

Simulating the yield and water use efficiency of quinoa using the AquaCrop model

Bijan Haghighati¹ , Atefeh Sayadi Shahraki^{2*} , Mohammad Reza Emdad³ 

¹Soil and Water Research Department,, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrekord, Iran

²Soil and Water Research Department,, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrekord, Iran

³Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Article Info ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 October 2024
Revised 30 November 2024
Accepted 20 January 2025
Published online 28 June 2025

Keywords:
Biomass
Grain
Yield
Deficit Irrigation Modeling

Objective: Nowadays, optimal management of irrigation water is very essential issue. There are valuable tools such as irrigation management models to improve and facilitate this optimization.

Methods: To this end, an experiemnt was conducted to simulate the yield and water use efficiency of the quinoa plant using the AquaCrop model at the Shahrekord Chahartakhteh Research Station located in the Agricultural and Natural Resources Research Center of Chaharmahal and Bakhtiari Province during two crop years (2019-2020). The data of the first year were used for calibration and the data of the second year were used for validating the model. In this regard, 3 water treatments were selected as 30, 50, and 70 percent of usable water discharge in three replications and three stages of initial growth (I), development (D), middle (M), and final (F).

Results: The results showed that the highest and lowest yield and water use efficiency of quinoa were observed in full irrigation treatments and 70% water draining treatment of the plant, respectively. Also, water stress at the rate of 50 and 70 percent of usable water discharge in different stages of quinoa growth has led to a decrease in yield and water use efficiency. Also, the calculated statistics show the high efficiency and accuracy of the AquaCrop model in simulating the yield and water use efficiency of quinoa; in such a way that the values of RMSE, EF, and d statistics were obtained for yield 0.33, 0.85, and 0.9 and water use efficiency 0.4, 0.89 and 0.92 respectively.

Conclusions: Based on the obtained results, the application of this plant model is suggested for the simulation of quinoa.

*Corresponding author, E-mail: Sayadi.Atefeh@gmail.com

Cite this article: Haghighati, B., Sayadi Shahraki, A., & Emdad, M.R. (2024). Simulating the yield and water use efficiency of quinoa using the AquaCrop model. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.484349.1110>



© The Author(s).
DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.484349.1110>

Publisher: Gonbad Kavous University.



شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا با استفاده از مدل AquaCrop

بیژن حقیقی^۱، عاطفه صیادی شهرکی^{۲*}، محمدرضا امداد^۳

^۱بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

^۲بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

^۳بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷</p> | <p>هدف: امروزه مدیریت بهینه آب آبیاری بسیار ضروری می‌باشد و ابزارهای ارزشمندی به نام مدل‌های مدیریتی آبیاری این بهینه‌سازی را تسهیل و بهبود بخشیدند.</p> <p>مواد و روش‌ها: بدین منظور پژوهشی با هدف شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا با استفاده از مدل AquaCrop در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری طی دو سال زراعی (۱۳۹۸-۹۹) انجام شد. از داده‌های سال اول برای واسنجی و داده‌های سال دوم برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. در این خصوص ۳ تیمار آبی به‌صورت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در سه تکرار و سه مرحله رشد اولیه (I)، توسعه (D)، میانی (M) و پایانی (F) انتخاب شد.</p> <p>نتایج: نتایج نشان داد، بیشترین و کمترین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا به‌ترتیب در تیمارهای آبیاری کامل و تیمار ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه، مشاهده شد. همچنین تنش آب به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در مراحل مختلف رشد کینوا منجر به کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شده است. همچنین آماره‌های محاسبه شده هم‌نشان دهنده کارایی و دقت بالای مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که مقدار آماره‌های EF، RMSE و d به‌ترتیب برای عملکرد ۰/۳۳، ۰/۸۵ و ۰/۹ و برای بهره‌وری مصرف آب ۰/۴، ۰/۸۹ و ۰/۹۲ به‌دست آمده است.</p> <p>نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج به‌دست آمده، کاربرد این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی کینوا پیشنهاد می‌شود.</p> |
| <p>کلیدواژه‌ها: زیست‌توده عملکرد دانه کم‌آبیاری مدل‌سازی</p> | |

*نویسنده مسئول. Email: Sayadi.Atefeh@gmail.com.

استناد: حقیقی، بیژن؛ صیادی شهرکی، عاطفه؛ و امداد، محمد رضا. (۱۴۰۴). شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا با استفاده از مدل

