Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

CC BY

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 319-331

Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements

M.R. Emdad[1*], A. Tafteh[2], N. Ebrahimipak[3]

Received: 10-04-2022
Revised: 25-04-2022
Accepted: 07-06-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
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): 319-331. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.75796.1149

Introduction

Quinoa (*Chenopodium quinoa*) is native plant in Bolivia, Chile and Peru, which is widely adapted to different climatic conditions and can grow in all soils. This plant has shown adequate adaptation to arid and semi-arid areas conditions and is planted from areas with low elevation (sea level) to areas with an altitude of 4000 meters above sea level. Quinoa is often cultivated in areas with limited water resources, and it is rare to find quinoa cultivation under full irrigation conditions. Some studies have shown that quinoa yields slightly better under full irrigation (without water restriction) than quinoa under deficit irrigation. Crop growth models are very important tools in the study of agricultural systems and they can be used to simulate the yield of crop in different conditions. Given that the study of performance limiting factors requires numerous and costly research and experiments in different areas, so finding a way to reduce the number, time and cost of these experiments is worthwhile. Aquacrop model is one of the applied models that are used to simulate yield variations in different water and soil management.

Materials and Methods

This investigation was carried out in two growing seasons of 2019 and 2020 to determine the efficiency of Aquacrop model for simulating Quinoa grain yield and biomass under imposing three stress treatments of 30, 50 and 70% of water consumption in development and mid-growth stages. Plant spacing was 40 cm between rows and 7 cm between plants within rows. Seeds of quinoa (Titicaca cultivar) were cultivated in the first decade of August 2019 and in the third decade of July 2020. The experiment was a randomized complete block design with three replications. Three deficit irrigation treatments including 30, 50 and 70% of available water were considered in two growth stages (development and mid-growth) in 18 experimental plots (3 × 4 m). Soil moisture in rooting depth (about 40 cm) was measured by TDR and after the soil moisture of the treatments reached the desired values, plots were irrigated until the soil moisture reached the field capacity. The results of grain and biomass yield in the first year were used to calibrate the Aquacrop model and the results of the second year were used to validate the model. Root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), Willmott index (D), model efficiency (EF) and mean error deviation (MBE) were used to compare the simulated and observed values.

Results and Discussion

The results of the first and second year were used to calibrate and validate the model, respectively. The results of the first year showed that irrigation with 50 and 70% of available water in the development stage reduced quinoa grain yield by 17 and 33%, respectively, compared to the control treatment. The application of these two deficit irrigation treatments in the middle stage reduced the yield by about 12 and 28%, respectively. The results of comparing the statistical indices of grain yield, biomass and water use efficiency showed that the NRMSE for grain, biomass and water use efficiency were 9, 8 and 14% in the first year and 9, 6 and 9% in the second years. Furthermore, the EF for these traits were 0.81, 0.77 and 0.64 in the first year and 0.68, 0.71 and 0.62, in the second

1, 2 and 3- Associate Professor, Assistant Professor and Associate Professor of Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: emdadmr591@yahoo.com)

year, respectively.

Conclusion

The results of calibration and validation of the model showed the accuracy and efficiency of the Aquacrop model in simulating grain yield, biomass and water use efficiency of quinoa. This model can be used to provide the most appropriate scenario and irrigation management for different levels of deficit irrigation managements.

Keywords: Evapotranspiration, Irrigation management, Plant modeling, Water stress, Water use efficiency

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص. ۳۳۱-۳۱۹

کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری

محمدرضا امداد[1*]- آرش تافته[2]- نیازعلی ابراهیمی پاک[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

چکیده

مدل آکواکراپ (Aquacrop) یکی از مدل‌های کاربردی بوده که به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات عملکرد در مدیریت‌های مختلف آب‌وخاک مورد استفاده واقع می‌شود. این پژوهش در دو سال زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ با هدف تعیین کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه کینوا با اعمال سه تیمار تنش ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد مصرف آب قابل‌استفاده در مراحل توسعه و میانی رشد اجرا گردید (در شرایط آب‌وخاک غیرشور). از نتایج سال اول به‌منظور واسنجی و از نتایج سال دوم به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. نتایج سال اول نشان داد که تنش ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه (کم‌آبیاری) در مرحله توسعه به ترتیب موجب کاهش عملکرد دانه به میزان ۱۷ و ۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون تنش) و هم‌چنین اعمال این تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد در حدود ۱۲ و ۲۸ درصد گردید. نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به‌ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به‌ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد. هم‌چنین نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم به‌ترتیب ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به‌ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین شد. 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.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، تنش آب، کارایی مصرف آب، مدل‌سازی گیاهی، مدیریت آبیاری

مقدمه

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و بررسی سیستم‌های کشاورزی بوده و از آن‌ها می‌توان به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط مختلف به‌خوبی استفاده کرد. با توجه به اینکه بررسی عوامل محدودکننده 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 شایان توجه می‌باشد. به دلیل این‌که فاکتورهای مؤثر بر سامانه تولید محصولات زراعی و ستاده‌های بخش کشاورزی متعدد بوده، لذا استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصولات گامی اساسی و مؤثر در امر مدیریت و تصمیم‌گیری می‌باشد.

گیاه کینوا (Quinoa) بومی مناطق بولیوی، شیلی و پرو است که سازگاری گسترده‌ای با شرایط مختلف آب و هوایی داشته و قابلیت رشد در کلیه خاک‌ها را دارد (Mamedi *et al.*, 2017). این گیاه سازگاری مناسبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته و از مناطقی با ارتفاع کم (سطح دریا) تا مناطقی با ارتفاع ۴۰۰۰ متر از سطح دریا کاشته می‌شود. کینوا را می‌توان در تناوب با گیاهان سیب‌زمینی، جو و در برخی از اوقات با گندم و ذرت در مناطق کم‌ارتفاع کاشت (Christiansen *et al.*, 2010). توسعه مراحل فنولوژیکی وابسته به رقم کینوا بوده و تنش آب بر آن تأثیرگذار است (Geerts *et al.*, 2008a). کارایی مصرف آب کینوا در شرایط 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.*, 2008b). کینوا

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشیار، استادیار و دانشیار بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: emdadmr591@yahoo.com)

DOI: 10.22067/JSW.2022.75796.1149

گیاهی مقاوم به تنش آبی بوده و تنش آب در مراحل اولیه سبزینه‌ای موجب طولانی‌تر شدن دوره رشد گیاه شده تا گیاه بتواند کاهش رشد خود را در صورت تأمین آب جبران نماید (Jacobsen *et al.*,2003).

