

(OPEN ACCESS)

Comparison of AquaCrop and SWAP Models in Simulating Growth and Water Productivity of Bell Pepper under Salinity and Drought Stress

Halimeh Piri^{*1}, Sadegh Askari²

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: h_piri2880@uoz.ac.ir
2. Ph.D. Student of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: askari_sami@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The use of simulation models is a strategy in agricultural water management and an effective method for predicting the impacts of irrigation management and water quality on crop yield and water-use efficiency. Given the existence of environmental stresses in each region, crop models must be evaluated and validated locally. Moreover, since investigating environmental and management factors such as irrigation water quantity and salinity, as well as soil amendments, on crop yield and water use efficiency requires costly and time-consuming field experiments, the effects of these factors can be simulated using crop models. In recent years, numerous models have been employed to study the interactions between water, soil, and plants. AquaCrop and SWAP are two examples of such models. These models must be calibrated and evaluated for each specific crop and region. The core of these models is the crop yield response to water use, and they simulate crop yield using climatic, plant, soil, and management variables. Although crop models are among the widely used tools for simulating crop performance under different field management practices, attention to their sensitivity to input parameters can enhance calibration and reduce simulation errors. Sensitivity analysis of variables helps researchers gain sufficient insight into the influence of each parameter and its variation during the calibration stage. The aim of this study is to evaluate and improve the accuracy of crop models through sensitivity analysis and parameter calibration to achieve more realistic simulations of crop performance under different management and environmental conditions.
Article history: Received: 07.13.2025 Revised: 10.19.2025 Accepted: 10.31.2025	
Keywords: Canopy growth coefficient, Canopy reduction coefficient, Evapotranspiration coefficient, Normalized water productivity, Sensitivity analysis	
	Materials and Methods: This study was conducted over two growing seasons, in the second half of February 2022 and 2023, at the research farm located in Zahak County, in Sistan and Baluchestan Province. The experiment was laid out as a split-plot design in a randomized complete block with three replications. The treatments included three levels of irrigation water (I1, I2, I3 corresponding to 60%, 80%, and 100% of field capacity) and three salinity levels of irrigation water (S1, S2, S3

corresponding to 1, 3, and 5 dS/m, respectively). The land was initially plowed, disked, and plot arrangements were made. Each plot was 4 meters long and 3 meters wide. A spacing of 1 meter was maintained between subplots and 2 meters between main plots. Each plot contained five planting rows, with the two outer rows considered as borders, and data were collected from the middle rows. The spacing between rows was 75 cm, and between plants within each row was 30 cm. In both years, the first fruit harvest was carried out in mid-May, and a total of eight harvests were conducted. At the end of the harvest season, crop yield was measured and water-use efficiency was calculated. To simulate the effects of salinity and water deficit on yield and water productivity, two models-AquaCrop and SWAP-were used. Data from the first year were used for model calibration, and data from the second year were used for model validation. Model performance and accuracy were evaluated using statistical indices including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias Error (MBE), Coefficient of Determination (R^2), and Model Efficiency (EF). Additionally, sensitivity analysis was performed to determine the models' sensitivity to changes in input parameters and to identify essential data for calibration. For the sensitivity analysis, each input parameter was individually changed by 25% while keeping all other parameters constant, and the model was run under the new conditions. The results of the sensitivity analysis indicated that both models exhibited low to moderate sensitivity to the examined parameters.

Results: Based on the comparison between measured and simulated values of quinoa yield and water use efficiency, and the calculated statistical evaluation indices, it can be stated that both AquaCrop and SWAP models effectively simulated yield and water use efficiency under varying quantities and qualities of irrigation water. In both models, the discrepancies between measured and simulated yield and water-use efficiency were within 10%. The Root Mean Square Error (RMSE), Normalized RMSE (NRMSE), Mean Bias Error (MBE), Coefficient of Determination (R^2), and Model Efficiency (EF) for yield during the validation stage using the AquaCrop model were 2.34, 0.16, -1.85, 0.93, and 0.87, respectively. For water use efficiency, these values were 0.36, 0.19, -0.42, 0.89, and 0.81, respectively. For the SWAP model during the validation stage, the RMSE, NRMSE, MBE, R^2 , and EF for yield were 2.89, 0.17, -1.83, 0.92, and 0.84, respectively, and for water use efficiency were 0.43, 0.19, -0.38, 0.89, and 0.82, respectively. Given the lower error indices in the AquaCrop model, it can be concluded that AquaCrop simulated bell pepper yield and water-use efficiency more accurately than the SWAP model under salinity and deficit-irrigation stress conditions. The results of the sensitivity analysis indicated that both models were moderately to weakly sensitive to the parameters examined. The results of the sensitivity analysis indicated that both models exhibited low to moderate sensitivity to the examined parameters.