AquaCrop. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*,

<http://doi.org/nawee.2025.484349.1110>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و محدود بودن منابع آب و خاک (به‌ویژه در کشور ما) و به دلیل قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک و به‌منظور ایجاد یک سیستم کشاورزی پایدار، نیازمند استفاده بهینه از این منابع خواهیم بود. در نواحی خشک و نیمه‌خشک، به علت کمبود بارندگی، آبیاری از ضروریات کشاورزی است و در طول هزاران سال باعث تجمع املاح در خاک و آب گردیده، که این فرآیند باعث کاهش تولیدات کشاورزی و از بین رفتن تمدن‌های اسلامی گردیده است (حیدری‌نیا، ۱۳۸۹). آبیاری کامل به‌منظور کسب حداکثر محصول از واحد سطح در شرایطی قابل اعمال است که اولاً آب به مقدار کافی در اختیار باشد، ثانیاً امکان توسعه و افزایش سطح زیر کشت وجود نداشته باشد (Box و همکاران، ۱۹۶۳). اما شرایط اقلیمی و اراضی کشاورزی در بیشتر مناطق کشور ما به گونه‌ای است که نه تنها آب به اندازه و مقدار کافی در دسترس نیست؛ بلکه اراضی مستعد و قابل احیای زیادی وجود دارد که در صورت رسیدن آب به آن‌ها، امکان افزایش تولید قابل توجهی وجود خواهد داشت. کم‌آبیاری یک راهکار بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول در واحد سطح و افزایش آن با گسترش سطح می‌باشد. گرچه راهکار بهینه از نقطه نظر زارع، کاربرد حجمی از آب آبیاری است که درآمد خالص او را به حداکثر می‌رساند و نه مقدار آبی که بیشترین محصول را تولید می‌کند. کم‌آبیاری راهکار بهینه‌سازی است که در آن، آگاهانه به گیاهان اجازه داده می‌شود با دریافت آب کمتر از نیاز، محصول خود را کاهش دهند. هدف اصلی از اجرای کم‌آبیاری، افزایش راندمان کاربرد آب، چه از طریق کاهش میزان آب آبیاری در هر نوبت و یا حذف آبیاری‌هایی است که کمترین بازده را دارند (English, 1995).

به‌منظور کاهش آزمایش‌های صحرایی پرهزینه و زمان‌بر، استفاده از نرم‌افزارها، گزینه بسیار مناسبی است. شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه و در نتیجه پیش‌بینی عملکرد محصول، منجر به برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کاراتر در روند تولید محصول خواهد شد. در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی جهت شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب و خاک ارائه شده است و محققین در تحقیقات مختلف از این مدل‌ها استفاده می‌کنند (Hoogenboom et al., 2004). یکی از اهداف مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی عملکرد محصول می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده شده و توسط محققین مختلف به‌کاررفته‌اند. در سال ۲۰۰۹، فائو مدل شبیه‌سازی AquaCrop را بر اساس معادله دورنباس و کاسام و به‌همراه تصحیحاتی بر آن ارائه داد، که مقیاس محاسبات در آن بر اساس گام روزانه می‌باشد (Steduto, 2009). ابراهیمی‌پاک (۱۳۹۸)، به ارزیابی دقت مدل AquaCrop نسبت به دو مدل گیاهی WOFOST و CropSyst به‌منظور شبیه‌سازی گیاه زراعی کلزا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی و دقت مدل AquaCrop بسیار مناسب بود و به‌دلیل سادگی و محیط کاربری راحت‌تر نسبت به دو مدل گیاهی مذکور، به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کلزا بهتر است. امداد و همکاران (۱۴۰۱)، کارایی مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری بررسی کردند. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا بوده و می‌توان از این مدل به‌منظور ارائه مناسب‌ترین سناریو و مدیریت آبیاری در حالت‌های مختلف تنش و کم‌آبیاری استفاده نمود. گلایی و همکاران (۱۴۰۲)، عملکرد و زیست‌توده کینوا تحت مدیریت‌های مختلف زراعی را با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد کارایی مدل AquaCrop مطلوب و دقت آن عالی می‌باشد. همچنین کاربرد این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی کینوا پیشنهاد می‌شود، گرچه خطای آن برای کشت مستقیم در اواسط و انتهای آبان کمتر از سایر شرایط بود. Chumbe و همکاران (۲۰۲۳)، در تحقیقی به مقایسه شبیه‌سازی عملکرد کینوا در کشور ایتالیا با دو روش یادگیری ماشین بردار و AquaCrop پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند پیچیده یادگیری ماشین مشابه مدل کاربرپسند AquaCrop بود. نتایج آماره MAE در این پژوهش برابر با ۰/۹۶۲ به‌دست آمده است که قابل قبول بوده است.

کینوا گیاه جدیدی است که تا کنون در ایران تحقیقات اندکی در خصوص آن انجام گرفته است. کینوا یک گیاه مقاوم به خشکی و شوری معرفی شده است که در شرایط مختلف خاک و اقلیم قابلیت رشد و تولید محصول را دارد. بهره‌وری مصرف آب کینوا به علت محدودیت منابع آب و شرایط تغذیه‌ای پایین بوده و در حدود ۰/۳ تا ۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش گردیده است (

(Geerts et al., 2009). کینوا گیاهی مقاوم به تنش آبی بوده و تنش آب در مراحل اولیه سبزینه ای موجب طولانی شدن دوره رشد گیاه کینوا می گردد تا گیاه بتواند کاهش رشد خود را در صورت تامین آب جبران نماید (Jacobsen et al., 2003). واریته های مختلف کینوا مقاومت های مختلفی نسبت به تنش آبی از خود نشان می دهند (Bois et al., 2006). غالب کشت کینوا در مناطقی انجام می شود که با محدودیت منابع آب مواجه می باشند و به ندرت کشت کینوایی می توان یافت که در شرایط آبیاری کامل باشد. برخی از تحقیقات نشان داده است که عملکرد کینوا در شرایط آبیاری کامل اندکی بیشتر از کینوایی است که در شرایط کم آبیاری بوده است