رقم‌های مختلف کینوا مقاومت‌های مختلفی نسبت به تنش آب از خود نشان می‌دهند (Bois *et al.*, 2006). غالب کشت کینوا در مناطقی انجام می‌شود که با محدودیت منابع آب مواجه باشند و به‌ندرت کشت کینوایی می‌توان یافت که در شرایط آبیاری کامل باشد (Oelke *et al.*, 1992). برخی تحقیقات نشان داده که عملکرد کینوا در شرایط آبیاری کامل(بدون محدودیت آب) اندکی بیشتر از کینوایی است که در شرایط کم‌آبیاری قرار داشته است (Geerts *et al.*, 2008b). کینوا در مقایسه با ذرت، برنج و یا حتی گندم از ارزش غذایی بالایی (پروتئین تا ۲۰ درصد) برخوردار است (Alvarez *et al.*,2009). کینوا یک گیاه امیدبخش برای تأمین کالری موردنیاز از طریق کشت در اراضی کم بازده و باکیفیت آب پایین (با هدایت الکتریکی زیاد) می‌باشد .اگرچه عملکرد بالا (حدود ۴/۵ تن در هکتار) برای رقم‌های کینوا در شرایط مناسب آبیاری و حاصلخیزی (بدون تنش) گزارش گردیده ولی عملکرد این گیاه در شرایط دیم به‌طور متوسط به حدود ۰/۸۵ تن در هکتار کاهش می‌یابد. همچنین شاخص برداشت کینوا در حدود ۰/۳ تا ۰/۵ گزارش‌شده است (Steduto *et al.*, 2012). در شرایط بدون تنش وزن هزار دانه کینوا در محدوده ۲/۱ تا ۶ گرم تغییر می‌کند (Rojas., 2003). بر اساس رقم‌های مختلف طول دوره از زمان ظهور تا رسیدگی فیزیولوژیکی بین ۱۰۰ تا ۲۳۰ روز و تنش آب موجب کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع گیاه و نیز کاهش ۱۸ درصد عملکرد شده است (Mamedi *et al.*, 2017). کینوا گیاهی سه کربنه و بدون گلوتن می‌باشد و جزو گیاهان دارویی و ارزشمند ازنظر غذایی قلمداد می‌گردد (Jamali *et al.*, 2016). با توجه به اهمیت کینوا و ارزش غذایی آن و نیز نقش آن در امنیت غذایی، سال ۲۰۱۳ به نام سال کینوا معرفی‌شده است (Choukr-Allah *et al.*, 2016).

محققین روش‌های مختلف کم‌آبیاری را بر کینوا بررسی و گزارش نمودند که در شرایط آبیاری کامل عملکرد دانه کینوا حدود ۳ تن بر هکتار بوده که در شرایط کم‌آبیاری به میزان ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل، مقادیر عملکرد دانه به ترتیب به حدود ۲/۹ و ۲/۴ تن در هکتار کاهش پیداکرده است (Colak *et al.*, 2021). کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری بر اساس ۵۰ درصد آبیاری کامل ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که در آبیاری کامل به میزان ۱۷ درصد نسبت به تیمار کم‌آبیاری کاهش‌یافته است. شرایط تنش خشکی در مراحل فنولوژیکی گلدهی و پس‌ازآن تأثیر منفی بر عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا داشته و باعث کاهش عملکرد می‌گردد (Geerts *et al.*, 2009 ; Steduto *et al.*, 2012). مقادیر کارایی مصرف آب کینوا در ترکیه بین ۰/۴۸ تا ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب و وزن هزار دانه کینوا را در شرایط دیم حدود ۳ تا ۳/۳ گرم گزارش‌شده است (Bazile *et al.*, 2015).

همچنین مقادیر عملکرد دانه کینوا را در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری (به میزان ۵۰ درصد آبیاری کامل) را به ترتیب ۲/۱ و ۱/۷ تن در هکتار و کارایی مصرف آب را در تیمار کم‌آبیاری به میزان ۰/۸۴ کیلوگرم بر متر مکعب (مقدار آن در شرایط آبیاری کامل ۰/۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب) گزارش کردند (Lavini *et al.*, 2014).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) در سال ۲۰۱۲ توسعه یافته است. این مدل در مقایسه با مدل‌های WOFOST وCropSyst، به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر برتری دارد. علاوه بر کاربرپسندی این مدل، به توانایی و دقت قابل‌قبول آن در شبیه‌سازی عملکرد محدوده وسیعی از محصولات مختلف زراعی می‌توان اشاره کرد (Heng *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2012). بیتری و همکاران (Bitri *et al.*, 2014)، به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی با مدل AquaCrop تحت دو شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل رطوبت ناحیه ریشه، زیست‌توده و عملکرد سیب‌زمینی را با این مدل شبیه‌سازی کردند. میانگین مربعات خطای نرمال شده در پارامترهای مذکور کمتر از ۵ درصد گزارش گردید. به‌منظور ارزیابی و آنالیز حساسیت مدل AquaCrop در سال زراعی ۱۳۷۸ (خاک لومی) در منطقه کرج روی گیاه سویا، تحقیقی با ۴ تیمار آبیاری کامل، کم‌آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبتی خاک و آبیاری موضعی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد انجام شد. نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب سویا، عملکرد قابل قبولی با خطای کمتر از ۴/۶ درصد داشته است (Babazadeh and Sarai., 2012).

