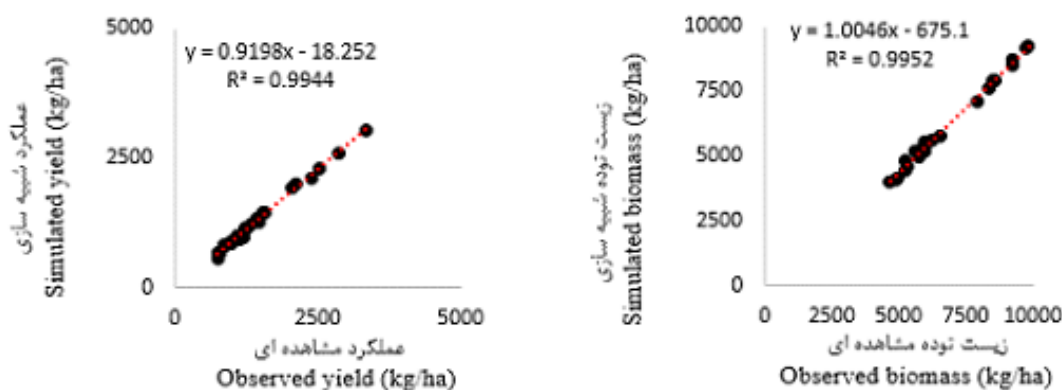
شکل ۴- مقایسه زیست‌توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 4- Comparison of observed and simulated biomass in calibration stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca)

جدول ۳- نتایج آماری متغیرهای عملکرد و زیست‌توده در مرحله واسنجی

Table 3- Statistical values for yield and biomass in calibration stage

متغیر	میانگین خطای ارب	ریشه میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده	کارایی مدل	شاخص توافق ویلموت
Parameter	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
عملکرد Yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	-136.9	155.3	0.10	0.99	0.99
زیست‌توده Biomass (kg.ha <sup>-1</sup> )	-643.3	655.2	0.09	0.99	0.99



شکل ۵- همبستگی عملکرد و زیست توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

Figure 5- Correlation of observed and simulated yield and biomass in calibration stage

قابل قبول است. مقدار آماره‌ی RMSE برای کل تیمارهای مورد مطالعه ۱۵۵/۳ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد که از دو تیمار T3 و T4 بیشتر بود. مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کلیه تیمارها دچار خطای کم برآوردی شد که براساس آماره‌ی MBE نیز قابل مشاهده است. دقت این مدل گیاهی برای کلیه تیمارها در دسته عالی ( $NRMSE \leq 0.1$ ) قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop در شرایط در نظر گرفتن کلیه تیمارها و تفکیک آن‌ها براساس تاریخ کاشت مطلوب بود. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای کلیه تیمارها نشان داد که مدل AquaCrop توانایی خوبی برای پیروی از تغییرات داده‌ها داشت (شکل ۷). نتایج همبستگی در شرایط تفکیک داده‌ها براساس تاریخ کاشت، رقم و روش کاشت مشابه شکل ۷ و نزدیک به ۹۹ درصد بود. به همین دلیل به منظور پرهیز از تکرار نتایج مشابه، ارائه نشدند.

### صحت‌سنجی مدل برای عملکرد کینوا

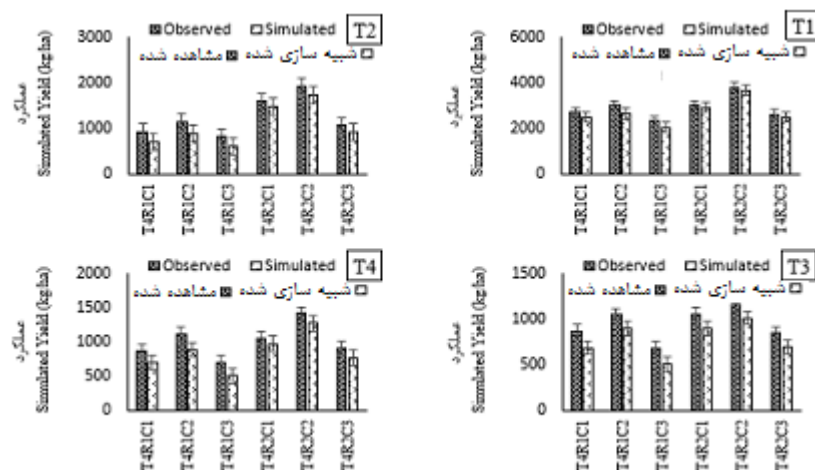
نتایج مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی به صورت تفکیک شده برای هر عامل مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج براساس تاریخ کاشت در شکل ۶ نشان داده شده است. متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای T1، T2، T3 و T4 به ترتیب ۱۹۸، ۱۵۳، ۹۷ و ۹۷ کیلوگرم بر هکتار بود. حداقل اختلاف بین مقادیر عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۹۳، ۷۸، ۶۲ و ۶۶ و حداکثر این اختلاف به ترتیب ۳۰۳، ۲۱۰، ۱۷۲ و ۱۵۱ کیلوگرم بر هکتار بود. بنابراین، دقت مدل AquaCrop نسبت به تاریخ‌های کاشت در اواسط و انتهای آبان بیشتر بود. این نتایج براساس آماره‌ی RMSE در جدول ۴ نیز قابل مشاهده است. براساس مقادیر این آماره، مقدار خطا به ترتیب ۲۲۱/۹، ۱۶۱/۸، ۱۰۳/۸ و ۱۰۱/۸ کیلوگرم بر هکتار بود که