با توجه به اهمیت کینوا به عنوان یک گیاه زراعی مقاوم به خشکی و شوری و همچنین وسعت رو به افزایش زمین های شور و نیز با توجه به کاهش و کمبود منابع آب کشور و نیز کاهش کیفیت آن، ضروری است با توجه به ارزش غذایی این گیاه بر روی موضوعات نیاز آبی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب و نیز مناسب‌ترین مدیریت آبیاری آن در شرایط کم آبیاری تحقیقات جامعی به‌منظور ارائه و توسعه کشت این محصول انجام پذیرد. در این مقاله به شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا با استفاده از مدل AquaCrop در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی یک سال زراعی (۹۹-۹۸) در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری واقع در پنج کیلومتری شرق شهرکرد انجام شد. این منطقه با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی در ارتفاع ۲۰۹۰ متر از سطح دریا و همچنین با اقلیم منطقه‌ای نیمه‌مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد، می‌باشد. میانگین بارندگی در منطقه مورد مطالعه برابر ۳۲۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد است (Marouf Nejad and Ghasemi, 2017). شکل ۱ نمای از محل اجرای تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمای محل اجرای طرح در ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته شهرکرد

قبل از کشت آزمون خاک در مزارع مورد مطالعه در دو سال آزمایش انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین برخی از خصوصیات آب آبیاری مزرعه کینوا در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی مزرعه کینوا

| سال | عمق خاک | شن | سیلت | رس | بافت خاک | FC | PWP | pH | OC | فسفر | پتاسیم | نیتروژن کل | منگنز | EC |
|-----|-------------|------|------|------|-----------|-------|-----|-----|-----|-------|--------|------------|-------|------|
| | (سانتی متر) | % | % | % | - | % | % | - | % | mg/Kg | mg/Kg | mg/Kg | mg/Kg | dS/m |
| اول | ۰-۳۰ | ۳۴/۵ | ۴۳/۵ | ۲۲ | لوم | ۲۵/۰۱ | ۹/۵ | ۷/۸ | ۰/۷ | ۱۱/۲ | ۲۶۵ | ۰/۰۴ | ۹/۱۱ | ۱۲/۵ |
| | ۳۰-۶۰ | ۳۵/۵ | ۴۹ | ۱۵/۵ | لوم سیلتی | ۲۶/۲۰ | ۸/۶ | ۷/۷ | ۰/۵ | ۶/۸ | ۲۸۴ | ۰/۰۳ | ۸/۵۴ | ۱۲/۷ |
| دوم | ۰-۳۰ | ۳۴/۵ | ۴۳/۵ | ۲۲ | لوم | ۲۵/۶ | ۹/۳ | ۷/۸ | ۰/۷ | ۹/۳ | ۲۸۸ | ۰/۰۵ | ۱۰/۲۵ | ۱۲/۶ |
| | ۳۰-۶۰ | ۳۴/۵ | ۴۹ | ۱۵/۵ | لوم سیلتی | ۲۴/۵ | ۸/۴ | ۷/۷ | ۰/۴ | ۵/۶ | ۲۴۱ | ۰/۰۳ | ۸/۷۴ | ۱۲/۶ |

جدول ۲- برخی از مشخصات آب آبیاری مزرعه کینوا

| EC | SAR | pH | کلسیم | منیزیم | سدیم | کلراید | بی کربنات |
|------|------|-----|-------|--------|------|--------|-----------|
| dS/m | - | - | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| ۴/۱۱ | ۰/۱۵ | ۷/۷ | ۳۳/۲ | ۱۶/۶ | ۴/۲۶ | ۲۵/۶ | ۹۲/۲ |

در خصوص وارپته و چگونگی کاشت کینوا (تراکم کشت) مطابق با توصیه های موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر از رقم Q29 استفاده شد. در این ارتباط ۳ تیمار آبی به صورت ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در سه تکرار و ۴ مرحله رشد (مرحله اولیه، توسعه، میانی و رسیدن) در کرت های آزمایشی به ابعاد ۳ در ۴ متر در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در دو سال زراعی اجرا شد. از داده های سال اول برای واسنجی و داده های سال دوم برای صحت سنجی مدل AquaCrop استفاده شد. برای شبیه سازی عملکرد و کارایی مصرف آب از مدل گیاهی AquaCrop استفاده شد. این مدل به چهار دسته داده ورودی شامل داده های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه ای نیاز دارد. روش های محاسبه و تئوری مدل AquaCrop به طور جزئی توسط Steduto و همکاران (۲۰۰۹) شرح داده شده است.