با توجه به ارزش غذایی کینوا و تطابق کشت این گیاه در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز محدودیت منابع آب و نظر به اینکه کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری و کم‌آبیاری مشخص نگردیده، لذا در این تحقیق واکنش گیاه کینوا به کم‌آبی در مراحل مختلف رشد بررسی و کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری تعیین و ارزیابی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور تأثیر مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد کینوا و کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا در شرایط تنش آبی در ایستگاه تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب (کرج) به عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۳۵/۷۶ و ۵۰/۹۶ درجه و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا در دو سال زراعی (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) انجام شد (شکل ۱).

شکل ۱- نمایی از مزرعه تحقیقاتی کینوا
Figure 1- View of Quinoa research farm

فاصله ردیف‌های کشت ۴۰ سانتی‌متر و فواصل بوته‌ها ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (۴۵ بوته در متر مربع). در سال اول، کشت کینوا (رقم تی‌تی‌کاکا) در دهه اول مرداد ۱۳۹۸ و در سال دوم در دهه سوم تیرماه ۱۳۹۹ انجام شد. در این خصوص ۳ تیمار آبی به‌صورت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده در سه تکرار و ۲ مرحله رشد (مرحله توسعه و میانی) در ۱۸ کرت آزمایشی (به ابعاد ۳ در ۴ متر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال زراعی اجرا شد (تیمار تخلیه رطوبتی بر اساس ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در مرحله توسعه به ترتیب با T1، T2 و T3 و در مرحله میانی با T4، T5 و T6 مشخص شدند). در سایر مراحل، آبیاری بر اساس تخلیه ۳۰ درصد آب قابل‌استفاده در نظر گرفته شد و حجم آب آبیاری بر این اساس برای تیمارها اعمال گردید. رطوبت تا عمق توسعه ریشه (حدود ۴۰ سانتی‌متری) با دستگاهTDR مدل ترایم که برای بافت خاک واسنجی شده بود، اندازه‌گیری و پس از رسیدن رطوبت خاک تیمارها به مقادیر موردنظر، آبیاری قطعات با رساندن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی انجام شد. حجم آب آبیاری هر یک از کرت‌های آزمایشی بر اساس سطح کرت و عمق آب موردنیاز محاسبه و پس از اندازه‌گیری به تیمارها داده شد. پس از برداشت و تجزیه‌وتحلیل، نتایج عملکرد دانه و زیست‌توده در سال اول به‌منظور واسنجی مدل و از نتایج سال دوم برای اعتبارسنجی مدل اکواکراپ استفاده گردید (برداشت در سال اول و دوم به ترتیب در تاریخ‌های ۹۸/۸/۱۱ و ۹۹/۷/۲۵ انجام شد). همچنین با توجه به عملکرد کینوا در کرت‌های موردنظر، کارایی مصرف آب تیمارها تعیین و مورد تجزیه‌وتحلیل واقع شدند. از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص ویلموت (D)، کارایی مدل (EF) و میانگین انحراف خطا (MBE) به‌منظور مقایسه نتایج آماری استفاده گردید.

در راستای استفاده از مدل، از آمار و اطلاعات روزانه هواشناسی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارندگی در دوره‌های مذکور (سال‌های ۹۸ و ۹۹) به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق مرجع استفاده گردید. همچنین با شناسایی مراحل فنولوژیکی گیاه و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به همراه مدیریت آبیاری و سایر اطلاعات موردنیاز نسبت به شبیه‌سازی عملکرد اقدام گردید.

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ و برخی از ویژگی‌های کیفی آب آبیاری مزرعه کینوا در جدول ۲ ارائه‌شده است. دوره‌های فنولوژی رشد کینوا (مراحل چهارگانه) در جدول ۳ ارائه گردیده است. به‌طور کلی دوره رشد اولیه ۲۰ روز، دوره توسعه ۳۰ روز، دوره میانی ۲۸ روز و دوره پایانی در حدود ۱۲ روز اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه
Table 1- Some physical and chemicals soil characteristics on farm

عمق خاک Soil depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture	FC	PWP	pH	EC	OC	P	K	Mg	Fe
cm	%	%	%	-	%	%	-	dS/m	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
0-30	46	30	24	Loam	27	14	7.8	1.2	0.48	15.6	222	206	4.38
30-60	45	33	22	Loam	25	12	7.5	1.2	0.5	15.5	210	205	4.50

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی آب آبیاری

Table 2- Quality characteristics of irrigation water

EC	SAR	pH	Ca	Mg	Na	Cl	HCO_3
dS/m	-	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
0.39	0.44	7.5	55.2	4.9	12.6	13.5	116

