



Evaluating the efficiency of AquaCrop model for Corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city)

Saeed Pooladgar¹ , Javanshir Azizi Mobaser^{2✉} , Javad Ramazani Moghadam³ , Ali Asghari⁴

¹ M.Sc. Graduated in irrigation and drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: saeed_pooladgar@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate Professor. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ja.mobaser22@gmail.com

³ Assistant Professor. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: J_ramezani@uma.ac.ir

⁴ Professor. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ali_asghari@yahoo.com

ABSTRACT

Introduction

The ever-expanding management needs have led to computer models play important role in modern agricultural management. The Aqua Crop model is one of these models, which is designed to simulate crop performance by the Food and Agriculture Organization (FAO), taken from the review articles of the Journal of Irrigation and Drainage No. 33, prepared by Dornbas and Kasam (1979). Was, expanded, and developed. Among the specifications of the Aqua Crop model in comparison with similar models, we can mention its simplicity, high capability, and good accuracy.

Methodology

This research was conducted in Bilal village of Shush city of Khuzestan Province in 2014. The climate of the region is hot and dry and the annual rainfall is about 250 mm. The main cultivation of this city is Corn. Regarding the importance of this product in the city of Shush, we can be content with the fact that in 1394, it has been the first place in Corn production in the province. This research is in the form of split plots with the main treatment of Urea fertilizer (including 100, 80, and 50% of the fertilizer required for Corn (N0, N1, and N2)) and sub-treatment of irrigation water (including irrigation of 100, 80 and 50% of water requirement) with four replications. According to the results, the model had the highest sensitivity to the two parameters of flowering and seed pod filling periods. Also, in model calibration to simulate Corn yield, normalized water productivity (WP) and canopy growth coefficient (CGC) values of 31 (g / m²) and 24.2% were obtained, respectively.

Results and discussion

Flowering time and pod filling time were the most sensitive parameters of the model (with moderate-high sensitivity). Therefore, more care should be taken in measuring these parameters, because otherwise, the model simulation error may increase sharply. Also, the model had no sensitivity to the time of germination of seeds. The statistical results show that the best simulation occurred in the N0E1 treatment with the least stress. As the stress increased, the simulation and observation values became more different. In treatments where 50% fertilizer stress was applied, the simulation values are very different from the observed values. Simulation is not appropriate in these treatments and the Aqua Crop model has not been able to predict product performance under these stresses.

Conclusions

According to the results of this study, the best and weakest Corn yield simulations were related to N0E1 and N2E0 treatments, respectively. The results also showed the accuracy of performance simulation in N0E1 treatment, based on CE, RMSE, d, ME, and CRM statistical indices which are -0.2, 0.32, 0.73, 3.37, and 0.01 respectively, was higher than in other treatments. Therefore, the Aqua Crop model has a more suitable simulation when water and fertilizer stresses are low. In general, according to the results of this study, the efficiency of the Aqua Crop model for grain Corn cultivation in Shush city was considered appropriate and this model can be used to manage water in Corn fields.

Keywords: Corn, simulation, urea fertilizer, water management.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 09 February 2022 Revised: 28 April 2022 Accepted: 16 May 2022 published: 29 May 2022

Cite this article: Pooladgar, S., Azizi Mobaser, J., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the efficiency of AquaCrop model for Corn plant underwater and fertilizer management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 67-84, DOI: 10.22126/ATWE.2022.7483.1014

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش)

سعید پولادگر^۱ ID، جوانشیر عزیزی مبصر^۲ ID✉، جواد رضانی مقدم^۳ ID، علی اصغری^۴ ID

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: saeed_pooladgar@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ja.mobaser22@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: J_ramezani@uma.ac.ir

^۴ استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ali_asghari@yahoo.com

چکیده

امروزه بهینه سازی مصرف آب از اولویت های اصلی کشاورزی است. چنانچه مدیریت آب در مزرعه بهبود یابد کارایی مصرف آب نیز افزایش پیدا می کند. مدیریت آب در مزرعه را می توان با کمک مدل های شبیه سازی به صورت بهینه انجام داد. در این تحقیق کارایی مدل AquaCrop در پیش بینی عملکرد گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب و کود مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق در قالب طرح کرت های خرد شده با تیمار اصلی کود اوره (شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود مورد نیاز گیاه ذرت (N1, N0 و N2)) و تیمار فرعی مقدار آب آبیاری (شامل آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه E1, E0 و E2)) با چهار تکرار اجرا شد. مطابق نتایج، مدل بیشترین حساسیت را نسبت به دو پارامتر به زمان گل دهی و زمان پر شدن غلاف دانه ها داشت. همچنین در واسنجی مدل برای شبیه سازی عملکرد ذرت، مقادیر بهره وری آب نرمال شده (WP) و ضریب رشد پوشش (CGC) به ترتیب برابر ۳۱ (گرم بر مترمربع) و ۲۴/۲ درصد به دست آمدند. علاوه بر این مطابق نتایج این تحقیق، بهترین و ضعیف ترین شبیه سازی عملکرد ذرت به ترتیب مربوط به تیمارهای N0E1 و N2E0 بود. همچنین نتایج نشان داد که میزان دقت شبیه سازی عملکرد در تیمار N0E1، بر اساس شاخص های آماری CE، RMSE، ME، d، CRM که به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۳۲، ۰/۷۳، ۰/۳۷ و ۰/۰۱ به دست آمد بیش تر از سایر تیمارها بود. بنابر این مدل آکواکراپ هنگامی که تنش های آبی و کود کم بود، شبیه سازی مناسب تری خواهد داشت. در مجموع، مطابق نتایج این تحقیق، کارایی مدل آکواکراپ برای کشت ذرت دانه ای در منطقه ی شهرستان شوش مناسب ارزیابی شد و می توان از این مدل برای مدیریت آب در مزارع ذرت استفاده کرد.

واژه های کلیدی: ذرت، شبیه سازی، کود اوره، مدیریت آب.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۸ اردیبهشت ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۸ خرداد ۱۴۰۱

استناد: پولادگر، س.، عزیزی مبصر، ج.، رضانی مقدم، ج.، و اصغری، ع. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش). فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، (۱)، ۸۴-۶۷. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7483.1014



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

گسترش روزافزون نیازهای مدیریتی باعث شده که مدل‌های رایانه‌ای نقش پر رنگی در مدیریت کشاورزی مدرن ایفا نمایند (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۶). در تهیه این مدل‌ها، برای شبیه‌سازی رشد گیاهی از تحلیل‌های کمی سیستماتیک استفاده می‌شود و با توجه به اهداف محقق می‌توانند در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به کار گرفته شوند (هنسجیک^۱ و همکاران، ۱۹۹۹). مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول، ابزاری هستند که می‌توانند برای تخمین عملکرد، آب مورد نیاز و نیازهای غذایی گیاه در شرایط مختلف به کار گرفته شوند (وان ایترسام^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). در واقع مدل به عنوان ابزاری تحلیل‌گر برای مطالعه اثر مدیریت سیستم‌های کشت روی حاصل‌خیزی محصول و محیط استفاده می‌شود (مومنی و همکاران، ۱۳۷۷). این مدل‌ها اثرات کمی منابع آب و هوایی، خصوصیات گیاهی و فاکتورهای مدیریتی و نیاز آبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند (وو^۳، ۲۰۰۸). مدل آکواکراپ^۴ یکی از این مدل‌ها است که به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصولات توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO^۵) برگرفته از مقالات مروری مجله آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ که توسط دورنباس و کاسام^۶ (۱۹۷۹) تهیه شده بود، بسط و توسعه یافته است (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). از جمله مشخصات مدل آکواکراپ در مقایسه با مدل‌های مشابه می‌توان به سادگی، توانمندی بالا و دقت مناسب آن توسط دورنباس و کاسام (۱۹۷۹) اشاره نمود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