Conclusion: Based on the results obtained, both AquaCrop and SWAP models can be used with acceptable confidence to simulate bell pepper yield and water-use efficiency under various quantitative and qualitative irrigation water treatments. These models can serve as powerful and efficient tools to help farmers, designers, specialists, and agricultural managers select optimal irrigation management strategies. However, the AquaCrop model demonstrated higher accuracy. Hence, given that the

AquaCrop model requires relatively fewer input parameters than other crop models and possesses high accuracy and reliability in simulating plant growth, it can serve as an efficient tool for evaluating plant responses to changes in both the quantity and quality of irrigation water.

Cite this article: Piri, Halimeh, Askari, Sadegh. 2026. Comparison of AquaCrop and SWAP Models in Simulating Growth and Water Productivity of Bell Pepper under Salinity and Drought Stress. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (2), 141-166.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23863.3820

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مقایسه مدل‌های Aquacrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و بهره‌وری آب فلفل دلمه‌ای تحت تنش شوری و کم‌آبی

حلیمه پیری^{۱*}، صادق عسکری^۲^۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: h_piri2880@uoz.ac.ir^۲. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: askari_sami@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک راهبرد در مدیریت مصرف آب کشاورزی و روشی مؤثر در پیش‌بینی تأثیر مدیریت آبیاری و کیفیت آب بر عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب است. با توجه به وجود تنش‌های محیطی در هر منطقه، مدل‌های گیاهی باید در هر منطقه ارزیابی شده و مورد تأیید قرار بگیرند. هم‌چنین با توجه به این‌که بررسی عوامل محیطی و مدیریتی مانند مقدار و شوری آب آبیاری و اصلاح‌کننده‌ها بر روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاهان زراعی نیازمند آزمایش‌های مزرعه‌ای هزینه‌بر و زمان‌بر است، می‌توان اثر عوامل مختلف بر عملکرد گیاهان را با استفاده از مدل‌های گیاهی شبیه‌سازی کرد. در سال‌های اخیر مدل‌های زیادی برای بررسی روابط آب و خاک و گیاه مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های AquaCrop و SWAP دو نمونه از این مدل‌ها است. اساس این مدل‌ها واکنش عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی است و با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند. علی‌رغم این‌که مدل‌های گیاهی ازجمله روش‌های پرکاربرد برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی تحت مدیریت‌های مختلف مزرعه است، ولی توجه به حساسیت این مدل‌ها نسبت به پارامترهای ورودی می‌تواند عملیات واسنجی را بهبود بخشد و خطای شبیه‌سازی را کاهش دهد. تحلیل حساسیت متغیرها به محققین کمک می‌کند تا اطلاعات کافی در خصوص تأثیر هر پارامتر و مقدار تغییرات آن در مرحله واسنجی داشته باشند. هدف از این پژوهش، ارزیابی و بهبود دقت مدل‌های گیاهی از طریق تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترها، به‌منظور شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر عملکرد محصولات زراعی تحت شرایط مختلف مدیریتی و محیطی است.
واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، بهره‌وری آب نرمال‌شده، ضریب تبخیر-تعرق، ضریب رشد پوشش، ضریب کاهش پوشش	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲۲	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۷/۲۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۸/۰۹	
مواد و روش‌ها: این پژوهش در دو سال زراعی نیمه دوم بهمن ۱۴۰۲ و ۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی در شهرستان زهک واقع استان سیستان و بلوچستان در قالب طرح کرت‌های خردشده	

به صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل سه تیمار آب آبیاری (I1, I2, I3) به ترتیب معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) و سه سطح شوری آب آبیاری (S1, S2, S3) به ترتیب معادل ۱، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر) بود. ابتدا زمین موردنظر شخم، دیسک زده و کرت‌بندی شد. طول هر کرت ۴ متر و عرض آن ۳ متر بود. همچنین فاصله بین کرت‌های فرعی یک متر و فاصله بین کرت‌های اصلی ۲ متر در نظر گرفته شد. در هر کرت پنج ردیف کشت بود که دو ردیف کناری به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های موردنیاز از ردیف‌های میانی برداشت شد. فواصل ردیف‌های کشت از هم ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر بود. اولین برداشت میوه در هر دو سال، اواسط اردیبهشت انجام و در مجموع هشت مرحله برداشت انجام گردید. در پایان فصل برداشت عملکرد محصول اندازه‌گیری و بهره‌وری آب محاسبه شد. به منظور شبیه‌سازی اثر شوری و کم‌آبی بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب از دو مدل AquaCrop و SWAP استفاده شد. از داده‌های زراعی سال اول برای واسنجی مدل و از داده‌های زراعی سال دوم برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای آزمون دقت و بررسی کارایی مدل‌ها از آماره‌های خطای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و کارایی مدل (EF) استفاده شد. همچنین در این تحقیق برای تعیین درصد حساسیت مدل‌ها به تغییرات پارامترهای ورودی و نیز تعیین داده‌های موردنیاز برای واسنجی، از تحلیل حساسیت استفاده شد. برای تعیین تحلیل حساسیت مدل، در هر نوبت یکی از داده‌های ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده شد و بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید.