جدول ۳- دوره‌های فنولوژی رشد کینوا

Table 3- Quinoa growth phenology stages

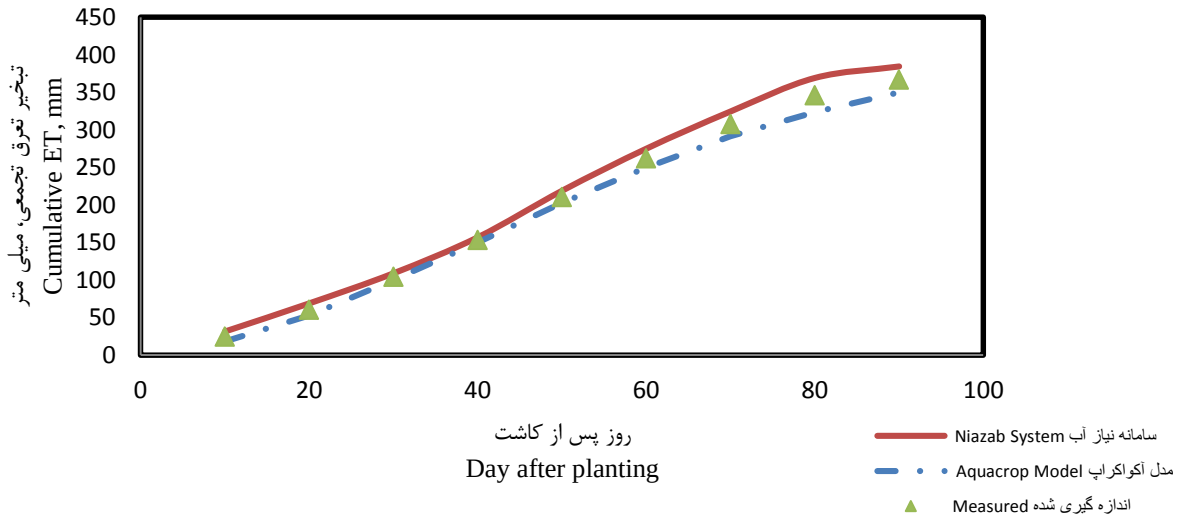
	نام دوره Stage name	اولیه Initial	توسعه Development	میانی Mid	پایانی Final	کل Total
سال اول First Year	تعداد روز Day	20	30	25	15	90
سال دوم Second year	تعداد روز Day	20	30	30	10	90

تعداد روز از کاشت تا سبز شدن بذر کینوا حدود ۷ تا ۱۰ روز، تعداد روز از کاشت تا گلدهی حدود ۵۰ روز، تعداد روز از کاشت تا رسیدن حدود ۸۰ روز، تعداد روز از کاشت تا حداکثر پوشش گیاهی حدود ۵۵ تا ۶۰ روز و حداکثر رشد ریشه در حدود ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

از آمار و اطلاعات روزانه هواشناسی در راستای تعیین تبخیر و تعرق مرجع استفاده و سپس تبخیر و تعرق گیاه کینوا تعیین گردید. شکل ۲ مقادیر تبخیر و تعرق گیاه کینوا اندازه‌گیری شده در سال اول را با مقادیر به‌دست‌آمده با مدل آکواکراپ (از مدل فائو پنمن مانتیث و با استفاده از داده‌های هواشناسی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، بارندگی و سرعت باد) و سامانه نیاز آب (سامانه تعیین نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور) در فصل کشت زراعی مقایسه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد نیاز آبی گیاه کینوا در طول دوره رشد ۱۰۰ روزه حدود ۳۶۰ تا ۳۸۰ میلی‌متر تعیین گردید.

جدول ۴ شاخص‌های آماری مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده را با مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب ارائه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب به ترتیب ۹ و ۶ درصد و همچنین کارایی مدل (ET) برای مدل و سامانه حدود ۰/۹۸ بوده که بیانگر دقت و همخوانی نتایج مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه کینوا می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه تغییرات نیاز آبی گیاه کینوا اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد با نتایج مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب

Figure 2- Comparison of changes in measured water requirement of quinoa plant during growth period with the results of Aquacrop model and NIAZAB

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های آماری تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با مدل و سامانه نیازآب

Table 4- Comparison of statistical indices of measured evapotranspiration with the model and NIAZAB

مدل Model	MBE	RMSE	NRMSE	D	EF
آکواکراپ Aquacrop	-10.60	19.58	0.09	0.96	0.97
سامانه نیاز آب NIAZAB	5.48	6.26	0.06	0.96	0.98

مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد، زیست‌توده، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب کینوا در سال اول در تیمارهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری در جدول ۵ ارائه گردیده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در تیمار ۵۰ و ۷۰ درصد تنش در مرحله توسعه، مقدار عملکرد به میزان به ترتیب ۱۷ و ۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (۳۰ درصد تنش در مرحله توسعه) کاهش داشته است. هم‌چنین مقادیر عملکرد حاصله در تیمار ۵۰ و ۷۰ درصد تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد به ترتیب به میزان ۱۲ و ۲۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (۳۰ درصد تنش در مرحله میانی) داشته است. مقادیر کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشته و در محدوده ۱/۱ تا ۱/۳ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب بوده و بیانگر مقاوم بودن نسبی گیاه کینوا نسبت به تنش آب در این مراحل می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر تنش شدید آب (۷۰ درصد کاهش مصرف آب) در مرحله توسعه و میانی باعث کاهش عملکرد دانه کینوا به ترتیب به حدود ۳۳ و ۲۸ درصد شده است.

هم‌چنین جدول ۶ مقادیر عملکرد، زیست‌توده، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب گیاه کینوا را در سال دوم (۱۳۹۹) ارائه می‌کند. تنش آب به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده در مرحله توسعه موجب کاهش عملکرد دانه کینوا به میزان ۱۹ و ۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد شده است. از طرف دیگر افزایش تنش به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد مصرف آب قابل‌استفاده در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد دانه کینوا به ترتیب به میزان ۱۲ و ۱۹ نسبت به تیمار شاهد شده است. نتایج مشابهی از مقادیر کارایی مصرف آب تیمارها در سال دوم نسبت به سال اول حاصل گردیده و محدوده تغییرات کارایی مصرف آب در حدود ۱/۱ تا ۱/۲ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب کینوا در سال اول

Table 5- Measured yield, evapotranspiration and water use efficiency of quinoa in the first year

تیمار Treatment	عملکرد Yield t/ha	زیست‌توده Biomass t/ha	تبخیروتعرق ET (mm)	کارایی مصرف آب WUE kg/m^3 (ET)
T1	3.63	8.06	320	1.1
T2	3	6.83	250	1.2
T3	2.42	5.77	220	1.1
T4	3.63	7.28	300	1.2
T5	3.2	6.75	250	1.3
T6	2.6	5.94	200	1.3

جدول ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب کینوا در سال دوم

Table 6- Measured yield, evapotranspiration and water use efficiency of quinoa in the second year