هنگ و همکاران^۷ (۲۰۰۹) با استفاده از اطلاعات مربوط به گیاه ذرت در سه ناحیه مختلف از نظر آب و هوایی مدل آکواکراپ را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مدل مراحل رشد، عملکرد محصول، سطح سایه انداز و کل ماده خشک را در شرایط بدون تنش آبی و تنش آبی متوسط در حد قابل قبول شبیه‌سازی می‌کند، اما در وضعیت تنش آبی شدید نتایج مدل رضایت بخش نبود. آریانا و همکاران^۸ (۱۳۸۸) مطالعاتی روی مدل آکواکراپ انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد در صورتی که واسنجی به خوبی انجام شود مدل قادر به شبیه‌سازی مقادیر ماده خشک، رطوبت خاک و سطح سایه‌انداز گیاه با دقت مناسبی خواهد بود. در تونس، وانوترچ و راس^۹ (۲۰۱۱) مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر تغییر اقلیم (بارندگی، تبخیر و تعرق و دما) بر عملکرد گندم با استفاده از مدل آکواکراپ انجام دادند، که نتیجه تحقیق آنها نشان داد در مقایسه با اطلاعات پایه، عملکرد گندم در دوره زمانی سال‌های ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ کاهش پیدا می‌کند. سینگ و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۳) از مدل آکواکراپ در ایالت بنگال غربی هندوستان برای شبیه‌سازی عملکرد گندم، برای ۱۰ واریته مختلف استفاده نمودند. این محققین از اطلاعات مشاهده‌ای فصل زراعی ۲۰۰۹-۲۰۰۸ برای واسنجی و از اطلاعات فصل ۲۰۱۰-۲۰۰۹ برای صحت‌سنجی استفاده کردند. عملکرد گندم با استفاده از اطلاعات مشاهده‌ای ۳/۹ تن در هکتار بود در حالیکه مدل آکواکراپ عملکرد گندم را ۴/۰۱ تن در هکتار شبیه‌سازی کرد.

دانکن و نوبرت^{۱۱} (۲۰۱۵) در کشور اوگاندا با استفاده از مدل آکواکراپ بر روی گیاه ذرت تحقیقاتی را انجام دادند. آنها با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی روند تولید محصول ذرت تا سال ۲۰۵۰ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ در کشور اوگاندا برای مناطقی با سرعت گرمایش بالا و بارندگی کم، میزان تولید محصول ذرت با کاهش ۴/۷ درصدی روبرو خواهد شد و برای مناطقی با سرعت گرمایش کم و بارندگی زیاد، میزان تولید محصول ذرت به مقدار ۳/۵ درصد افزایش خواهد یافت. ولنس و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۲) مدل آکواکراپ را برای محصول کاواسا در کشورهای کلمبیا، نیجریه و توگو با استفاده از بانک اطلاعات موجود واسنجی کردند، که نتایج رضایت‌بخش بود. توکلی و همکاران (۱۳۹۱) مدل آکواکراپ را برای شبیه‌سازی تولید محصول، میزان رطوبت خاک و تخمین درصد سطح سایه‌انداز در بالادست سد کرخه مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مدل آکواکراپ ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی کشت محصول تحت روش‌های کم‌آبیاری و همچنین کشت دیم است. خلیلی و همکاران (۱۳۹۳) با کمک مدل گیاهی آکواکراپ به شبیه‌سازی عملکرد گندم در خراسان شمالی پرداختند. آن‌ها برای واسنجی مدل، از داده‌های هواشناسی روزانه و برداشت محصول در دو سال زراعی ۸۷-۸۶ و ۸۸-۸۷

^۱ Hengsdijk et al^۲ Van Ittersum^۳ Wu^۴ AquaCrop^۵ Food and Agriculture Organization^۶ Doorenbos and kasam^۷ Hang et al^۸ Araya et al^۹ Vanuytrecht and Raes^{۱۰} Singh et al^{۱۱} Duncan and Nobert^{۱۲} Wellens et al

استفاده کردند. نتایج بیانگر قابلیت مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول بود، به‌طوری که ضرایب تبیین، میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد و نرمال به‌ترتیب برابر ۰/۰۸۶، ۰/۰۶۲ و ۵/۲۳۵ به‌دست آمد. مهرآذر و همکاران (۱۳۹۴) نیز در پژوهشی عملکرد ذرت را تحت شرایط تنش‌شوری با کمک مدل آکواکراپ شبیه‌سازی کردند. این آزمایش در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارها شامل پنج سطح شوری آب آبیاری (صفر، ۴/۵۳، ۹/۰۶، ۱۳/۵۹ و ۱۸/۱۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر) و دو زمان نمونه‌برداری با چهار تکرار بود. مقادیر شاخص‌های آماری بیانگر دقت مناسب مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد ذرت تحت شرایط آزمایشی بود. کمینه و بیشینه مقادیر خطا به-ترتیب مربوط به تیمارهای صفر و ۱۸/۱۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر بود. همچنین حسینی و همکاران (۱۳۹۴) عملکرد سویا تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری و شوری را با کمک مدل آکواکراپ ارزیابی نمودند.

شعبانی و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد گیاه سویا با استفاده از مدل آکواکراپ تحت تنش شوری ارزیابی نمودند و دریافتند که مدل عملکرد را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. سعیدی و همکاران (۱۴۰۰) در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی از مدل آکواکراپ استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های گیاهی باید امکان وجود تنش‌های محیطی را در نظر داشته و برای شرایط واقعی مناطق تحت کشت توسعه یابند. وو و همکاران (۲۰۲۲) از مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد، سطح سایه انداز و نیاز آبی گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آبیاری و کود استفاده نمودند و دریافتند که مدل در شرایط بدون تنش شبیه‌سازی دقیق‌تری دارد. فنگ و همکاران^۱ (۲۰۲۲) رشد رویشی ذرت را با استفاده از مدل آکواکراپ در شمال چین در شرایط آبیاری قطره‌ای و پوشش مالچ شبیه‌سازی کردند و دریافتند که برای دستیابی به نتایجی دقیق باید شرایط مدیریت مزرعه کامل در نظر گرفته شود. همچنین شیرازی و همکاران (۱۴۰۰) عملکرد و زیست‌توده ۹ رقم گندم و ۲ رقم ذرت توسط مدل آکواکراپ ارزیابی شد و نتایج نشان داد که در هنگام شبیه‌سازی در شرایط تنش آبی مدل دارای محدودیت‌هایی است.