جدول ۴- نتایج آماری عملکرد (کیلوگرم در هکتار) در مرحله صحت‌سنجی

Table 4- Statistical values for Yield ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) in validation stage

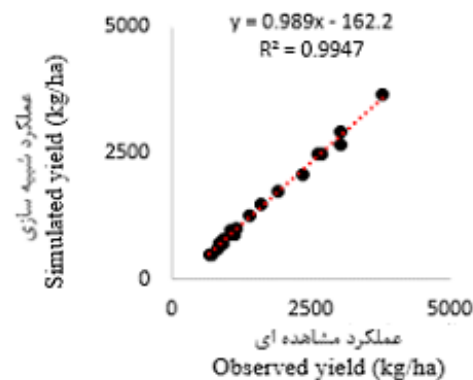
تیمار	میانگین خطای اریب	ریشه میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده	کارایی مدل	شاخص توافق ویلموت
Treatment	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
All	-136.9	155.3	0.10	0.99	0.99
T1	-198.6	221.9	0.09	0.99	0.99
T2	-153.6	161.8	0.09	0.99	0.99
T3	-97.4	103.8	0.11	0.98	0.99
T4	-97.8	101.8	0.09	0.99	0.99
R1	-171.8	191.6	0.12	0.98	0.99
R2	-102.0	107.5	0.07	0.99	0.99
C1	-128.8	150.9	0.10	0.99	0.99
C2	-158.3	171.8	0.09	0.99	0.99
C3	-123.5	141.8	0.11	0.98	0.99





شکل ۶- مقایسه عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای تاریخ‌های کاشت مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 6- Comparison of observed and simulated yield for different cultivation date in validation stage (Cultivation date as the main factor in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca))

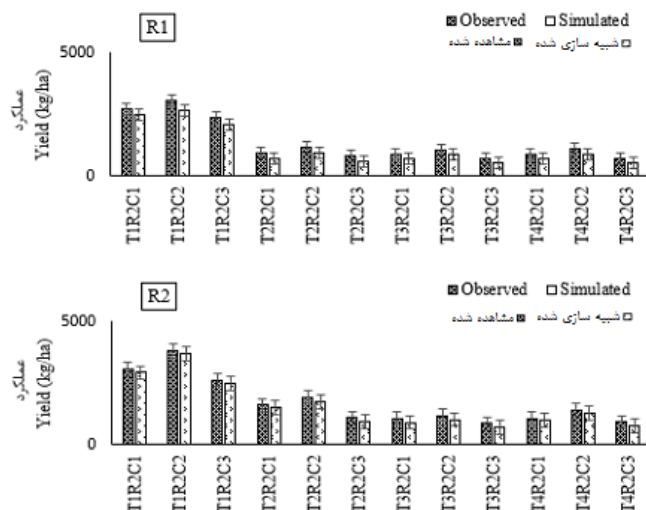


شکل ۷- همبستگی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی برای کلیه تیمارها

Figure 7- Correlation between observed and simulated yield in validation stage for all treatment