تیمار Treatment	عملکرد Yield t/ha	زیست‌توده Biomass t/ha	تبخیروتعرق ET (mm)	کارایی مصرف آب WUE kg/m^3 (ET)
T1	3.79	7.24	345	1.1
T2	3.07	5.94	268	1.1
T3	2.56	5.83	240	1.1
T4	3.20	7.24	295	1.1
T5	2.81	6.53	265	1.1
T6	2.58	5.89	214	1.2

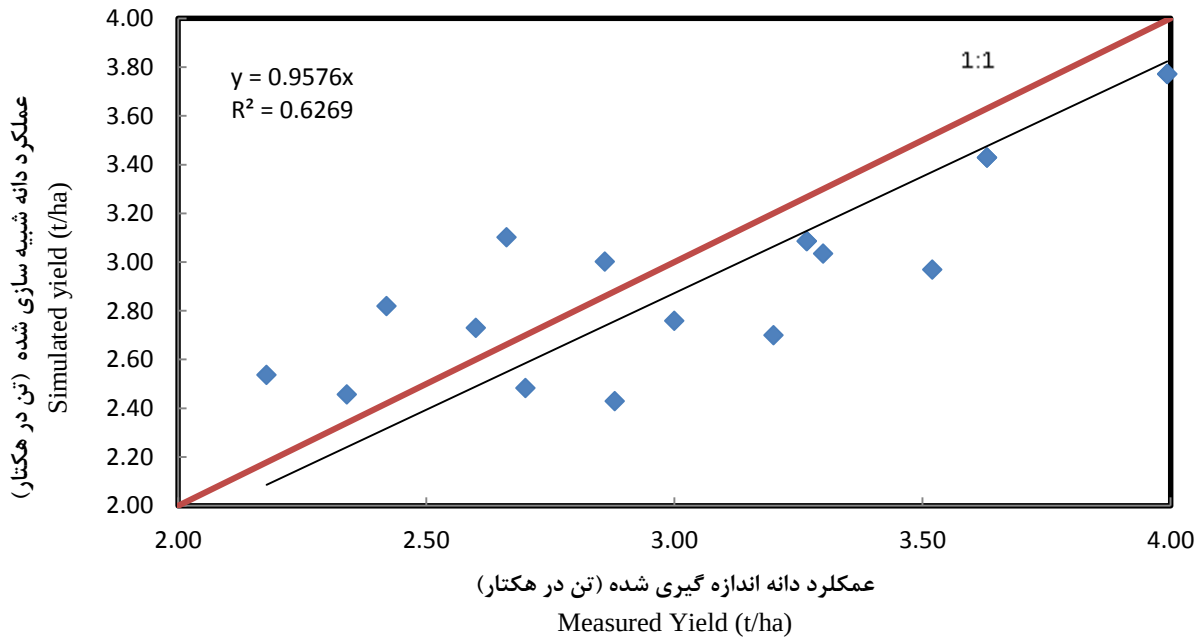
شکل ۳ و شکل ۴ مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را در راستای واسنجی مدل در سال اول ارائه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر عملکرد و زیست‌توده اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده قرابت و همخوانی مناسبی را با یکدیگر داشته و از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردارند (R=0.82). مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب قرابت و همخوانی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده داشته و حاکی از دقت مناسب این مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشد (R=0.80). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد که نشانگر کارایی و دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب می‌باشد (جدول ۷).

شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب نتایج مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و زیست‌توده را در سال دوم که در راستای اعتبارسنجی انجام شده است را با یکدیگر مقایسه می‌کند. مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردار بوده و بیانگر همخوانی و کارایی مناسب این مدل در شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا می‌باشد (ضریب همبستگی برای عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۹۱ می‌باشد).

جدول ۷- نتایج آنالیز آماری واسنجی مدل در سال اول

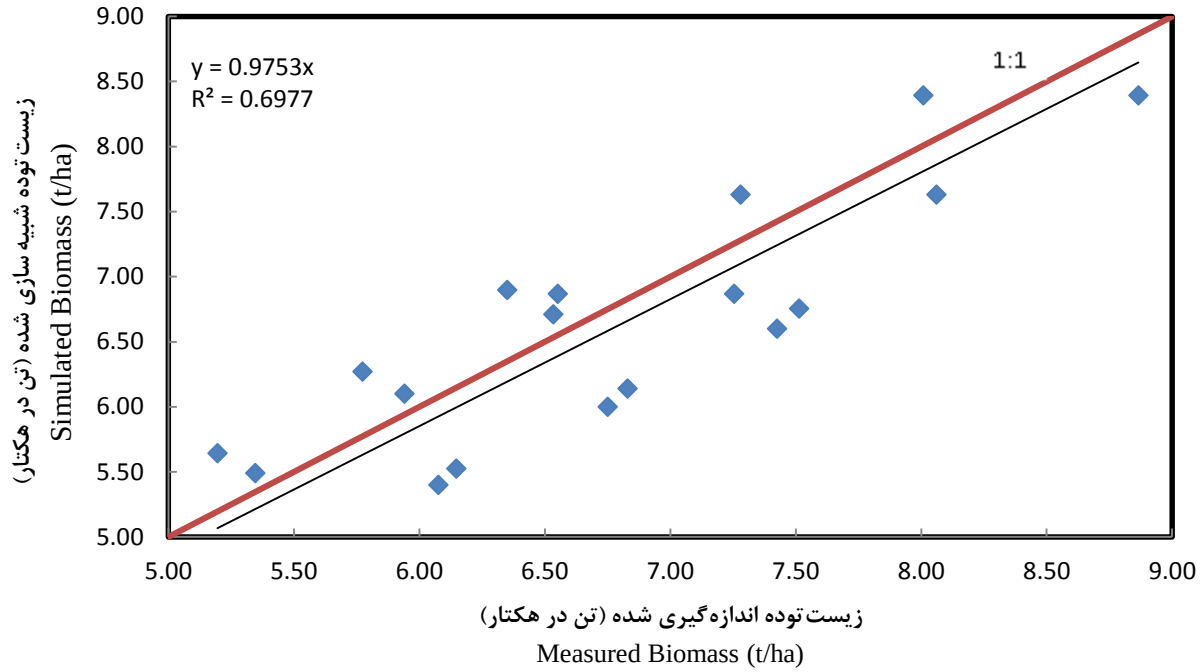
Table 7- Results of statistical analysis of model calibration in the first year