یافته‌ها: با توجه به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب کینوا و محاسبه شاخص‌های ارزیابی آماری می‌توان بیان داشت که AquaCrop و SWAP به خوبی توانسته‌اند عملکرد و بهره‌وری آب را در شرایط استفاده از آب با مقادیر و کیفیت‌های مختلف شبیه‌سازی کنند. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب در هر دو مدل، کم‌تر از ۱۰ درصد بود. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد خطای نسبی (EF) برای عملکرد در مرحله صحت‌سنجی با مدل AquaCrop به ترتیب ۲/۳۴، ۰/۱۶، -۱/۸۵، ۰/۹۳ و ۰/۸۷ و برای بهره‌وری مصرف آب در این مرحله به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۱۹، -۰/۴۲، ۰/۸۹ و ۰/۸۱ به دست آمد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد خطای نسبی (EF) برای عملکرد در مرحله صحت‌سنجی با مدل SWAP به ترتیب ۲/۸۹، ۰/۱۷، -۱/۸۳، ۰/۹۲ و ۰/۸۴ و برای بهره‌وری آب در این مرحله به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۱۹، -۰/۳۸، ۰/۸۹ و ۰/۸۲ به دست آمد. با توجه به مقادیر کم‌تر آماره‌های خطا در مدل AquaCrop، می‌توان گفت این مدل نسبت به مدل SWAP در شرایط تنش شوری و کم‌آبی بهتر توانسته است عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه را شبیه‌سازی کند. این دو مدل از نظر ماهیت و تمرکز علمی تفاوت‌های بنیادی دارند. مدل AquaCrop بیش‌تر یک مدل

زراعی-محصولی است که توسط سازمان FAO توسعه یافته است. تمرکز اصلی آن بر شبیه سازی عملکرد گیاه، رشد پوشش سبز، بهره وری آب و اثرات تنش ها بر تولید محصول است. این مدل برای توصیه های مستقیم به کشاورزان درباره مدیریت آبیاری و پیش بینی عملکرد محصول کاربرد بیشتری دارد. مدل SWAP یک مدل فرآیند-محیطی است که تمرکز آن بر انتقال آب، نمک، انرژی و مواد محلول در خاک و همچنین رطوبت خاک، زهکشی و شوری است. این مدل برای تحلیل دقیق تر رفتار خاک-آب و طراحی سیستم های زهکشی و مدیریت شوری کاربرد دارد. بنابراین می توان گفت AquaCrop بیش تر برای تصمیم گیری کشاورزان در سطح مزرعه مناسب است، چون روی عملکرد محصول تمرکز دارد. در حالی که SWAP بیش تر به درد پژوهش گران و طراحان سیستم های مدیریت آب و زهکشی می خورد که نیاز به درک فرآیندهای دقیق خاک-آب-نمک دارند. نتایج تحلیل حساسیت بیانگر حساسیت متوسط تا کم هر دو مدل به پارامترهای مورد بررسی بود.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج به دست آمده می توان بیان داشت که هر دو مدل AquaCrop و SWAP با یک سطح اطمینان قابل قبول می تواند در شبیه سازی عملکرد و بهره وری آب گیاه فلفل دلمه تحت تیمارهای مختلف کمی و کیفی آب آبیاری مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان یک ابزار توانمند و کارآمد در جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری به کشاورزان، طراحان، متخصصان و مدیران کشاورزی کمک نماید؛ لیکن دقت مدل AquaCrop بهتر بود. بنابراین می توان گفت، با توجه به این که مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل های گیاهی به داده های ورودی کمتری نیاز دارد و از دقت و توانمندی بالایی در شبیه سازی رشد گیاه برخوردار است، می توان از آن به عنوان ابزاری کارآمد برای برآورد عکس العمل گیاه نسبت به مقدار کمیت و کیفیت آب مصرفی استفاده کرد.