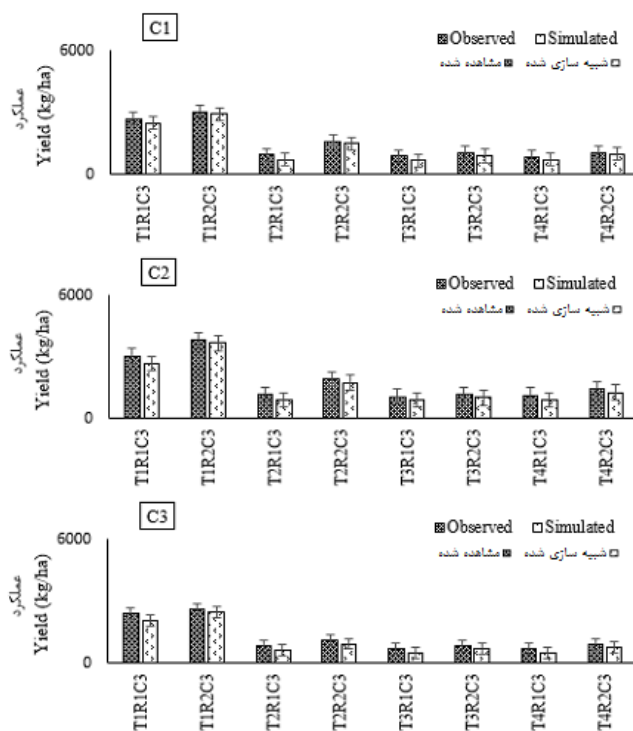
کاشت نیز بیشتر بود. خطا و دقت مدل AquaCrop براساس روش نشایی به ترتیب ۱۹۱/۶ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۱۲ و براساس روش کشت مستقیم به ترتیب ۱۰۷/۵ کیلوگرم بر هکتار و ۰/۰۷ بود. بنابراین مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در هر دو روش کاشت خطای قابل قبول، در روش نشایی دقت خوب ( $0.1 < \text{NRMSE} \leq 0.2$ ) و در روش مستقیم دقت عالی ( $\text{NRMSE} \leq 0.1$ ) داشت. کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در هر دو روش کاشت مطلوب بود.

تفکیک نتایج براساس روش کاشت در شکل ۸ ارائه شده است. متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو روش نشایی (R1) و مستقیم (R2) به ترتیب ۱۷۱ و ۱۰۲ کیلوگرم بر هکتار بود. کمترین و بیشترین اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در روش نشایی به ترتیب ۶۲ و ۳۰۳ کیلوگرم بر هکتار و در روش مستقیم ۶۶ و ۱۹۴ کیلوگرم بر هکتار بود. براساس این نتایج، دقت مدل AquaCrop در روش مستقیم حدود ۴۰ درصد بیشتر از روش نشایی بود. چون شبیه‌سازی گیاه کینوا در مدل AquaCrop در حالت پیش‌فرض به‌صورت روش مستقیم است، دقت شبیه‌سازی به این روش



شکل ۸- مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای روش‌های کاشت مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (ارقام: C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 8- Comparison of observed and simulated yield for different cultivation method in validation stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca)



شکل ۹- مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای رقم‌های مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (ارقام: C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

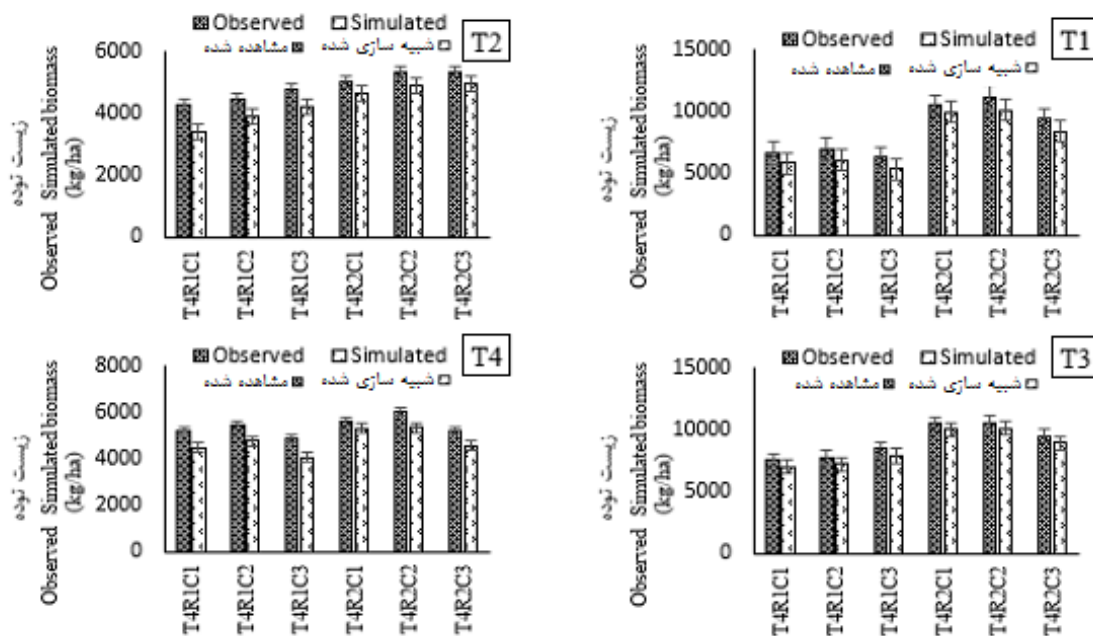
Figure 9- Comparison of observed and simulated yield for different cultivar in validation stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca)