	MBE	RMSE	NRMSE	d	EF
عملکرد دانه Seed yield	0.11	0.27	0.09	0.88	0.81
زیست‌توده Biomass	0.14	0.48	0.08	0.86	0.77
کارایی مصرف آب WUE	0.03	0.13	0.14	0.75	0.64



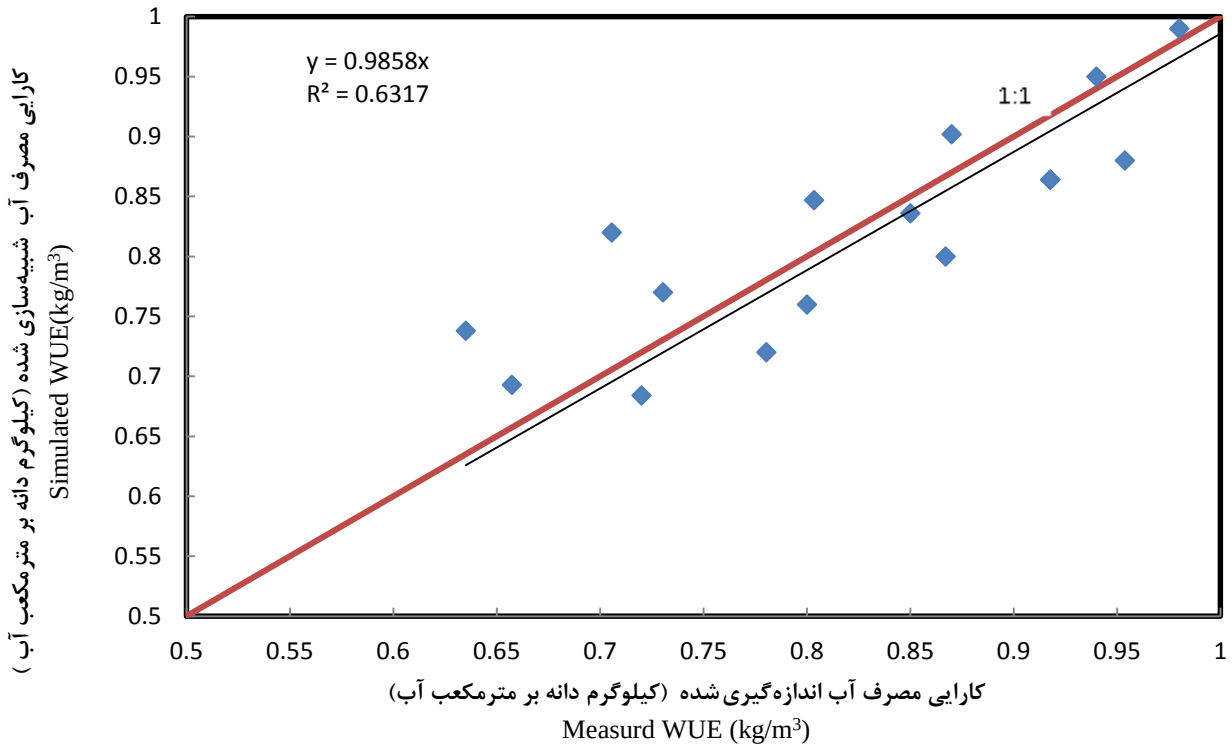
شکل ۳- مقایسه عملکرد دانه کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 3- Comparison of measured and simulated quinoa seed yield (first year)



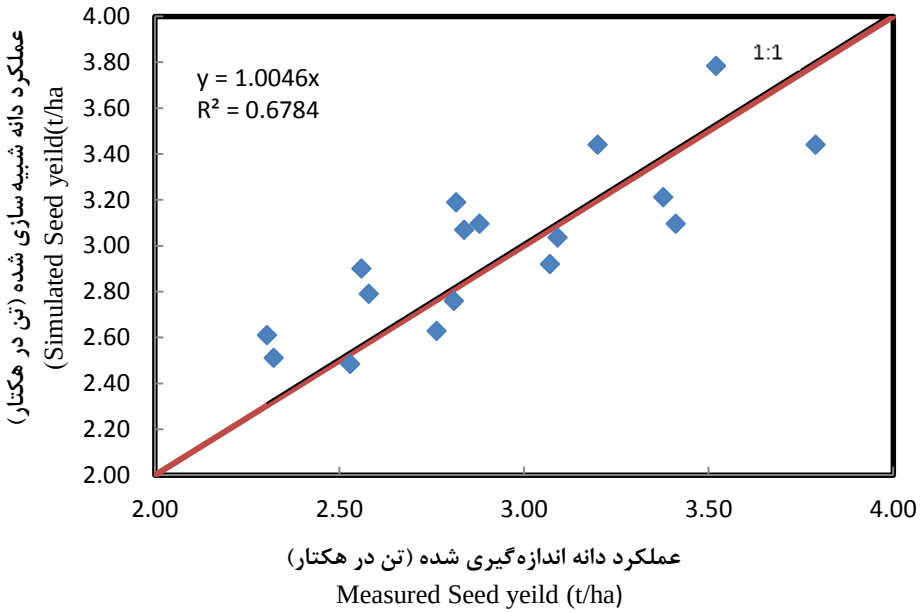
شکل ۴- مقایسه زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 4- Comparison of measured and simulated quinoa biomass (first year)