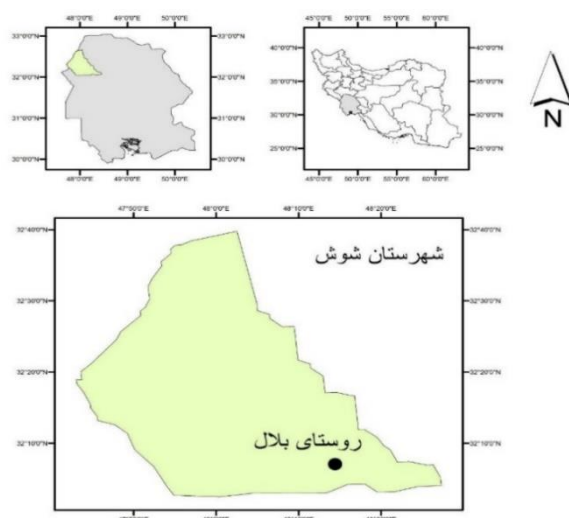
در این تحقیق، تیمارها شامل سطوح آبیاری و مقادیر شوری بودند. نتایج تحلیل حساسیت مدل بیانگر حساسیت بیش‌تر مدل بر روی پارامترهای بیشینه پوشش گیاهان و ضریب کاهش تاج پوشش گیاهان نسبت به سایر پارامترها بود. بنابراین با توجه به مطالعات و تجربیات گذشته در داخل و خارج ایران، می‌توان نتیجه گرفت که مدل آکواکراپ به‌دلیل استفاده آسان، محدود بودن پارامترهای ورودی و شبیه‌سازی در حد قابل قبول، می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای تخمین عملکرد محصولات کشاورزی در شرایط مختلف آبیاری و راهکارهای مختلف مدیریت مزرعه برای افزایش کارایی مصرف آب مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی مدل آکواکراپ در هر منطقه، برای گیاهان مختلف و شبیه‌سازی عملکرد آن‌ها نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی دارد تا بتوان سناریوهای مختلف مدیریت مزرعه را مورد بررسی قرار داد. بنابراین در این تحقیق مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت برای سطوح مختلف آبیاری و کود اوره در شرایط آب و هوایی شهرستان شوش واسنجی و صحت‌سنجی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در روستای بلال شهرستان شوش از توابع استان خوزستان در سال ۱۳۹۳ انجام شد که اقلیم منطقه گرم و خشک و بارندگی سالیانه در حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. کشت اصلی این شهرستان گیاه ذرت است. در رابطه با اهمیت این محصول در شهرستان شوش می‌توان به این نکته اکتفا کرد که در سال ۱۳۹۴ مقام نخست تولید ذرت در استان را به‌خود اختصاص داده است. موقعیت جغرافیایی شهرستان شوش در شکل (۱) آرایه شده است.

^۱ Feng et al



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

به دلیل اهمیت مشخصات آب و هوایی و خاک منطقه، اطلاعات مربوط به این دو عامل در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ماه	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)	مقادیر بارندگی (mm)	میانگین رطوبت نسبی (%)	ساعات آفتابی (hr)
مرداد	۴۵/۴	۲۶	—	۴۶/۸	۸/۹
شهریور	۴۲	۲۲/۵	—	۵۰	۸/۹
مهر	۳۷	۱۷	۱۵/۵	۴۵/۵	۸
آبان	۲۸	۱۳	۸/۵	۶۲	۶

جدول ۲. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

پارامتر	عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر	عمق ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی متر
بافت خاک	لومی - رسی	لومی - رسی
هدایت هیدرولیکی اشباع (mm d^{-1})	۱۳۴	۱۳۴
رطوبت حجمی اشباع (%)	۴۵/۵۷	۴۵/۵۷
رطوبت حجمی در ظرفیت مزرعه (%)	۲۸	۲۸
رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (%)	۵/۶	۵/۶
پتانسیم قابل جذب (ppm)	۱۸۳	۱۹۰
نیتروژن (%)	۰/۶۲	۰/۷۳
درصد ماده آلی (%)	۲/۲۶	۲/۷۲
PH	۷/۱۱	۷/۷۲

مطابق اعداد جدول (۱)، کمینه و بیشینه مقادیر دما در فصل کشت ذرت در منطقه مورد مطالعه برابر ۱۳ و ۴۵/۴ درجه سانتی گراد و به ترتیب مربوط به ماه‌های آبان و مرداد بود. مجموع بارندگی در طول فصل کشت ۲۴ میلی متر بود که این بارندگی‌ها صرفاً در دو ماه مهر و آبان، به ترتیب با مقادیر ۱۵/۵ و ۸/۵ میلی متر رخ داد. به احتمال زیاد، به دلیل کم بودن میزان بارندگی در طول فصل کشت، اثر بارش‌ها در میزان رشد گیاه ذرت ناچیز بوده

است. همچنین بر اساس داده‌های جدول (۱)، مقادیر رطوبت نسبی بین ۴۵ تا ۶۲ درصد متغیر بودند. همچنین خصوصیات خاک در اعماق صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر در جدول (۲)، ارایه شده است.

مطابق اعداد جدول (۲) بافت خاک لومی رسی و تغییرات خصوصیات خاک در لایه ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک ناچیز بود. از طرفی خاک محل انجام تحقیق (با میانگین شوری ۰/۵۴۳ دسی‌زیمنس بر متر) دارای وضعیت مناسبی برای کشت ذرت بود. مقادیر رطوبت حجمی نیز در نقاط رطوبتی اشباع، ظرفیت مزرعه و پژمردگی به ترتیب برابر ۴۵/۵ (به روش ستون آب آویزان)، ۲۸ و ۵/۶ (به روش صفحات فشاری) درصد به‌دست آمد.

با توجه به کشت وسیع ذرت در منطقه‌ی مورد مطالعه، در این تحقیق از یک رقم متداول در منطقه یعنی ذرت دانه‌ای رقم ۷۰۴ سینگل کراس استفاده شد. روش کاشت به صورت جوی پشته‌ای، با فواصل ۷۵ سانتی‌متر و تراکم کشت ۷۰ هزار بوته در هکتار انجام شد. جوی و پشته‌ها در کرت‌هایی به طول ۵ متر و عرض مفید ۴/۵ قرار داشتند و کرت‌ها از هم به فاصله یک جوی پشته به صورت نکاشت اجرا شدند. مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با کمک تشت تبخیر به‌دست آمد. سپس با استفاده از مقادیر ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد، تبخیر و تعرق گیاه به‌دست آمد. در نهایت عمق آب آبیاری برای تیمارهای مختلف، با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه و خصوصیات خاک مزرعه، مطابق جدول (۳) محاسبه شد. اعمال تیمارهای تنش آبی از آبیاری سوم به بعد و پس از سه برگی شدن بوته‌ها انجام شد.

جدول ۳. مقادیر آبیاری و کوددهی در سه سطح مختلف

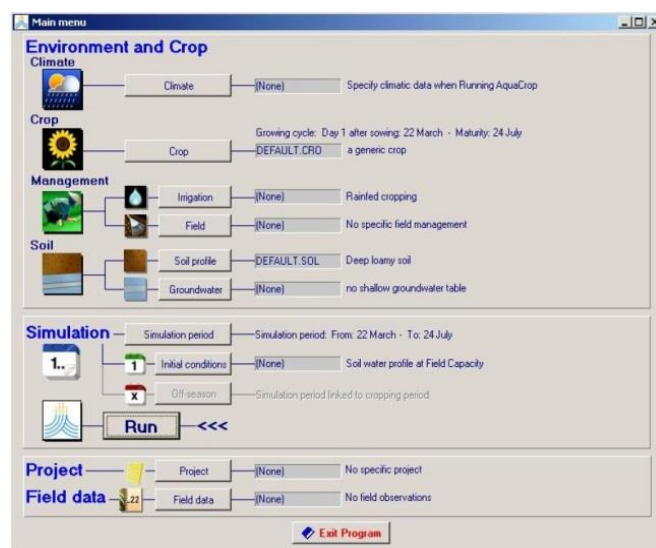
شماره آبیاری	تاریخ آبیاری	سطوح آبیاری (میلی‌متر)			سطوح کود (کیلوگرم بر هکتار)		
		E0	E1	E2	N1	N2	N3
اول	۱۳۹۳/۴/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۹۰	۱۵۲	۹۵
دوم	۱۳۹۳/۵/۵	۲۹	۲۹	۲۹	-	-	-
سوم	۱۳۹۳/۵/۱۴	۳۳	۲۶/۴	۱۶/۵	-	-	-
چهارم	۱۳۹۳/۵/۲۵	۳۵	۲۸	۱۷/۵	۱۶۸	۱۳۴/۴	۸۴
پنجم	۱۳۹۳/۶/۵	۷۸	۶۲/۴	۳۹	-	-	-
ششم	۱۳۹۳/۶/۱۷	۱۰۸	۸۶/۴	۵۴	-	-	-
هفتم	۱۳۹۳/۶/۲۹	۶۰	۴۸	۳۰	۹۰	۷۲	۴۵
هشتم	۱۳۹۳/۷/۹	۵۵	۴۴	۲۷/۵	-	-	-
نهم	۱۳۹۳/۷/۲۱	۳۵	۲۸	۱۷/۵	-	-	-