۴۱۷ و ۳۲۴ کیلوگرم بر هکتار و بیشترین اختلاف به ترتیب ۱۰۷۲، ۸۷۱، ۶۰۹ و ۷۹۳ کیلوگرم بر هکتار بود. براساس جدول ۵، خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده تیمار T1 (۶۸۹/۱) کیلوگرم بر هکتار) از سایر تیمارها بیشتر بود. خطای این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده دو تیمار T3 و T4 نسبت به خطای شبیه‌سازی برای کلبه تیمارها (۶۵۵/۲) کیلوگرم بر هکتار) کمتر بود. با این وجود دقت شبیه‌سازی زیست‌توده این دو تاریخ کاشت در دسته خوب ( $0.1 < \text{NRMSE} \leq 0.2$ ) و برای دو تاریخ کاشت T1 و T2 در دسته عالی ( $\text{NRMSE} \leq 0.1$ ) قرار داشت. علت آن زیست‌توده پایین در دو تاریخ کاشت T3 و T4 بود. با این وجود، کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده کینوا در هر چهار تاریخ کاشت قابل قبول بود. همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در این تیمارها یکسان و برابر با ۰/۹۹ بود. این نتایج با همبستگی بین کل داده‌ها در شکل ۱۱ یکسان بود و به همین دلیل به منظور پرهیز از تکرار نتایج، نشان داده نشدند.

نتایج عملکرد برای سه رقم گیزا (C1)، کیو ۲۶ (C2) و تیتیکا (C3) در شکل ۹ ارائه شده است. متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای این رقم‌ها به ترتیب ۱۲۸، ۱۵۸ و ۱۲۳ کیلوگرم بر هکتار بود. کمترین اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای این سه رقم به ترتیب ۶۲، ۹۶ و ۶۷ کیلوگرم بر هکتار و بیشترین اختلاف عملکرد به ترتیب ۳۰۳، ۲۹۸ و ۲۹۱ کیلوگرم بر هکتار بود. براساس آماره RMSE، خطای شبیه‌سازی عملکرد برای رقم تیتیکا کمتر و برای کیو ۲۶ بیشتر از سایر ارقام بود. دقت و کارایی شبیه‌سازی عملکرد هر سه رقم نزدیک بود.

### صحت‌سنجی مدل برای زیست‌توده کینوا

نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده برای چهار تاریخ کاشت در شکل ۱۰ ارائه شده است. متوسط اختلاف زیست‌توده شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برای تاریخ‌های کاشت T1، T2، T3 و T4 به ترتیب ۸۷۰، ۵۴۲، ۵۳۳ و ۶۳۵ کیلوگرم بر هکتار بود. کمترین اختلاف برای این تیمارها به ترتیب ۵۲۹، ۴۰۱،



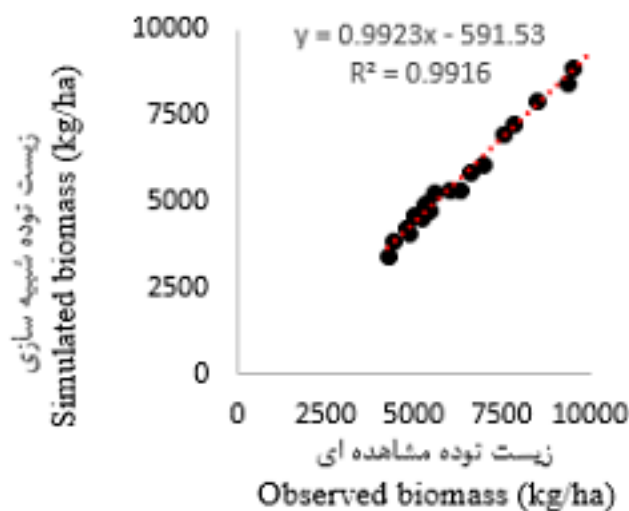
شکل ۱۰- مقایسه زیست‌توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای تاریخ‌های کاشت مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو ۲۶ و C3: تیتیکا))