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

در این معادله Y_x عملکرد حداکثر، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق حداکثر، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق می باشد. مدل AquaCrop به وسیله الف- تفکیک تبخیر و تعرق به تعرق از سطح محصول (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E) ب- توسعه یک مدل ساده رشد و پیر شدن تاج پوشش گیاهی به عنوان پایه برآورد Tr و تفکیک آن از تبخیر، ج- شبیه سازی عملکرد نهایی (Y) به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) و د- تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء: رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاه، Tr و HI توسعه یافته است. تفکیک ET به E و Tr از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق E به ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری می کند. تعرق روزانه (Tr) با استفاده از ET_0 روزانه و بهره وری آب (WP) گونه گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده به وزن قسمت هوایی گیاه تبدیل می شود. رابطه (۲)، بیان ریاضی این روابط می باشد:

$$WP = \frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_0}\right)} \quad (2)$$

در این معادله WP بهره وری آب (زیست توده ناشی از هر واحد تعرق حجمی) می باشد. مدل AquaCrop با تفکیک تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی و همچنین از طریق ماده خشک و شاخص برداشت، عملکرد محصول را تخمین می زند.

برای تعیین میزان دقت مدل ها از مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF) و شاخص سازگاری (d) استفاده شد (روابط ۳ تا ۵):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2} \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \quad (5)$$

که در روابط فوق، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، Q_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌های به کار رفته و \bar{Q} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

شاخص RMSE هر چه به سمت صفر میل کند، نشان از دقت تخمین بهتر مدل خواهد بود. شاخص EF و d درجه نزدیک بودن داده‌های تخمینی به داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. محدود این شاخص‌ها بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند که هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کارا تر است.

نتایج و بحث

جهت کشت از رقم Q29 استفاده شد که رقم مورد تایید موسسه تحقیقات نهال و بذر برای کشت در استان چهارمحال و بختیاری بود. بذر مورد نیاز تحقیق از بخش علوم زراعی و باغی مرکز تحویل و کشت شد. کشت در سال اول در تاریخ ۹۸/۳/۲۵ هر سال انجام شد. بذر مورد نیاز تحقیق از بخش علوم زراعی و باغی مرکز تحویل و کشت شد. کشت در سال دوم در تاریخ ۹۹/۳/۲۵ انجام شد. در این خصوص ۳ تیمار آبی به صورت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در سه تکرار و سه مرحله رشد اولیه (I)، توسعه (D)، میانی (M) و پایانی (F) انتخاب شد. دوره‌های رشد چهارگانه بدست آمده در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- دوره‌های فنولوژی اندازه‌گیری شده در مزرعه

| نام دوره | اولیه | توسعه | میانی | پایانی | کل |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|-----|
| سال اول تعداد روز | ۲۰ | ۳۲ | ۳۵ | ۱۳ | ۱۰۰ |
| سال دوم تعداد روز | ۲۰ | ۳۲ | ۳۵ | ۱۳ | ۱۰۰ |

مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه در سال‌های اول و دوم برای دوره‌های مختلف فنولوژی کینوا در جداول ۴ تا ۷ ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه کینوا در مرحله اولیه در سال اول و دوم

| نام تیمار | سال اول | | سال دوم | |
|-----------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) |
| I-30-1 | ۳۰۵۰ | ۲۸۲۲ | ۲۹۰۱ | ۲۹۱۰ |
| I-30-2 | ۲۹۹۰ | ۲۹۳۳ | ۲۹۶۴ | ۳۰۵۰ |
| I-30-3 | ۲۹۷۱ | ۲۷۵۱ | ۲۹۷۰ | ۳۱۰۰ |
| I-50-1 | ۲۸۵۱ | ۲۸۹۱ | ۲۸۰۰ | ۲۹۱۵ |
| I-50-2 | ۲۸۹۰ | ۳۰۰۲ | ۲۸۶۴ | ۲۸۵۶ |
| I-50-3 | ۲۸۴۰ | ۲۷۸۴ | ۲۸۲۱ | ۲۷۶۵ |
| I-70-1 | ۲۷۹۰ | ۲۸۵۲ | ۲۷۵۲ | ۲۸۷۰ |
| I-70-2 | ۲۷۴۰ | ۲۸۵۴ | ۲۷۸۹ | ۲۷۸۰ |
| I-70-3 | ۲۷۸۰ | ۲۷۴۸ | ۲۷۳۰ | ۲۸۹۰ |

جدول ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه کینوا در مرحله توسعه در سال اول و دوم

| نام تیمار | سال اول | | سال دوم | |
|-----------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) |
| D-30-1 | ۲۸۵۱ | ۲۹۲۰ | ۲۸۳۰ | ۳۰۲۰ |
| D-30-2 | ۲۷۰۰ | ۲۸۶۲ | ۲۷۸۰ | ۲۹۴۰ |
| D-30-3 | ۲۸۲۱ | ۳۰۲۰ | ۲۷۴۰ | ۲۸۴۰ |
| D-50-1 | ۲۶۳۰ | ۲۸۴۰ | ۲۵۵۰ | ۲۷۹۰ |
| D-50-2 | ۲۵۸۰ | ۲۹۱۰ | ۲۴۵۰ | ۲۹۸۰ |
| D-50-3 | ۲۶۴۰ | ۲۸۸۲ | ۲۵۱۰ | ۲۹۳۰ |
| D-70-1 | ۱۹۱۰ | ۲۴۵۵ | ۱۹۵۰ | ۲۴۸۰ |
| D-70-2 | ۱۸۳۲ | ۲۵۴۲ | ۱۸۲۰ | ۲۵۱۰ |
| D-70-3 | ۱۸۵۲ | ۲۶۲۲ | ۱۸۱۰ | ۲۵۲۶ |