جهت کنترل مقادیر آب نفوذی به زمین از پارشال فلوم‌هایی که در بالادست و پایین‌دست مزرعه‌ی تحقیقاتی تعبیه شده بود استفاده گردید. آبیاری‌های اول تا سوم با دور آبیاری یک هفته و از آبیاری سوم به بعد دور آبیاری حدود دو هفته در نظر گرفته شد (با توجه به محدودیت تحویل آب به مزرعه). مقادیر کود اوره با توجه به عرف منطقه (برای شبیه‌سازی دقیق شرایط کشت در منطقه) برای گیاه ذرت تعیین شد (۴۴۸ کیلوگرم در هکتار). مقادیر کود اوره در سه سطح ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود عرف منطقه به مصرف گیاه رسید. کود اوره به صورت کود سرک و در سه نوبت در اختیار گیاه قرار گرفت (جدول ۳). سطح سایه‌انداز در طول دوره‌ی رشد مطابق روند زیر اندازه‌گیری شد. مساحت سایه‌ی بوته‌های ذرت در نیم‌روز برای تیمارهایی که از آبیاری و کود کامل برخوردار بودند اندازه‌گیری شد. سپس از تقسیم این مساحت به مساحت کرت، درصد سطح سایه‌انداز به دست آمد. لازم به ذکر است که حدود ۴۰ روز بعد از شروع کشت، سطح سایه‌انداز در مزرعه ۱۰۰٪ شد که مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول (۴) ارایه شده است.

جدول ۴. مقادیر سطح سایه‌انداز در فصل کشت

تعداد روز پس از کاشت	سطح سایه‌انداز (%)
۱۰	۵
۲۰	۱۵
۳۰	۸۰
۳۶	۱۰۰

به‌منظور افزایش دقت نمونه‌برداری، دو پشته‌ی وسط هر تیمار انتخاب شدند و داده‌های مورد نظر در جهت طولی (حدود دو متر) برداشت شد. با کمک این‌روش، اثرات جانبی (واحه‌ای) بر روی هر یک از تیمارها به حداقل می‌رسد. پس از برداشت دانه‌های بلال، وزن خشک دانه‌های هر تیمار به‌طور جداگانه وزن شد. مدل آکواکراپ برای محدوده وسیعی از گیاهان زراعی و شرایط آب و هوایی و توپوگرافی قابل استفاده است و در عین این-که مدلی ساده و کار کردن با آن راحت است خروجی‌های آن نیز از دقت خوبی برخوردار هستند (ریس و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۲. منوی اصلی مدل آکواکراپ

در شکل (۲) نمایی از منوی اصلی مدل آکواکراپ ارائه شده است. در مدل آکواکراپ از روش فائو- پنمن- مانتیث برای تخمین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شده است. این روش توسط سازمان خوار و بار کشاورزی سازمان ملل متحد ارائه شده و معتبرترین روش تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل است. علت دیگر انتخاب این روش توسط مدل آکواکراپ اساس و ماهیت فیزیکی آن است، به‌علاوه در این‌روش پارامترهای فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاه لحاظ شده است. در این مدل، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل از رابطه (۱) به دست آمده و بعد از ضرب در ضریب گیاهی (در هر مرحله رشد گیاه) مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

¹ Allen et al

که در رابطه (۱)، ET_0 : تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (mm d^{-1})، Δ : شیب منحنی فشار بخار ($\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1}$)، R_n : تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، G : شار گرمای داخل خاک ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، γ : ثابت رطوبتی ($\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1}$)، T : متوسط دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری سطح زمین ($^\circ\text{C}$)، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1}) و $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار (KPa) است.

این مدل از طریق تفکیک کردن تبخیر و تعرق حقیقی به تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه زراعی (T_r) و تفکیک عملکرد نهایی محصول (Y) به مقدار ماده خشک (B) و شاخص برداشت^۲ (HI) استنتاج شده است. تفکیک تبخیر و تعرق حقیقی به تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه زراعی باعث می شود که از تأثیر دادن آب مصرفی که صرف تولید نمی شود جلوگیری گردد. همچنین تفکیک عملکرد نهایی محصول به مقدار ماده خشک و شاخص برداشت اجازه می دهد روابط پایه ای بین عوامل محیطی و B، همچنین عوامل محیطی و HI قابل تمایز خواهد بود. رابطه (۲) به عنوان هسته مدل AquaCrop در برآورد رشد گیاهان عمل می کند (راس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (2)$$

در رابطه (۲)، T_r : تعرق محصول (mm) و WP: پارامتر بهره وری آب (kg m^{-2} ماده خشک یا kg mm^{-1}) که مقدار تعرق صورت گرفته در دوره زمانی که مقدار معینی ماده خشک تولید شده است. اندام هوایی گیاه منبعی برای تعرق واقعی گیاهی تعریف شده و مقدار تعرق آن متناسب با پارامتر بهره وری آب (WP) است. شاخص برداشت با HI نشان داده می شود که با استفاده از مقدار عملکرد (Y) و مقدار ماده خشک تولیدی (B) بر اساس رابطه (۳) تعریف می شود (راس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$HI = Y/B \quad (3)$$

مدل آکواکراپ با سایر مدل های مشابه که روی مبحث آب تمرکز دارند متفاوت است. در این مدل از سطح سایه انداز به جای شاخص سطح برگ (CC) استفاده شده است. همچنین از مقدار شاخص نرمال شده بهره وری آب برای تعیین تعرق واقعی و غلظت CO_2 (که به مدل توانایی زیادی برای برون یابی در مکان ها و فصل های مختلف می بخشد) استفاده شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در این مدل، مقدار سطح سایه انداز از زمان جوانه زدن تا زمانی که به حد نهایی خود برسد با استفاده از دو معادله در دو بخش شبیه سازی می شود. رابطه (۴) برای پوشش سبز اولیه و رابطه (۵) برای بیشینه پوشش سبز، یا ضریب رشد حداکثری استفاده می شود:

$$CC = CC_0 e^{-CGC \cdot t} \quad (4)$$

$$CC = CC_X - (CC_X - CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)، CC: سطح سایه انداز در زمان t، CC_0 : سطح سایه انداز اولیه، CGC: ضریب رشد سطح سایه انداز به صورت قسمت در روز، CC_X : سطح سایه انداز بیشینه و t: زمان (بر حسب روز) است.