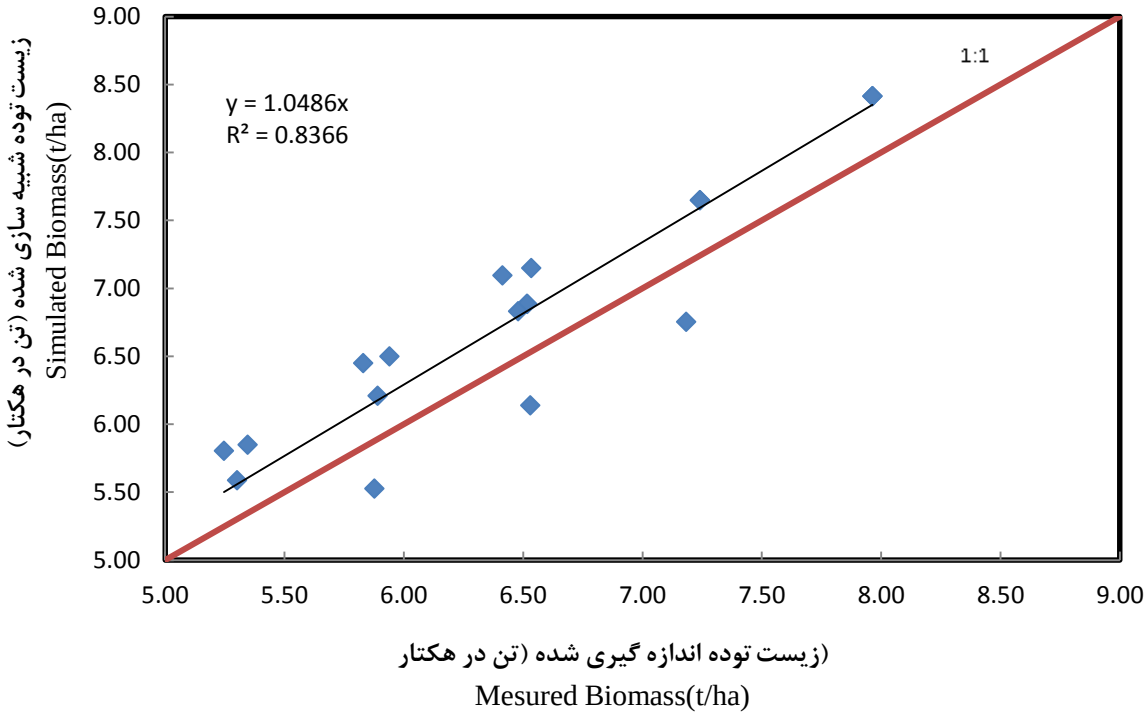
شکل ۵- مقایسه کارایی مصرف آب کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 5- Comparison of measured and simulated water use efficiency of quinoa (first year)



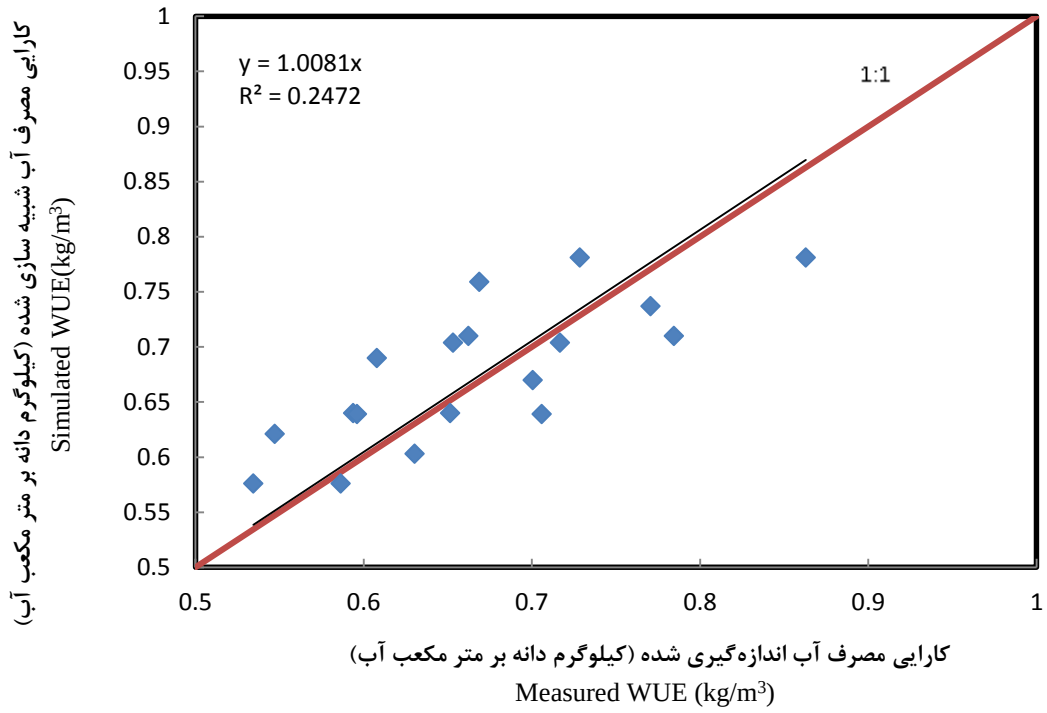
شکل ۶- مقایسه عملکرد دانه کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 6- Comparison of measured and simulated quinoa grain yield (second year)



شکل ۷- مقایسه زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 7- Comparison of measured and simulated quinoa biomass (second year)



شکل ۸- مقایسه کارایی مصرف آب کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 8- Comparison of quinoa measured and simulated water use efficiency (second year)

جدول ۸- نتایج آنالیز آماری ارزیابی مدل در سال دوم

Table 8- Results of statistical analysis of model evaluation in the second year

	MBE	RMSE	NRMSE	D	EF
عملکرد دانه Seed yield	0.04	0.27	0.09	0.83	0.68
زیست‌توده Biomass	0.32	0.37	0.06	0.90	0.71
کارایی مصرف آب WUE	0.03	0.05	0.09	0.64	0.62

همچنین مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در سال دوم (شکل ۸) نشان می‌دهد که نقاط موردنظر از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردارند و نشانگر کارایی و دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشد (R=0.70).