جدول ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه کینوا در مرحله میانی در سال اول و دوم

| نام تیمار | سال اول | | سال دوم | |
|-----------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) |
| M-30-1 | ۲۸۳۰ | ۳۱۱۲ | ۲۸۴۰ | ۳۱۱۴ |
| M-30-2 | ۲۸۶۵ | ۲۸۵۶ | ۲۸۰۲ | ۲۹۲۰ |
| M-30-3 | ۲۷۹۰ | ۲۷۹۰ | ۲۷۱۰ | ۲۸۹۰ |
| M-50-1 | ۲۴۱۰ | ۲۶۵۴ | ۲۵۴۰ | ۲۷۵۴ |
| M-50-2 | ۲۵۷۰ | ۲۷۸۴ | ۲۴۷۰ | ۲۸۱۰ |
| M-50-3 | ۲۵۲۰ | ۲۷۳۱ | ۲۴۳۰ | ۱۶۸۰ |
| M-70-1 | ۱۷۲۰ | ۱۵۲۱ | ۱۹۰۰ | ۱۶۲۰ |
| M-70-2 | ۱۶۳۰ | ۱۴۲۶ | ۱۷۱۰ | ۱۵۳۰ |
| M-70-3 | ۱۸۲۲ | ۱۳۴۴ | ۱۷۸۰ | ۱۴۲۴ |

جدول ۷- مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه کینوا در مرحله پایانی در سال اول و دوم

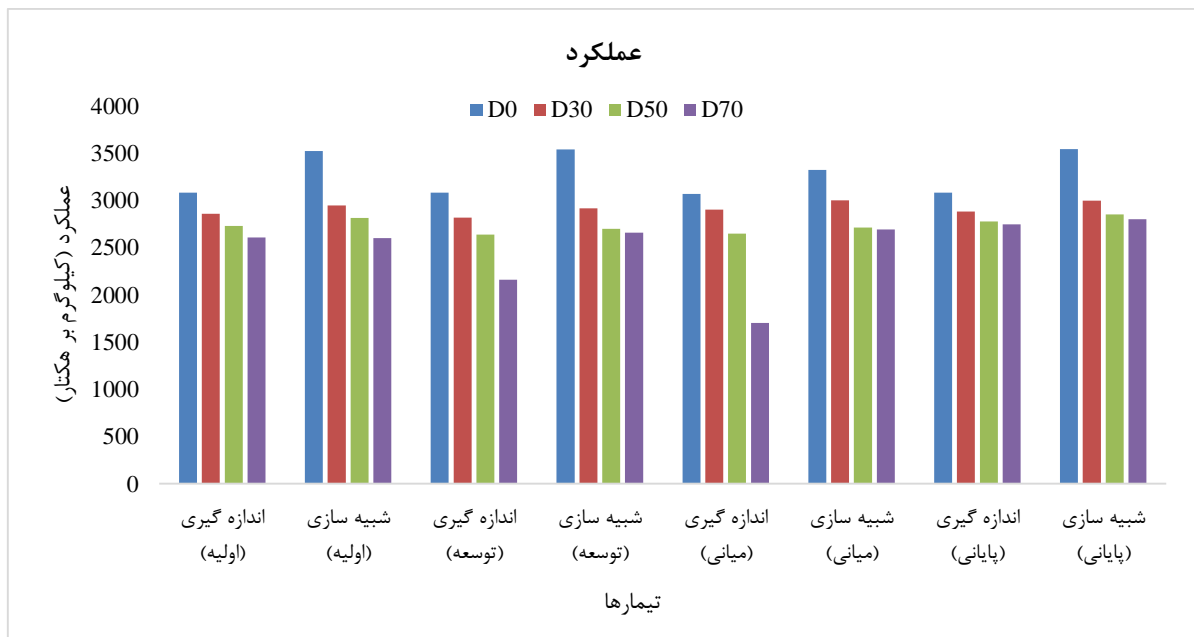
| نام تیمار | سال اول | | سال دوم | |
|-----------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) | عملکرد دانه (kg/ha) | بیومس (kg/ha) |
| F-30-1 | ۲۸۵۴ | ۲۸۴۲ | ۲۸۸۰ | ۲۹۱۰ |
| F-30-2 | ۲۹۲۰ | ۲۹۱۲ | ۲۹۰۰ | ۲۸۷۵ |
| F-30-3 | ۲۸۸۲ | ۲۷۸۲ | ۲۸۲۰ | ۲۸۱۴ |
| F-50-1 | ۲۷۴۰ | ۲۶۹۲ | ۲۷۶۰ | ۲۷۲۳ |
| F-50-2 | ۲۷۱۰ | ۲۶۴۱ | ۲۸۱۰ | ۲۶۷۸ |
| F-50-3 | ۲۷۹۲ | ۲۷۰۲ | ۲۷۷۶ | ۲۶۹۳ |
| F-70-1 | ۲۶۵۴ | ۲۶۸۰ | ۲۷۱۲ | ۲۶۵۰ |
| F-70-2 | ۲۷۱۲ | ۲۷۵۱ | ۲۷۰۰ | ۲۷۱۶ |
| F-70-3 | ۲۶۳۶ | ۲۷۴۲ | ۲۷۳۰ | ۲۶۸۸ |