کارایی مدل

در این تحقیق، کارایی مدل با استفاده از شاخص های آماری، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی مدل (CE)، شاخص سازگاری ویلموت (d)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده (CRM) که روابط ریاضی آن ها در زیر ارایه شده است مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (6)$$

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

¹ Biomass

² Harvest Index

$$d = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (8)$$

$$ME = \frac{\max |S_i - M_i|}{\bar{M}} \times 100 \quad (9)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (10)$$

پارامترهای S_i و M_i : به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، n : تعداد مشاهدات و $\bar{M}$: میانگین مقادیر M_i است. مطلوبیت شاخص‌های ME و $RMSE$ در نزدیک بودن آن به صفر است. دامنه تغییرات شاخص‌های CE و d از $-\infty$ تا $+1$ است که مقدار آن‌ها هر چه به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است. شاخص CRM نشان‌دهنده برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مقادیر شبیه‌سازی شده مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است (سینگ و همکاران، ۲۰۰۸)

در این تحقیق، آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ بر اساس روشی که توسط لیو و همکاران^۱ (۲۰۰۷) و هنگ و همکاران (۲۰۰۷) پیشنهاد شده است، انجام شد.

یافته‌ها

آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ

در این روش، بر اساس دامنه تغییرات ضریب حساسیت، میزان حساسیت مدل به هر پارامتر به صورت زیاد، متوسط، کم و بدون حساسیت تعیین شده است. بازه‌های مختلف ضریب حساسیت، تعیین شدت حساسیت و نتایج آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ در جدول (۵) ارائه شده است.

¹ Liu et al

جدول ۵. ضریب و آنالیز حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ

دامنه تغییرات	$S_e=0$	$0 < S_e < 0.3$	$0.3 < S_e < 1/5$	$S_e > 1/5$
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد
پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_e در حالت +۲۵٪	مقدار S_e در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت	
K_{cb}	K_{cb}		متوسط	
تراکم کشت	تراکم کشت		کم	
رشد پوشش تاجی (CCG)	۰/۲۵	۰/۶۹	کم - متوسط	
بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	۱/۴۵	۰/۳۷	متوسط	
شاخص برداشت (HI)	۰/۱۲	۱/۳۲	کم - متوسط	
زمان سبز شدن بذرها	۰/۰۰	۰/۰۰	ندارد	
زمان رشد سبزینه‌ای گیاه	۰/۰۹	۰/۲۸	کم	
زمان گل‌دهی	۰/۸۴	۱/۶۱	متوسط - زیاد	
زمان تشکیل غلاف	۰/۰۵	۰/۲۴	کم	
زمان پر شدن غلاف توسط دانه	۰/۷۱	۱/۹۶	متوسط - زیاد	
تعداد روز از کاشت تا ماکزیمم عمق ریشه	۰/۰۴	۰/۰۲	کم	
زمان از کاشت بذرها تا گل‌دهی	۰/۰۶	۰/۰۷	کم	
زمان رسیدگی فیزیولوژیکی	۰/۱	۰/۱۷	کم	
هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی	۰/۰۰	۰/۰۷	کم	

مطابق نتایج جدول (۵)، زمان گل‌دهی و زمان پر شدن غلاف توسط دانه‌ها حساس‌ترین پارامترهای مدل (دارای درجه حساسیت متوسط - زیاد) بودند. بنابراین باید دقت بیشتری در اندازه‌گیری این پارامترها لحاظ نمود، زیرا در غیر این‌صورت ممکن است خطای شبیه‌سازی مدل به‌شدت افزایش یابد. همچنین مدل نسبت به زمان سبز شدن دانه‌ها دارای هیچ حساسیتی نبود. سایر پارامترها با درجه حساسیت کم تا متوسط در جدول (۵) مشخص شده‌اند.

نتایج آنالیز حساسیت این مدل (در شبیه‌سازی کشت گندم) توسط محمدی و همکاران (۱۳۹۳) بیانگر این بود که مدل کمترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ضریب رشد پوشش (CGC) و زمان سبز شدن بذرها و بیشترین حساسیت را نسبت به شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده دارد که مؤید نتایج این تحقیق است.

نتایج عملکرد محصول

همه ورودی‌های مدل آکواکراپ قابل اندازه‌گیری و تعیین دقیق نیستند و یا تعیین دقیق آن‌ها نیازمند هزینه و زمان زیاد هستند. بنا براین مدل توسط برخی از پارامترهای گیاهی دارای حساسیت بیشتر (مراجعه شود به جدول ۵) با استفاده از تیمار شاهد واسنجی شد (جدول ۶). البته مقادیر برخی از پارامترها (مطابق با پیشنهاد منوال مدل) به‌صورت پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شدند که جهت اختصار در جدول (۶) ارایه نشده است. مطابق جدول (۶) مقادیر واسنجی مدل برای WP، CGC و HI جهت شبیه‌سازی عملکرد ذرت به ترتیب برابر ۳۱ (گرم بر مترمربع)، ۲۴/۲ و ۵۰ درصد به‌دست آمد.

جدول ۶. مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی

پارامتر	مقدار واسنجی	واحد
WP	۳۱	gr. m ⁻²
GDD	۱۰ - ۲۹/۵	°C
CGC	۲۴/۲	%
CDC	۱/۰۷۴	%
HI	۵۰	%

در مطالعات مشابه، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) در واسنجی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت، مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده (WP)، بیشینه سطح پوشش گیاهی (CCX) و ضریب رشد پوشش (CGC) را به ترتیب ۲۹/۷ (گرم بر مترمربع)، ۸۴ و ۱۲/۴ به دست آوردند. همچنین حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۳) نیز بعد از واسنجی مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت، مقادیر CGC، HI و WP را به ترتیب برابر ۱۶، ۴۸ و ۳۳/۷ گرم بر مترمربع پیشنهاد کردند.

جدول ۷. مقادیر عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده (تن در هکتار)

تیمار	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	تکرار چهارم	میانگین	مقادیر شبیه‌سازی
N0E0	۱۵	۱۴/۸۳۳	۱۴/۶	۱۴/۸۱۱	۱۴/۸۱	۱۴/۸
N0E1	۱۳/۸۶۶	۱۳/۶۶۶	۱۴/۱۳۳	۱۳/۳۳۳	۱۳/۷۵	۱۳/۶۲۱
N0E2	۱۱	۹/۱۶۶	۹/۵۳۳	۱۰/۳۳۳	۱۰/۰۱	۹/۳
N1E0	۱۴/۸۶۶	۱۴/۳	۱۴/۶	۱۴/۶۳۳	۱۴/۶	۱۲/۷۹۱
N1E1	۱۴/۱۶۶	۱۴/۰۶۶	۱۳/۷۳۳	۱۳/۹	۱۳/۹۷	۱۲/۳۲۸
N1E2	۱۰/۶۶۶	۱۰/۸۳۳	۹/۸۶۶	۹/۴۶۶	۱۰/۲۱	۹/۶۹۶
N2E0	۱۳/۸۳۳	۱۴/۶۶۶	۱۳/۹۳۳	۱۴	۱۴/۱۱	۷/۴۱۱
N2E1	۱۳/۶۶۶	۱۲/۸۶۶	۱۳	۱۲/۴	۱۲/۹۸	۷/۵۳۴
N2E2	۹/۱۶۶	۱۰	۸/۵	۹/۲۲۲	۹/۲۲	۶/۸۲۲

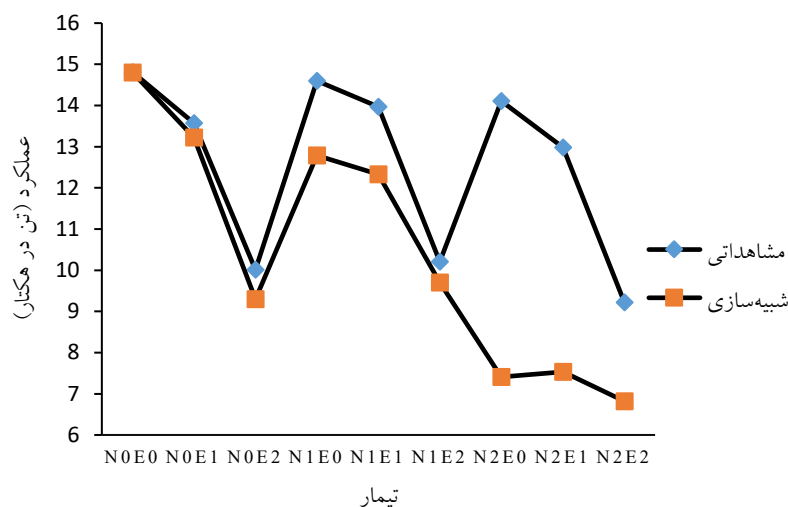
نتیجه پژوهش امیری و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیانگر این بود که مدل در پیش‌بینی عملکرد گندم دارای دقت مناسبی است به طوری که مقدار خطای نرمال شده کمتر از پنج درصد بود.