Figure 10- Comparison of observed and simulated biomass for different cultivation date in validation stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca)

جدول ۵- نتایج آماری متغیر زیست توده (کیلوگرم در هکتار) در مرحله صحت سنجی

Table 5- Statistical values for biomass (kg.ha<sup>-1</sup>) in validation stage

تیمار	میانگین خطای اریب	ریشه میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده	کارایی مدل	شاخص توافق ویلموت
Treatment	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
All	-643.3	655.2	0.09	0.99	0.99
T1	-681.9	689.1	0.07	0.99	0.99
T2	-658.0	662.9	0.08	0.99	0.99
T3	-613.4	633.4	0.11	0.98	0.99
T4	-619.7	633.8	0.11	0.98	0.99
R1	-742.4	744.4	0.12	0.98	0.99
R2	-544.14	551.8	0.07	0.99	0.99
C1	-663.6	670.9	0.09	0.99	0.99
C2	-649.3	659.8	0.09	0.99	0.99
C3	-616.9	634.4	0.09	0.99	0.99

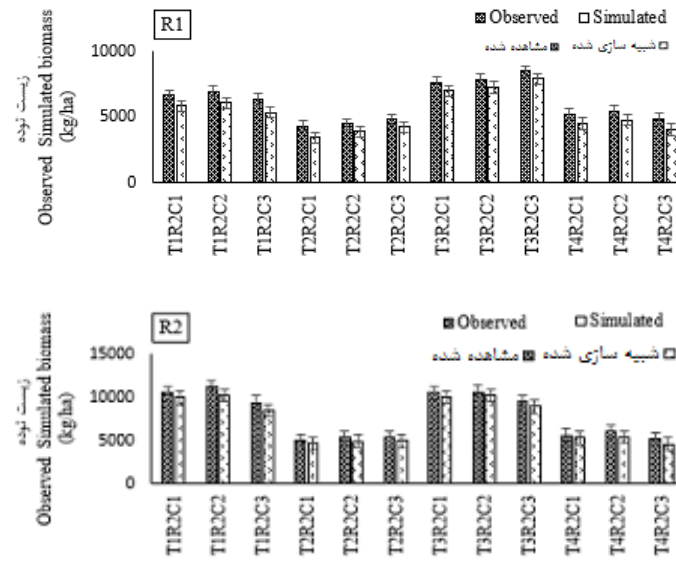


شکل ۱۱- همبستگی زیست توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

Figure 11- Correlation of observed and simulated biomass in validation stage

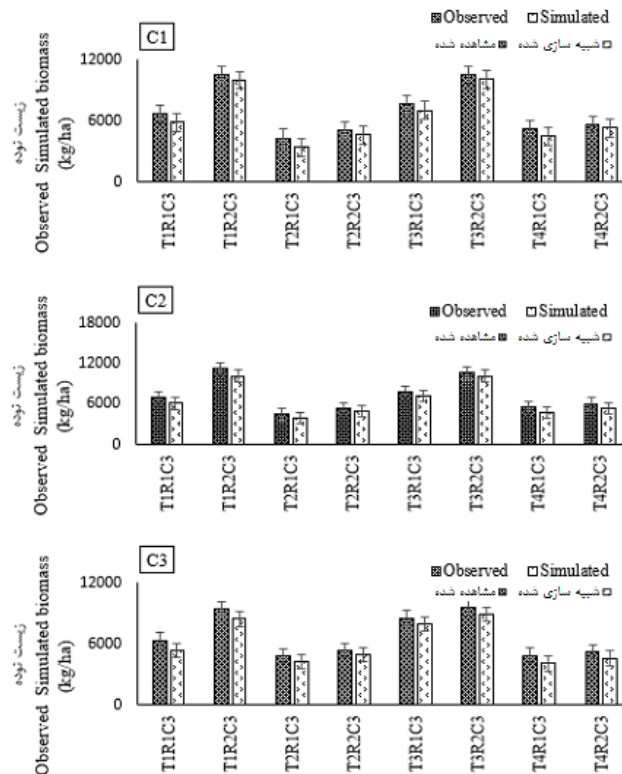
نشایی بود. هم‌چنین دقت این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده در روش مستقیم بهتر از روش نشایی بود. متوسط اختلاف زیست‌توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی برای سه رقم گیزا، کیو ۲۶ و تیتیکاکا به ترتیب ۵۸۱، ۶۶۲ و ۶۹۱ کیلوگرم بر هکتار بود (شکل ۱۳). حداقل اختلاف برای این سه رقم به ترتیب ۳۲۴، ۴۱۲ و ۴۱۳ کیلوگرم بر هکتار و حداکثر اختلاف به ترتیب ۸۷۱، ۱۰۷۲ و ۹۷۹ کیلوگرم بر هکتار بود. مقادیر آماره‌ی RMSE و NRMSE برای سه رقم مورد مطالعه تقریباً یکسان بود. به‌همین دلیل دقت و خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده کینوا تحت تأثیر رقم قرار نگرفت.