شکل ۴ و ۵، نمودار مقدار آب مصرفی و بهره‌وری در دوره‌های رشد کینوا طی سال‌های اول و دوم را نشان می‌دهد.

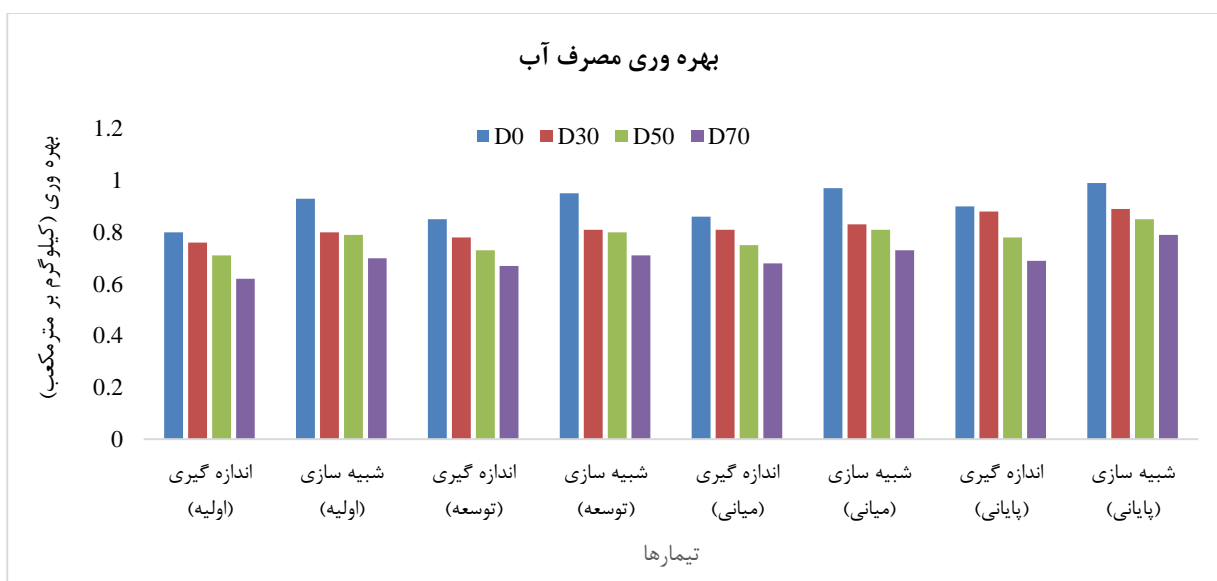
جدول ۸- عوامل گیاهی مورد استفاده برای مدل AquaCrop

| توضیح | واحد | مقدار | پارامتر |
|-------------|-----------------|-------|------------------------------------|
| پیش فرض | درجه سانتی‌گراد | صفر | دمای پایه |
| پیش فرض | درجه سانتی‌گراد | ۳۵ | دمای بالا |
| پیش فرض | درصد روز | ۸/۵ | ضریب رشد کانوبی |
| پیش فرض | سانتی‌متر مربع | ۵ | پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی |
| پیش فرض | متر | ۰/۳ | عمق موثر ریشه |
| اندازه‌گیری | روز | ۲۰ | مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی |
| اندازه‌گیری | روز | ۵۲ | مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی |
| اندازه‌گیری | روز | ۸۷ | مدت زمان کاشت تا دوره پیری |
| اندازه‌گیری | روز | ۱۰۰ | مدت زمان کاشت تا برداشت محصول |
| واسنجی | گرم بر مترمربع | ۱۳/۹ | بهره‌وری آب نرمال شده |
| واسنجی | درصد | ۱۰ | پوشش گیاهی اولیه |
| واسنجی | درصد | ۸۵ | بیشینه رشد کانوبی |
| واسنجی | - | ۰/۱۵ | حد بالای ضریب تخلیه آب خاک |
| واسنجی | - | ۰/۴۸ | حد پایین ضریب تخلیه آب خاک |
| واسنجی | درصد روز | ۹ | ضریب رشد پوشش |
| واسنجی | درصد روز | ۵ | ضریب کاهش پوشش |
| واسنجی | درصد روز | ۱/۲ | حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق |

شکل ۶ و ۷ نتایج مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب با استفاده از مدل AquaCrop در دوره صحت‌سنجی (سال دوم)، طی مراحل مختلف رشد کینوا (اولیه، توسعه، میانی و پایانی) با اعمال کم‌آبیاری (D0: آبیاری کامل، D30: ۳۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه، D50: ۵۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه و D70: ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه)، را نشان می‌دهد.