این مقادیر متفاوت در تحقیقات مختلف، بیانگر نیاز مبرم به واسنجی و اعتبارسنجی مدل آکواکراپ می‌باشد. در نهایت بعد از واسنجی مدل، مقادیر عملکرد برای کلیه تیمارهای تحقیق (به جز تیمار شاهد که برای واسنجی استفاده شده بود) شبیه‌سازی شد. نتایج عملکرد تولید محصول به تفکیک تیمارهای اعمال شده به همراه مقادیر شبیه‌سازی شده در جدول (۷) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۷) مشاهده می‌شود که در تیمارهای با تنش ۵۰٪ کود، مقادیر شبیه‌سازی تفاوت نسبتاً زیادی با مقادیر مشاهده‌ای دارند و مدل نتیجه‌ی قابل قبولی برای این شرایط ارائه نکرده است. در واقع واکنش مدل به شرایط تنش کود خیلی شدیدتر از شرایط واقعی بوده است، ولی اثر تنش آبی ناچیز بود.

در تحقیقی که توسط قمری و همکاران (۱۳۸۸) انجام شد، مشخص گردید که در مقادیر مصرف بالای کود، اثر تنش خشکی بر عملکرد شدیدتر بوده است. همچنین حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقات خود بر روی عملکرد سویا با کمک مدل آکواکراپ متوجه شدند با کاهش مقدار آب آبیاری، درصد خطای مدل در پیش‌بینی عملکرد سویا افزایش یافت.

مطابق شکل (۳)، مقادیر شبیه سازی شده در بیش تر تیمارها کمتر از مقادیر واقعی به دست آمد. این موضوع توسط مقادیر شاخص های CE و d که در جدول (۸) ارایه شده اند، نیز قابل مشاهده است. همان طور که در شکل (۳) ملاحظه می شود در تیمارهای N0E1، N1E0، N0E2 و N1E2 شبیه سازی نسبتاً مناسب بوده و روند مقادیر مشاهده ای را طی کرده است.



شکل ۳. مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای عملکرد (نمودار)

جدول ۸. مقایسه ی مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی عملکرد (با شاخص های آماری)

تیمارها	CE	RMSE	d	ME	CRM
N0E1	-۰/۲	۰/۳۲	۰/۷۳	۳/۷۳	۰/۰۱
N0E2	-۰/۹۹	۱	۰/۲۶	۱۶/۹۹	۰/۰۷
N1E0	-۸۰/۶۹	۱/۸۲	-۰/۶۹	۱۴/۲۲	۰/۱۲
N1E1	-۹۸/۶۴	۱/۶۵	-۰/۵۲	۱۳/۱۶	۰/۱۲
N1E2	-۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۴۵	۱۱/۱۴	۰/۰۵
N2E0	-۴۱۷/۵۲	۶/۷۱	-۵/۴۴	۵۱/۴۳	۰/۴۷
N2E1	-۱۴۴/۶۶	۵/۴۷	-۴/۱۶	۴۷/۲۳	۰/۴۲
N2E2	-۲۰/۴	۲/۴۶	-۱/۱۷	۳۴/۴۶	۰/۲۶

اما در تیمارهای N2E0، N2E1 و N2E2 نمودارهای شبیه سازی و مشاهده ای کاملاً با هم اختلاف داشته و از روند مشخصی تبعیت نمی کنند. اختلاف موجود بین مقادیر اندازه گیری و مشاهده ای توسط شاخص های آماری موجود در جدول (۸) مشاهده می گردد. با توجه به جدول (۸) ملاحظه می شود که تمام شاخص های آماری نشان از عدم شبیه سازی مناسب در تیمارهای N2E0، N2E1 و N2E2 دارد. اما در سایر تیمارها کم و بیش شبیه سازی مناسب است.

مقادیر CE هر چه به یک نزدیک تر باشند شبیه سازی مناسب تر است و با توجه به داده های جدول (۸)، پارامتر CE دارای تغییرات زیاد بوده و بازه ی وسیعی از مقادیر (-۴۱۷/۵۲ تا -۰/۲) را شامل شده است. با این حال در سه تیمار N0E1، N0E2 و N1E2 مقادیر CE بین صفر و -۱ به دست آمده است و شبیه سازی خوبی تشخیص داده شده است. مقادیر RMSE هر چه به صفر نزدیک تر باشد شبیه سازی بهتری رخ داده است. طبق جدول (۸) غیر از سه تیمار آخر، برای سایر تیمارها مقادیر RMSE نسبتاً قابل قبول بوده و شبیه سازی مناسب ارزیابی می شود.

مقادیر d نیز برای پنج تیمار اول نسبتاً مناسب بوده و به یک نزدیک است اما برای سه تیمار آخر مقادیر قابل قبول نیست. شاخص ME برای تیمار NOE1 بهترین عملکرد را نشان می‌دهد و برای سه تیمار آخر مقادیر خطای زیاد را ارزیابی می‌کند. برای سایر تیمارها نیز خطایی بین ۱۱ تا ۱۷ محاسبه شده است. در نهایت شاخص CRM در بین شاخص‌های آماری محاسبه شده از کمترین حساسیت برخوردار بوده و بازه‌ی اعداد به دست آمده کوچک است. برای پنج تیمار اول مقادیر مطلوب‌تری نسبت به سه تیمار آخر به دست آمده است.

در مجموع نتایج آماری نشان می‌دهد که بهترین شبیه‌سازی در تیمار NOE1 که کم‌ترین تنش در آن وارد شده، اتفاق افتاده است. هر چه تنش وارده افزایش یافته، مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای اختلاف بیشتری پیدا کرده‌اند. در تیمارهایی که تنش ۵۰ درصد کود اعمال شده، مقادیر شبیه‌سازی اختلاف بسیار زیادی با مقادیر مشاهده‌ای دارند و طبق شاخص‌های آماری که در جدول (۸) محاسبه شده است، در این تیمارها شبیه‌سازی مناسب نیست و مدل آکواکراپ توانایی پیش‌بینی عملکرد محصول تحت این تنش‌ها را نداشته است.