استناد: پیری، حلیمه، عسکری، صادق (۱۴۰۵). مقایسه مدل های SWAP و Aquacrop در شبیه سازی رشد و بهره وری آب فلفل دلمه ای تحت تنش شوری و کم آبی. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۲)، ۱۶۶-۱۴۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23863.3820



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

کم‌آبی، کاهش کیفیت خاک و تغییرات اقلیمی، سه محور اصلی تهدیدکننده امنیت غذایی جهانی در دهه‌های اخیر هستند. کشاورزی که سهمی بیش از ۷۰ درصد از مصرف آب شیرین جهان را به خود اختصاص داده، در خط مقدم مقابله با این تهدیدها قرار دارد (۱). در بسیاری از نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان، محدودیت دسترسی به آب و افزایش شوری خاک، منجر به کاهش چشمگیر عملکرد محصولات و کاهش بهره‌وری مصرف آب شده است (۲). این وضعیت، نیازمند توسعه راهبردهای نوین برای بهینه‌سازی مصرف آب و حفظ عملکرد اقتصادی محصولات زراعی است. یکی از این راهبردها، بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی گیاه - خاک - آب - هوا است. این مدل‌ها ابزارهایی عددی هستند که با شبیه‌سازی فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوفیزیکی، امکان ارزیابی پاسخ گیاه به شرایط مختلف محیطی و مدیریتی را فراهم می‌سازند. دو مدل اکواکراپ^۱ و سواپ^۲ از جمله پرکاربردترین مدل‌هایی هستند که به‌طور گسترده در مطالعات مربوط به بهره‌وری مصرف آب، اثرات تنش آبی و شوری، و مدیریت آبیاری محصولات زراعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳ و ۴).

مدل Aquacrop که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) توسعه یافته، برای شبیه‌سازی عملکرد محصول بر پایه بهره‌وری آب طراحی شده است. این مدل نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و تنها به داده‌های ورودی محدودی نیاز دارد. درعین حال، Aquacrop با لحاظ کردن تأثیرات تنش آبی و شوری بر تولید زیست‌توده و عملکرد نهایی، ابزاری دقیق و معتبر در ارزیابی سناریوهای

مختلف مدیریت آبیاری است (۵). این مدل تاکنون در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلفی از جمله گندم، ذرت، سیب‌زمینی، کاهو، گوجه‌فرنگی، آفتابگردان و کینوا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل‌قبولی ارائه کرده است (۶، ۷ و ۸). از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا تحت شرایط استفاده از آب‌شور و کم‌آبیاری در آبیاری قطره‌ای پالسی استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد مدل با دارا بودن R^2 از ۰/۹ تا ۰/۹۳ و RMSE از ۶۲۰ تا ۹۱۰ به‌خوبی توانسته است شبیه‌سازی را انجام دهد (۹). در سوی دیگر، مدل SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) مدل دینامیکی دیگری است که برخلاف AquaCrop بر پایه انتقال و حرکت آب و املاح در پروفیل خاک توسعه یافته است. این مدل گیاهی توسط دانشگاه واگنینگن هلند و به‌منظور شبیه‌سازی هم‌زمان اتمسفر، گیاه، خاک و آب بسط داده شد (۳). مدل SWAP با ترکیب معادلات ریاضی فیزیکی (از جمله معادله ریچاردز و معادله نفوذ نمک) و پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر چرخه آب و نمک در خاک را فراهم می‌سازد (۳). این مدل عمدتاً در مطالعات مربوط به مدیریت شوری، زهکشی، آبیاری زیرسطحی و اثرات بلندمدت تنش‌های محیطی بر کیفیت خاک و عملکرد محصول مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهشی نشان داد که SWAP در شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای با دقت بالا، به‌ویژه در مناطق شور، بسیار کارآمد است (۱۰). از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت استفاده شد و نشان داد که دقت مدل با RMSE به‌ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۶ و R^2 برابر ۰/۹۸ برای پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر در حد قابل‌قبول می‌باشد (۱۱). مطالعات مقایسه‌ای بین این دو مدل نیز نشان داده‌اند که اگرچه مدل AquaCrop در پیش‌بینی