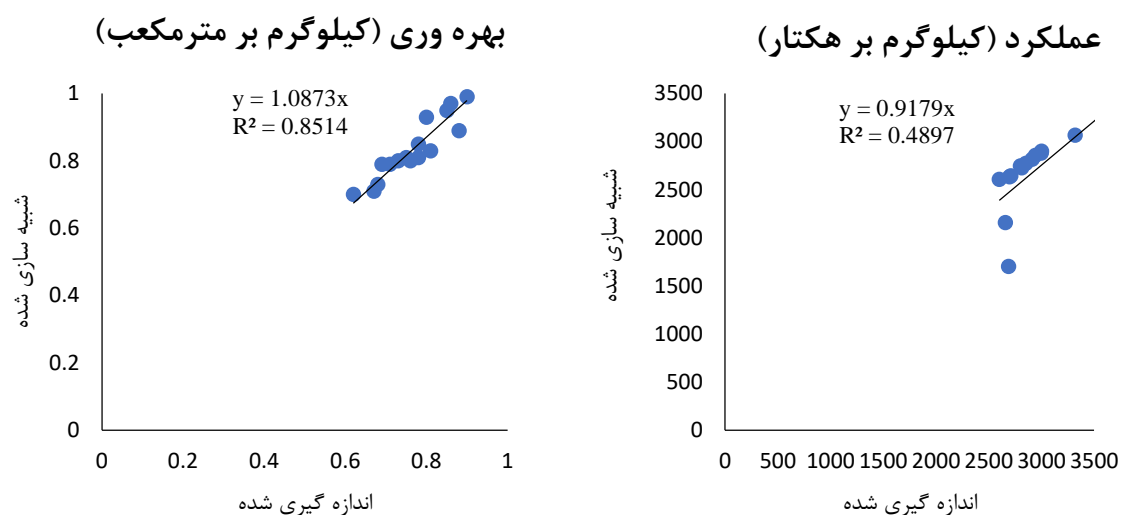


شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مقدار عملکرد کینوا با استفاده از مدل AquaCrop



شکل ۷- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مقدار بهره‌وری مصرف آب کینوا با استفاده از مدل AquaCrop

بیشترین و کمترین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا به ترتیب در تیمارهای آبیاری کامل و تیمار ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه، مشاهده شد. همچنین تنش آب به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در مراحل مختلف رشد کینوا منجر به کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شده است. شکل ۸، برازش منحنی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا را با استفاده از مدل AquaCrop نشان می‌دهد. همچنین جدول ۹، نتایج آنالیز آماری صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۸- برازش منحنی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا را با استفاده از مدل AquaCrop

جدول ۹- نتایج حاصل از آنالیز آماری صحت سنجی مدل AquaCrop

| پارامتر | RMSE | EF | d |
|------------------|------|------|------|
| عملکرد | ۰/۳۳ | ۰/۸۵ | ۰/۹ |
| بهره‌وری مصرف آب | ۰/۴ | ۰/۸۹ | ۰/۹۲ |

با توجه به نتایج حاصل از شکل ۸، مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده قرابت و همخوانی مناسبی را با یکدیگر داشته‌اند. همچنین آماره‌های محاسبه شده در جدول ۹ هم نشان دهنده کارایی و دقت بالای مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو پارامتر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نشان داد که دقت مدل AquaCrop برای مدل‌سازی بهره‌وری مصرف آب، بیشتر از عملکرد می‌باشد؛ به طوری که مقدار آماره‌های محاسبه شده RMSE کمتر و EF و d بیشترین مقدار را دارند.

نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب در پژوهش امداد و همکاران (۱۴۰۱)، که به بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد کینوا پرداختند طی مرحله واسنجی نشان داد، جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۴۸ و ۰/۱۳ و شاخص پایداری به ترتیب برابر ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۷۵ به دست آمده است. همچنین نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب در مرحله صحت سنجی حاکی از آنست که جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۳۷ و ۰/۰۵ و شاخص پایداری به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۰/۹ و ۰/۶۴ بود. همچنین Alvar-Beltrán و همکاران (۲۰۱۹)، به منظور پاسخ دو رقم کینوا (تی‌تی‌کاکا و نگراکالانا) به تاریخ‌های مختلف کشت (نوامبر و دسامبر)، سطوح مختلف آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل) و سطوح مختلف کود نیتروژن، تحقیقی را در بورکینافاسو انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که کیتنوا در شرایط تنش خشکی هم عملکرد بالایی داشت. Fghire و همکاران (۲۰۱۵)، طی پژوهشی که بر روی عملکرد کینوا در مراکش انجام دادند، اظهار کردند که تنش خشکی تأثیری در عملکرد این محصول نخواهد داشت.