به‌طور کلی نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب حدود ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین‌شده که نشانگر دقت و کارایی مناسب مدل در برآورد عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب می‌باشد (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

با توجه به ارزش غذایی کینوا و تطابق کشت این گیاه در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز محدودیت منابع آب و نظر به اینکه کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری و کم‌آبیاری مشخص نگردیده، لذا در این تحقیق واکنش گیاه کینوا به کم‌آبی در مراحل مختلف رشد بررسی و کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری تعیین و ارزیابی گردید. نتایج سال اول نشان داد که تنش

۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه در مرحله توسعه به ترتیب موجب کاهش عملکرد دانه به میزان ۱۷ و ۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد و هم‌چنین اعمال این تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد در حدود ۱۲ و ۲۸ درصد گردید. همچنین مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد. از طرف دیگر نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم به ترتیب ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا می‌باشد. بنابراین می‌توان از این مدل به‌منظور ارائه مناسب‌ترین سناریو و مدیریت آبیاری گیاه کینوا در حالت‌های مختلف تنش و کم‌آبیاری استفاده و مناسب‌ترین مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کینوا را در راستای ارتقا کارایی مصرف آب توصیه نمود.

منابع

1- Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., and Gallagher E. 2009. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. Trends in Food Science & Technology 21: 106-113. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014.

2- Babazadeh H., and Sarai Tabrizi M. 2012. Evaluation of AquaCrop model under soybean irrigation management conditions. Water and Soil 26(2). https: //doi: 10.22067 / jsw.v0i0.14156.

3- Bazile D, Bertero D., and Nieto C. 2015. State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & CIRAD (Centre de coopération international).

4- Bitri M., Grazhdani S., and Ahmeti A. 2014. Validation of the Aqua Crop Model for full and deficit Irrigation potato production in environmental conditions of korca zone, south-eastern Albania. International Journal of Innovative Reaserch in Science, Engineering and Technology 3(5): 12013-12020.

5- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffaillac J.P., and Rocheteau A. 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. https: //doi:10.1016/j.eja.2006.06.007.

6- Christiansen J.L., Jacobsen S.-E., and Jŕgensen S.T. 2010. Photoperiodic effect on flowering and seed development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science 1-6. https://doi.org/10.1080/09064710903295184.

7- Choukr-Allah R., Rao NK., Hirich A., Shahid M., Alshankiti A., Toderich K., Gill S., and Ur Rahman Butt K. 2016. Quinoa for marginal environments: toward Future Food and Nutritional Security in MENA and Central Asia Regions. Frontiers in Plant Science 7: 346. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00346.

8- Colak Y., Bozkurt A., Yazar A., Alghory and Tekin S. 2021. Yield and water productivity response of quinoa to various deficit irrigation regimes applied with surface and subsurface drip systems. The Journal of Agricultural Science. https://doi.org/10.1017/S0021859621000265. 1–12.

9- Geerts S., Raes D., Garcia M., Vacher J., Mamani R., Mendoza J., Huanca R., Morales B., Miranda R., Cusicanqui J. and Taboada C. 2008a. Introducing deficit irrigation to stablize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). European Journal of Agronomy 28: 427-436. https://doi:10.1016/j.agwat.2008.02.012.

10-Geerts S., Raes D., Garcia M., Condori O., Mamani J., Miranda R., Cusicanqui J., Taboada C., and Vacher J. 2008b. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano. Agricultural Water Management 95: 909-917. https:// doi:10.1016/j.fcr.2008.04.008.

11-Geerts S., Raes D., Garcia M., Mendoza J., and Huanca R. 2008c. Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. Field Crops Research 108: 150-156. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.020.

12-Geerts S., Raes D., Garcia M., Taboada C., Miranda R., Cusicanqui J., Mhizha T., and 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. https://doi:10.2134/agronj2008.0029xs.

13-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: 488–498. https://doi.org/10.1081/FRI-120018872.

14-Jacobsen S.E., Mujica A., and Jensen C.R. 2003. The Resistance of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to Adverse Abiotic Factors. Food Reviews International 19: 99-109.

15-Jamali S., Sharifan H., Hezarjaribi A., and Sepahvand N. 2016. The effect of different levels of salinity on germination and growth indices of two cultivars of Quinoa. Journal of Water and Soil Resources Conservation 6(1): 87-98. https://doi: 10.1111/jac.12069.

16-Lavini A., Pulvento C., d'Andria R., Riccardi M., Choukr-Allah R., Belhabib O., Yazar A., Ince Kaya Ç., Sezen SM.,

Qadir M., and Jacobsen SE. 2014 Quinoa's potential in the Mediterranean Region. Journal of Agronomy and Crop Science 200: 344–360. https://doi: 10.22059/ijfcs.2017.128439.653907.

17-Mamedi A., Tavakkol Afshari R., and Sepahvand N. 2017. Quantifying seed germination response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under temperature and drought stress regimes. Iranian Journal of Field Crop Science 48(3): 615-623. https://doi: 10.22059/ijfcs.2017.128439.653907.

18-Oelke E.A., Putnam D.H., Teynor D.M., and Oplinger E.S. 1992. Alternative field crops manual–quinoa. USA, University of Purdue. https://doi.org/10.1081/FRI-120018864.

19-Rojas W. 2003. Multivariate Analysis of Genetic Diversity of Bolivian Quinoa Germplasm. Food Reviews International 19: 9-23.

20-Raes D., Steduto P., Hsiao TC., and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.

21-Steduto P., Hsiao C., Hereres E., And Raes D. 2012. Crop yield response to water. FAO irrigation and drainage, No, 66.

22-Yazar A., Sezen SM., Bozkurt Çolak Y., Ince Kaya and Tekin S. 2017. Effect of planting times and saline irrigation of quinoa using drainage water on yield and yield components under the Mediterranean environmental contitions. International Journal of Research in Agriculture and Forestry 4: 8–16.