مقایسه زیست‌توده برای دو روش کاشت نشایی (R1) و مستقیم (R2) در شکل ۱۲ ارائه شده است. متوسط اختلاف زیست‌توده مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو روش نشایی و مستقیم به ترتیب ۷۲۳ و ۵۶۶ کیلوگرم بر هکتار بود. حداقل و حداکثر اختلاف عملکرد در روش نشایی به ترتیب ۵۶۷ و ۹۷۹ کیلوگرم در هکتار و در روش مستقیم ۳۲۴ و ۱۰۷۲ کیلوگرم بر هکتار بود. مشابه نتایج به‌دست آمده برای عملکرد، خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده در روش مستقیم کمتر بود. نتایج آماره RMSE نشان داد که خطای مدل AquaCrop در روش مستقیم ۲۱/۷ درصد کمتر از روش



شکل ۱۲- مقایسه زیست‌توده مشاهده شده و شبیه‌سازی برای روش‌های کاشت مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 12- Comparison of observed and simulated biomass for different cultivation method in validation stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca))



شکل ۱۳- مقایسه زیست‌توده مشاهده شده و شبیه‌سازی برای رقم‌های مختلف در مرحله صحت‌سنجی (تاریخ کاشت به عنوان فاکتور اصلی در چهار زمان (T1: ۳۰ مهر، T2: ۱۰ آبان، T3: ۲۰ آبان و T4: ۳۰ آبان)، فاکتور فرعی روش کاشت به دو صورت (R1: نشاکاری و R2: مستقیم) و فاکتور فرعی ارقام (C1: گیزا، C2: کیو۲۶ و C3: تیتیکاکا))

Figure 13- Comparison of observed and simulated biomass for different cultivar in validation stage in four date (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), two cultivation methods (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca))

## نتیجه‌گیری کلی

این تحقیق به منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کینوا تحت سه عامل تاریخ و روش کاشت و رقم انجام شد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن کلیه عوامل، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده دچار خطای کم‌برآوردی شد. هم‌چنین کارایی مدل AquaCrop مطلوب ( $d > 0.90$  و  $EF > 0.90$ ) و دقت آن عالی ( $NRMSE < 0.1$ ) بود. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده در کشت مهر و اوایل آبان بیشتر از اواسط و اواخر آبان بود. با این وجود دقت مدل AquaCrop در تاریخ‌های مهر و اوایل آبان بیشتر از دو تاریخ

دیگر بود. در بین روش‌های کاشت، کشت مستقیم دارای خطای کمتری نسبت به روش نشایی بود. اختلاف خطا در این دو روش کاشت برای عملکرد و زیست‌توده به ترتیب  $78/5$  و  $35/0$  درصد بود. اختلاف خطا در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده رقم‌های مختلف حداکثر  $17/5$  و  $5/3$  درصد بود و این اختلاف قابل چشم‌پوشی است. کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی کینوا در همه‌ی عوامل مورد بررسی مطلوب بود. براساس کلیه نتایج، می‌توان مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی کینوا پیشنهاد داد لیکن خطای آن برای روش مستقیم و در شرایط کشت بعد از نیمه آبان کمتر از سایر شرایط است.