مهرآذر و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی که به شبیه‌سازی عملکرد ذرت با کمک مدل آکواکراپ تحت شرایط تنش‌شوری پرداختند، مقادیر R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۰/۷۱ و ۰/۵۸ به دست آمد. در کل، نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر بیش‌برآورد مدل بود (مدل عملکرد محصول را اندکی بیشتر از واقعیت) برآورد می‌کرد. همچنین مطابق نتایج بابازاده و سارانبیزی (۱۳۸۹)، مدل آکواکراپ توانست مقادیر عملکرد محصول سویا را با خطای نسبی ۲ تا ۴/۶ درصد شبیه‌سازی کند. در تحقیق آن‌ها، مقادیر شاخص‌های آماری EF، RMSE و ME به ترتیب برابر ۰/۸۳، ۴/۴۲ و ۵/۹۷ به دست آمد. همچنین نتیجه تحقیق حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که مدل آکواکراپ اگر چه با افزایش شوری دقت آن کم شد اما عملکرد دانه، زیست توده و سطح سایه‌انداز را به خوبی شبیه‌سازی کرد. به طور کلی طبق نتایج این تحقیق و مطالعات قبلی، در صورت واسنجی و صحت سنجی مناسب، مدل آکواکراپ توانایی خوبی در شبیه‌سازی عملکرد گیاه داشته که البته در شرایط تنش شدید آب و کود هنوز نیاز به اصلاح این مدل وجود دارد.

بحث

در این تحقیق کارایی مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب و کود مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق در قالب طرح کُرته‌ای خرد شده با تیمار اصلی کود اوره (شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد کود مورد نیاز گیاه ذرت (N0، N1، N2) و تیمار فرعی مقدار آب آبیاری (شامل آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (E0، E1 و E2) با چهار تکرار اجرا شد.

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد مدل آکواکراپ به تنش کود حساسیت بیشتری نسبت به تنش آبی داشت که خیلی با واقعیت مطابقت نداشت. در نهایت می‌توان گفت که در صورت رعایت کلیه فرآیندهای تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی به صورت مناسب و دقیق، می‌توان از مدل آکواکراپ انتظار شبیه‌سازی روند تغییرات رشد و عملکرد قابل قبول داشت (البته به جز شرایط تنش رطوبتی و کودی شدید). با توجه به تاثیر پارامترهای اقلیمی که هم بر مقدار نیاز آبی و دوره رشد گیاه ذرت موثر است، همچنین نوع خاک که در مناطق مختلف متفاوت است، پیشنهاد می‌گردد از ضرایب مراحل دوره رشد و ضرایب مقدار رشد این تحقیق به عنوان اعداد اولیه و پیش‌فرض استفاده شود ولی نتایج مربوط عملکرد کلی و زیست توده قابل تعمیم نیست.

تشکر و قدردانی

از اداره جهاد کشاورزی شهرستان شوش به دلیل همکاری در تأمین بخشی از امکانات مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- ابراهیمی پاک، نیازعلی، اگدرنژاد، اصلان، و خدادادی دهکردی، داود. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپر جاذب. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۳)، ۱۸۴-۱۶۶.
http://www.waterjournal.ir/article_74092.html
- ابراهیمی، میلاد، وردی نژاد، وحیدرضا، و مجنونی هریس، ابوالفضل. (۱۳۹۴). شبیه سازی رشد ذرت تحت مدیریت های مختلف آب و نیتروژن با مدل AquaCrop. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۲)، ۲۲۰-۲۰۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.55926>
- امیری، ابراهیمی، بحرانی، عبد...، خرسند، افشین، و حق جو، مهتا. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل AquaCrop در پیش بینی عملکرد دانه و بیوماس گندم، تحت تنش کم آبی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۴.۲)، ۲۲۹-۲۱۷.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4639.html
- ایزدی، زهره، نصرالهی، علی حیدر، و حقیقتی، بیژن. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه سازی رشد و عملکرد سیب زمینی تحت تنش آبی. مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۴۹(۱)، ۱۸۰-۱۷۱.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.232438>
- بابازاده، حسین، و سرائی تبریزی، مهدی. (۱۳۹۱). ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. دو ماهنامه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۲)، ۲۳۹-۲۲۹.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156>
- حسن لی، محمد، افراسیاب، پیمان، و ابراهیمیان، حامد. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. ماهنامه تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۶(۳)، ۴۹۸-۴۸۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.56738>
- حسینی، سیده طیبه، خوش روش، مجتبی، ضیاءتباراحمدی، میرخالق، و قدمی فیروزآبادی، علی. (۱۳۹۵). ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop تحت تاثیر مدیریت شوری و کم آبیاری. فصلنامه پژوهش آب در کشاورزی (علوم آب و خاک)، ۳۰(۳)، ۳۶۱-۳۷۲.
<https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.107156>
- حیدری نیا، مولود، برومند نسب، سعید، ناصری، عبدعلی، و الباجی، محمد. (۱۳۹۶). ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۱)، ۶۱-۴۹.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.61340>
- خلیلی، نجمه، داوری، کامران، عزیزاده، امین، کافی، محمد، و انصاری، حسین. (۱۳۹۴). شبیه سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل گیاهی آکواکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم سیسب، خراسان شمالی. مجله آب و خاک، ۲۸(۵)، ۹۳۰-۹۳۹.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.34927>
- رحیمی خوب، حدیثه، سهرابی، تیمور، و دلشاد، مجتبی. (۱۳۹۹). تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش های مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۶)، ۱۳۴۱-۱۳۵۱.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.298460>
- سعیدی، رضا، رضائی اعتدالی، هادی، ستوده نیا، عباس، نظری، بیژن، و کویانی، عباس. (۱۳۹۰). ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش های شوری و حاصلخیزی. مجله تنش های محیطی در علوم زراعی، ۱۴(۱)، ۱۹۵-۲۱۰.
<https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2473>
- شعبانی، اسماعیل، ذاکری نیا، مهدی، و حسام، موسی. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد سویا رقم ویلیامز در استان گلستان تحت تنش شوری ناشی از آب دریای خزر و سطوح مختلف آبیاری. علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۴۲(۲)، ۴۹-۶۲.
<https://dx.doi.org/10.22055/jise.2017.18343>

- عطایی، پریسا، رحیمی خوب، علی، و عرب، مصطفی. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی روش نیمه کمی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی رشد تربچه با سطوح مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۶)، ۱۵۵۳-۱۵۶۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.270122.668063>
- قمری، محسن، اندرزیان، بهرام، بخشنده، عبدالمهدی، قرینه، محمدحسین، و فتحی، قرت اله. (۱۳۹۰). شبیه سازی اثرات تنش خشکی و نیتروژن بر عملکرد، آب و کارایی مصرف نیتروژن ذرت با استفاده از مدل شبیه سازی CERES-Maize. مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۳ (۱۱)، ۳۱-۲۱.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1390.3.11.2.1>
- محمدی، مسعود، داور، کامران، قهرمان، بیژن، انصاری، حسین، و حق وردی، امیر. (۱۳۹۴). واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. نشریه علمی- پژوهشی پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹ (۳)، ۲۹۵-
<https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2015.103054.277>
- مومنی، رضوانه، بهبهانی، محمودرضا، نظری فر، محمد هادی، و آزادگان، بهزاد. (۱۳۹۰). ارزیابی سناریوهای افزایش بهره‌وری مصرف آب گندم دیم در حوزه کرخه با استفاده از آنالیزهای مدیریتی مدل رشد گیاهی CropSyst. مدیریت آب و آبیاری، ۱ (۱)، ۳۹-۴۰.
https://journals.ut.ac.ir/article_23383.html
- مهرآذر، آیدا، سلطانی، جابر، و رحمتی، امید. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه سازی واکنش عملکرد ذرت تحت تنش شوری. نشریه علمی- پژوهشی آب و خاک، ۳۰ (۵)، ۱۴۳۹-۱۴۲۶.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.43858>