نتیجه‌گیری

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و بررسی سیستم‌های کشاورزی بوده و از آن‌ها می‌توان به منظور شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط مختلف به خوبی استفاده کرد. با توجه به اینکه بررسی عوامل محدود کننده عملکرد نیاز به انجام تحقیقات و آزمایش‌های متعدد و هزینه‌بر در مناطق مختلف دارد، بنابراین یافتن راهی برای کاهش تعداد، زمان و هزینه انجام این آزمایش‌ها، مورد توجه می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا با استفاده از مدل AquaCrop در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. بدین منظور، کم‌آبیاری به صورت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده و سه مرحله رشد اولیه (I)، توسعه (D)، میانی (M) و پایانی (F) در نظر گرفته و شبیه‌سازی مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب، انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا به ترتیب در تیمارهای آبیاری کامل و تیمار ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده گیاه، مشاهده شد. همچنین تنش آب به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل استفاده در مراحل مختلف رشد کینوا منجر به کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شده است. همچنین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل AquaCrop قرابت و همخوانی مناسبی را با یکدیگر داشته‌اند. همچنین آماره‌های محاسبه شده بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده هم نشان دهنده کارایی و دقت بالای مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا می‌باشد.

منابع

ابراهیمی پاک، ن.ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ.، خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم‌آبیاری در دشت قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹ (۵): ۱۰۰۳-۱۰۱۵.

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

امداد، م.ر.، تافته، آ.، ابراهیمی پاک، ن.ع. ۱۴۰۱. کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری. *نشریه آب و خاک*، ۳۶ (۳): ۳۱۹-۳۳۱.

حیدری‌نیا، م. ۱۳۸۹. بررسی امکان کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت در شمال خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

گلایی، م.، لک، ش.، گیلانی، ع.، علوی فاضل، م.، اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کینوا تحت مدیریت‌های مختلف زراعی با استفاده از مدل AquaCrop. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۵ (۲): ۴۴۷-۴۶۴.

معروف نژاد، ع. و قاسمی، ش. ۱۳۹۶. روند تغییرات دما با استفاده از روش من-کندال (مطالعه موردی چهار شهرستان استان چهار محال و بختیاری). *فصلنامه آمایش محیط*، ۱۰ (۳۷): ۱۴۹-۱۶۶.

- Alvar-Beltrán, J., Saturnin, C., Dao, A., Dalla Marta, A., Sanou, J., Orlandini, S. 2019. Effect of drought and nitrogen fertilisation on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions in Burkina Faso. *Italian Journal of Agrometeorology*, (1): 33-43.
- Bois, J.F., Winkel, T., Lhomme, J.P., Raffaillac, J.P., Rocheteau. 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 25: 299-308.
- Box, J. E., Sletton, W. H., Kyle, J. H., Pope, A. 1963. Effects of soil moisture, temperature and fertiltig on yield and quality of irrigation Potatoes in Southern Plains. *Agronomy journal*, 55:492-494.
- Chumbe, R., Silva, S., Garcia, Y. 2023. Comparison of the machine learning and AquaCrop model for quinoa crops. *Research in Agricultural Engineering*, 69 (2): 65-75.
- English, M. J. 1995. Deficit irrigation. Analgtic frame work. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116 (3): 399-412.
- Ebrahimi Pak, N.A., Egder Nejad, A., Tafteh, A., Khodadadi Dehkordi, D. 2018. Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Canola (*Brassica napus*) Yield under Deficit Irrigation Scenarios in Gazvin Plain. *Soil and Water research*, 49 (5): 1003-1015 (In Persian).
- Ebrahimi Pak, N.A., Egder Nejad, A., Tafteh, A. Ahmadee, M. 2019. Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *Journal of Irrigation and Drainage*, 3 (13): 715-726 [In Persian].
- Emdad, M.R., Tafteh, A., Ebrahimi Pak, N.A. 2022. Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. *Water and Soil Journal*, 36 (3): 319-331.
- Fghire, R., Wahbi, S., Anaya, F., Issa Ali, O., Benlhabib, O., Ragab, R. 2015. Response of quinoa to different water management strategies: field experiments and SALTMED model application results. *Irrigation and drainage*, 64 (1): 29-40.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Mhizha, T., Vacher, J. 2009. Modelling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management*, 96: 1652-1658.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Mendoza, J., Huanca, R. 2008. Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research*, 108: 150-156.
- Golabi, M., Lak, SH., Gilani, A., Fazel, M., Egder Nejad, A. 2023. Simulation of the yield and biomass of quinoa under different agricultural management using the AquaCrop model. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 5 (2): 447-464 (In Persian).
- Heidari Nia, M. 2010. Investigating the possibility of using the AquaCrop model in corn irrigation planning in North Khuzestan. Master's thesis, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz(In Persian).

- Hoogenboom, G.J., White, J.W., Messina, C.D. 2004. From genome to crop: integration through simulation modelling. *Journal of Field Crop Resources*, 90: 145-163.
- Mousavizadeh, S. F., Honar, T., 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.
- Jacobsen, S.E., Mujica, A., Jensen, C.R. 2003. The Resistance of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to Adverse Abiotic Factors. *Food Reviews International*, 19: 99-109.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101: 426-437.
- Zeleeke, K., Luckett, D., Cowley, R. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal*, 103: 1610-1618.