## References

- Ahmadee, M., Khashei Siuki, A. and Sayyari, M H. 2015. Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L.) (Case Study: Birjand Plain, Iran). *Agroecology*, 8(4), PP.505-520 [In Persian]. doi: 10.22067/jag.v8i4.40517
- Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., and Egdernezhad, A. 2021. Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. *Water Management in Agriculture*, 8(1), PP.15-30 [In Persian]. dor: 20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0
- Alishiri R., Paknejad F. and Aghayari F. 2014. Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience*, 4(4), PP.1-9. doi:10.12692/ijb/4.4.1-9
- Aliyar, S., Aliasgharzad, N., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., and Ostan, Sh. 2022. Effects of endophytic fungus *Serendipitaindica* on growth and nutritional characteristics of quinoa undersalinity stress conditions. *Journal of Soil Biology*, 10 (1), PP.1-21 [In Persian]. doi: 10.22092/sbj.2022.354464.218
- Behmanesh, A., Egdernezhad, A., and Sepehri, S. 2021. Evaluation of AquaCrop Model in Simulating Safflower Yield, Biomass and Water Productivity under Different Irrigation Amounts. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), PP.2399-2413 [In Persian]. doi: 10.22059/ijswr.2021.327254.669026
- Chumbe, R., Silva, S., and Garcia, Y. 2022. Comparison of the machine learning and AquaCrop model for quinoa crops. *Research in Agricultural Engineering*, In press. doi: 10.17221/86/2021-rae
- 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), PP.117-132 [In Persian]. dor: 20.1001.1.22517480.1397.8.1.8.5
- Ebrahimipak, N., 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(3-75), PP.715-726 [In Persian]. dor: 20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4

- Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., and Ahmadee, M. 2019. Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, *Water Management in Agriculture*, 5(2), PP.53-64 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.24764531.1397.5.2.7.2**
- Emdad, M. R., Tafteh, A. and Ebrahimipak, N. 2022. Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. *Journal of Water and Soil*, 36(3), PP.319-331 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20084757.1401.36.3.1.7**
- Farahani H. J., Izzi G., Steduto P. and Oweis T Y. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*, 101, PP.469-476. **doi: 10.2134/agronj2008.0182s**
- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R and Cusicanqui J A. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* wild.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*, 101, PP.499-508. **doi: 10.2134/agronj2008.0137s**
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, PP.1275-1284. **doi: 10.1016/j.agwat.2009.04.009**
- Geerts, S., Raes, D., and Garcia, M. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*, 98, PP.213-216. **doi: 10.1016/j.agwat.2010.07.003**
- Golabi, M., Lak, Sh., Gilani, A., Alavi Fazel, M., and Egdernezhad, A. 2022. Growth Index, Yield and Yield Components of Quinoa (*Chenopodium quinoa* wild) Cultivars Affected by Date and Method of Planting at Ahvaz Region. *Journal of Crop Ecophysiology*, 16 (3), PP.411-434. [In Persian]. **doi: 10.30495/jcep.2022.1928721.1797**
- Gonzalez Martin, M.I., G. Wells Moncada, S. Fischer and O. Escuredo. 2014. Chemical characteristics and mineral composition of quinoa by nearinfrared spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, PP.876 -881. **doi: 10.1002/jsfa.6325**
- 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*, 101(3), PP.488-498. **doi: 10.2134/agronj2008.0029xs**
- Hsiao, T C., Heng L K., Steduto P., Raes D. and Fereres E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*, 101, PP.448-459. **doi: 10.2134/agronj2008.0218s**
- Jacobsen, S.E., H. Quispe and A. Mujica. 2001. Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. Scientist and Farmer -Partners in Research for the 21st Century. *CIP Program Report*, 2000, 403 -408.
- Jacobsen, S.E., Monteros, C., Christiansen, J.L., Bravo, L.A., Corcuera, L.J., Mujica, A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* wild.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, 22, PP.131-139. **doi: 10.1016/j.eja.2004.01.003**
- 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, PP.14-26. **doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.005**
- Kia, M., Bagheri, N., Babaeian Jelodar, N., and Begheri, M. 2022. Investigation of Morphological and Genotypic Characteristics of Quinoa in Gorgan Region. *Journal of Crop Breeding*, 14 (43), PP.145-154 [In Persian]. **doi:**

**10.52547/jcb.14.43.145**

Salehi, M., Soltani V. and Dehghany. F. 2016. Potential of quinoa production in central plateau of Iran. *Regional conference of marginal area of Iran central desert*, 23 Jan , Qom - Iran [In Persian]. **doi:**

**10.22077/escs.2019.1514.1341**

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*, 101, PP.509-521. **doi: 10.2134/agronj2008.0166s**

Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abaha, B., Diels, J., and Raes, D. 2015. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure. *Journal of Agricultural Science*,153, PP.1218-1233. **doi:**