References

- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No, 56.
https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56
- Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. Water and Soil Science, 25(4/2), 217-229. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4639.html [Persian]
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water-deficient and irrigated barley (*Hordeumvulgare*). Agricultural Water Management. 97(11), 1838-1846.
<https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0378-3774%2810%2900226-X;h=repec:eee:agiwat:v:97:y:2010:i:11:p:1838-1846>
- Araya, A., Keesstra, S. D., & Stroosnijder, L. (2010). Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostistef*) with FAO's AquaCrop model. Field Crops Research. 116, 196-204.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2009.12.010>
- Ataei, P., Rahimikhoob, A., & Arab, M. (2019). Performance Evaluation of the AquaCrop Semi-Quantitative Method for Prediction of Radish Growth under Different Levels of Nitrogen Fertilizer. Iranian Journal of Soil and Water Research, 50(6), 1553-1567.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.270122.668063> [Persian]
- Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2012). Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. Journal of Water and Soil. 26 (2), 329-339.
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156> [Persian]
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No, 33.
[https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtladkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtladkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874)
- Duncan, k., & Nobert, J. (2015). Assessment of the impact of climate change and adaptation strategies on maize production in Uganda. Physics and chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 93, 1-9.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.09.005>

- Ebrahimi, M., Verdinejad, V., & Mjnooni - Heris, A. (2015). Dynamic Simulation through Aqua Crop of Maize Growth under Different Management Decisions of Water Application and Nitrogen Fertilizer Use. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 207-220.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.55926> [Persian]
- Ebrahimipak, N., Egdarnejad, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2018). Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water deficit and Superabsorbent application. *Irrigation and Water Engineering*, 8(3), 166-184. http://www.waterjournal.ir/article_74092.html [Persian]
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261, 107372. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107372>
- Ghamari, M., Andarzian, B., Bakhshandeh, A.M., Gharineh, M. H., & Fathi, GH. (2011). Simulating Effects of Drought and Nitrogen Stress On Yield, Water and Nitrogen Use Efficiency of Corn Using Ceres-Maize Simulating Model. *Crop Physiology Journal*, 3 (11), 21-31.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1390.3.11.2.1> [Persian]
- Hassanli, M., Afrasiab, P., Ebrahimian, H. (2015). Evaluation of AquaCrop vs SALTMED Models to Estimate Crop Yield and Soil Salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(3), 487-498.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2015.56738> [Persian]
- Heidarinia, M., Boroomand Nasab, S., Naseri, A., & Albaji, M. (2017). AquaCrop model evaluation to estimate of Maize yield and soil salinity under different agriculture managements and irrigation with saline water. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 49-61.
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.61340> [Persian]
- Heng, L., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquaCrop model for irrigated and water-deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101, 488-498.
<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hengsdijk, H., Bouman, B.A.M., Nieuwenhuyse, A., & Jansen, H.G.P. (1999). Quantification of land use systems using technical coefficient generators: a case study for the Northern Atlantic zone of Costa Rica. *Agricultural Systems*, 61(2), 109-121. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00041-4)
- Hosseini, S., Khoshraves, M., Ziatabar Ahmadi, M., & Ghadami Firouzabadi, A. (2016). Evaluation of Soybean Yield by Aquacrop Model Under Salinity and Deficit Irrigation Management. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30 (3), 361-372. <https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.107156> [Persian]
- Izadi, Z., Nasrollahi, A., & Haghighati, B. (2018). Evaluation of the AquaCrop model to simulation of the potato growth and yield under water stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 171-180. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2017.232438.667675> [Persian]
- Kelly, T.D. & Foster, T. (2021). AquaCrop-OSPy: Bridging the gap between research and practice in crop-water modeling. *Agricultural Water Management*, 254, 106976.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106976>
- Khalili, N., Davary, K., Alizadeh, A., Kafi, M., & Ansari, H. (2015). Simulation of Rainfed Wheat Yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan. *Water and Soil*, 28(5), 930-939. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.34927> [Persian]
- Liu, H.F., Genard, M., Guichard, S., & Bertin, N. (2007). Model-assisted analysis of tomato fruit growth about carbon and water fluxes. *Journal of experimental botany*, 58(13), 3567-3580.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erm202>

- Mehrazar, A., Soltani, J., & Rahmati, O. (2016). Evaluation of the AquaCrop Model to Simulate Maize Yiled Response under Salinity Stress. *Journal of Water and Soil*, 30 (5), 1426-1439. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.43858> [Persian]
- Mohamadi, M., Davari, K., Ghahraman, B., Ansari, H., & Haghverdi, A. (2015). Calibration and Validation of AquaCrop Model for Simulation of Spring Wheat Yield under Simultaneous Salinity and Water Stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29 (3), 277-295. <https://dx.doi.org/10.22092/jwra.2015.103054> [Persian]
- Momeni, R., Behbahani, M., Nazari far, M., & Azadegan, B. (2011). Evaluation of Increasing Water Productivity Scenarios for Rain-Fed Wheat by Management Analysis of CropSyst Crop Model in Karkheh Basin. *Water and Irrigation Management*, 1(1), 29-40. https://journals.ut.ac.ir/article_23383.html [Persian]
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A.N. & Khoshravesh, M., (2021). The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with saline and shallow water table. *Journal of Hydrology*, 598, 126259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126259>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Sensitivity Analysis of Basil Crop Growth Parameters in the Aquacrop Model under Different Nitrogen Fertilizer Stresses. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1341-1351. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.298460.668516> [Persian]
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Nazari, B., & Kaviani, A. (2021). Evaluation of AquaCrop model for estimating of changes process of soil moisture, evapotranspiration and yield of maize under salinity and fertility stresses. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 195-210. <https://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2473.1652> [Persian]
- Shabani, E., Zakerinia, M., & Hesam, M. (2019). Evaluating the Efficacy of Aquacrop Model Performance in Simulating Soybean Yield (Williams Cultivar) in Golestan Province Under Salt Stress Caused by Caspian Sea Water and Different Levels of Irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(2), 49-62. <https://dx.doi.org/10.22055/jise.2017.18343.1332> [Persian]
- Shirazi, S.Z., Mei, X., Liu, B. & Liu, Y. (2021). Assessment of the AquaCrop Model under different irrigation scenarios in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 257, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120>
- Singh, A., Saha, S., & Mondal, S. (2013). Modeling irrigated wheat production using the FAO Aquacrop model in west Bengal, India. Published online in Wiley Online Library. *Journal of Irrigation and Drainage*, 62, 50–56. <https://doi.org/10.1002/ird.1722>
- Singh, A.K., Tripathy, R., & Chopra, U.K. (2008). Evaluation of CERES Wheat and crop system models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776-786. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v95y2008i7p776-786.html>
- Tavakoli, A.R., Mahdavi Moghadam, M., & Sepaskhah, R. (2015). Evaluation of the Aquacrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural water management*, 161, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.020>
- Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 201-234. [https://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](https://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)
- Vanuytrecht, E., & Raes, D. (2011). Assessment of the ‘CO2 fertilization effect’ on crops with the Aquacrop model. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-5917-2. <https://meetingorganizer.copernicus.org>

- Wellens, J., Raes, D., Fereres, E., Diels, J., Copppe, C., Adiele, J.G., Ezui, K.S.G., Becerra, L.A., Selvaraj, M.G., Dercon, G., & Heng, L.K. (2022). Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Agricultural Water Management*, 263(C), 107491. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107491>
- Wolka, K., Biazin, B., Martinsen, V., & Mulder, J. (2021). Soil and water conservation management on hill slopes in southwest Ethiopia. II. Modeling effects of soil bunds on surface runoff and maize yield using AquaCrop. *Journal of Environmental Management*, 296, 113-187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113187>
- Wu, D. (2008). Impact of spatial-temporal variations of climatic variables on summer maize yield in North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 24(3), 226-235. <https://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2012.601>
- Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., & Huang, X. (2022). Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules. *Agricultural Water Management*, 266, 107599. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>