**10.1017/S0021859614000872**



## Simulation of the yield and biomass of quinoa under different agricultural management using the AquaCrop model

Mehrnoosh Golabi<sup>1</sup>, Shahram Lak<sup>1\*</sup>, Abdolali Gilani<sup>2</sup>, Mojtaba Alavifazel<sup>3</sup>, Aslan Egdernezhad<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Agronomy, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Department of Seed and Plant Improvement Research, Khuzestan Agricultural and Natural Resources and Extension Center, AREEO, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup> Department of Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

\*Corresponding Author: [sh.lack@yahoo.com](mailto:sh.lack@yahoo.com)

Received: 26 December 2022

Accepted: 31 January 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.378375.1305

### Abstract

**Introduction:** Quinoa (*Chenopodium quinoa* wild) is a dicotyledonous plant with about 95% purity. Quinoa is one-year, broad-leaved and has a height of one to two meters. This plant is native to South America, which is generally cultivated for its seeds, but its biomass is also popular as leafy vegetables. The seed of this plant is small in size and is a rich source of many vitamins and proteins. For this reason, its cultivation is expanding in Iran. For this reason, it is very important to know the effects of various factors such as planting method, planting time and cultivar used on its yield and biomass. Due to the high cost of field experiments, the AquaCrop model was used to simulate this crop plant in this research.

**Materials and Methods:** The current research was conducted in Khuzestan Agriculture and Natural Resources Research and Training Center located at 31° 20' N latitude and 48° 40' E longitude with a height of 18 meters above sea level during the years 2017-2018 and 2018-2019. The ten-year average rainfall leading to the time of the experiment is 240 mm and the average annual temperature is 25.3 degrees Celsius. The experimental treatments include planting dates at four times (T1: October 30, T2: November 10, T3: November 20, and T4: November 30), cultivation methods in two ways (R1: transplanting and R2: seed planting) and three cultivars (C1: Giza, C2: Q26 and C3: Titicaca). Tillage operation was done at the end of May for all treatments.

**Results and Discussion:** The sensitivity of the AquaCrop model to changes in base temperature, high temperature and initial canopy cover parameters was in the low category. Due to the low sensitivity of these parameters, the base and high temperature values remained as default. The initial canopy cover was also dependent on plant density, that's why its value was changed compared to the default state. The sensitivity of the AquaCrop model to changes in two parameters of normalized water productivity and the maximum crop coefficient for transpiration was in the high category. The sensitivity of other parameters was in the medium category and therefore these parameters were recalibrated. The average observed and simulated yield differences for T1, T2, T3 and T4 treatments were 198, 153, 97 and 97 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The minimum difference between observed and simulated yield values was 93, 78, 62 and 66 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively, and the maximum difference was 303, 210, 172 and 151 kg.ha<sup>-1</sup> respectively. Therefore, the accuracy of the AquaCrop model was higher compared to the planting dates in the middle and end of November. The average difference between simulated and observed biomass for planting dates T1, T2, T3 and T4 was 870, 542, 533 and 635 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The lowest difference for these treatments was 529, 401, 417 and 324 kg.ha<sup>-1</sup> respectively and the highest difference was 1072, 871, 609 and 793 kg.ha<sup>-1</sup> respectively. The average observed and simulated yield differences in the two cultivation methods R1 and R2 were 171 and 102 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The lowest and the highest difference between the observed and simulated yield was 62 and 303 kg.ha<sup>-1</sup> in the germination method and 66 and 194 kg.ha<sup>-1</sup> in the direct method. Based on these results, the accuracy of the AquaCrop model in the direct method was about 40% higher than

the seed planting. The average difference between the observed and simulated biomass in two germination and direct methods was 723 and 566 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The minimum and maximum yield differences in the germination method were 567 and 979 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively, and in the direct method, 324 and 1072 kg.ha<sup>-1</sup>. The average observed and simulated yield difference for this cultivar was 128, 158 and 123 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The lowest observed and simulated yield differences for these three cultivars were 62, 96, and 67 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively, and the highest yield differences were 303, 298, and 291 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively. The average difference between observed and simulated biomass for three varieties of Giza, Q26 and Titicaca was 581, 662 and 691 kg.ha<sup>-1</sup>, respectively.

**Conclusion:** Based on all the results, the use of this plant model is suggested for simulating quinoa, although its error is less for direct cultivation in the middle and end of November than other conditions.

**Keywords:** Crop Modeling, Cultivation Date, Seed Planting, Water-driven Model.