1- AquaCrop
2- SWAP

سریع عملکرد با داده‌های محدود بسیار مناسب است، اما مدل SWAP برای تحلیل بلندمدت، دقیق‌تر و با رویکرد فیزیکی، گزینه مناسب‌تری تلقی می‌شود. مدل SWAP برخلاف مدل AquaCrop که یک مدل مبتنی بر آب است، برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی به مقدار آب جذب شده توسط گیاه وابسته نیست و شبیه‌سازی عملکرد توسط معادلات مربوط به تولید زیست‌توده از دی‌اکسیدکربن و تولید مواد غذایی انجام می‌شود (۱۲). به همین دلیل مدل SWAP جزء مدل‌های کربن محور دسته‌بندی می‌شود (۱۳). در تحقیقی مدل‌های AquaCrop و SWAP در شرایط مختلف آبیاری برای گیاه گوجه‌فرنگی مورد مقایسه قرار گرفتند (۴). نتایج تحقیق نشان داد که ترکیب نتایج هر دو مدل می‌تواند دید جامعی از پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی ارائه دهد. عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد هر دو مدل به ترتیب با RMSE برابر ۱/۰۷ و ۱/۰۹ و MBE برابر ۰/۳۶ و ۰/۵۴ دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج داشتند اما مدل AquaCrop دقت عملکرد بیش‌تری داشت (۱۴).

فلفل دلمه‌ای با نام علمی *Capsicum annuum* L. گیاهی علفی و یک‌ساله متعلق به خانواده Solanaceae و یکی از سبزی‌های مهم در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان است. فلفل دلمه‌ای به دلیل خواص غذایی و اقتصادی برجسته، نقش مهمی در امنیت غذایی و اقتصاد کشاورزی بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. این گیاه نسبت به تنش‌های آبی و شوری حساس است. آستانه تحمل به شوری فلفل بین ۱ تا ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر است (۱۵). شیب کاهش عملکرد آن ۱۰/۹ درصد است (۱۶). وقتی شوری از دسی‌زیمنس بر متر بالاتر رود، اثرات تنش بیش‌تر شده

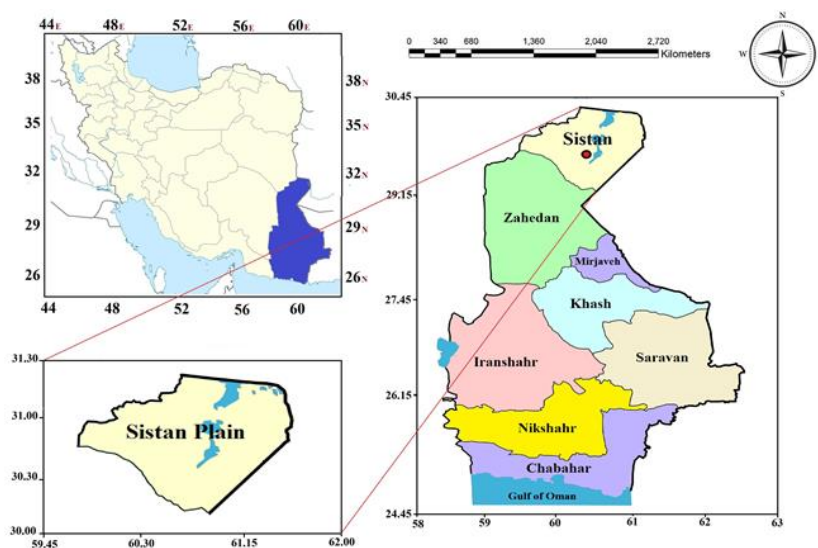
و عملکرد گیاه به شدت کاهش می‌یابد (۱۷). به گونه‌ای که حتی مقادیر نسبتاً پایین از شوری یا کاهش دسترسی آب می‌تواند باعث کاهش قابل‌توجه در رشد، زیست‌توده و عملکرد آن شود (۱۸). بنابراین بهینه‌سازی مدیریت آبیاری آن به‌ویژه با آبیاری قطره‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفاده بهینه از آب به‌خصوص در شرایط تنش‌های شوری و کم‌آبی با کاربرد مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر است. آزمایش‌های صحرایی برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب‌شور مفید است اما محدودیت‌های قابل‌توجهی از جمله محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی و محیطی و کوتاه بودن زمان آزمایش دارند (۱۹). از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه‌یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد. باوجود مطالعات متعدد در زمینه شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی، بررسی هم‌زمان و تطبیقی دو مدل AquaCrop و SWAP برای فلفل دلمه‌ای در شرایط ترکیبی شوری و کم‌آبیاری کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد محصول و فرایندهای خاک-آب قابلیت بالایی دارند، اما بیش‌تر این تحقیقات تنها به یک محصول، یک نوع تنش یا یک شرایط محیطی محدود بوده و اغلب به مقایسه مستقیم این دو مدل در یک بستر مشترک نپرداخته‌اند. انتخاب این دو مدل در پژوهش حاضر به دلیل ماهیت متفاوت آن‌ها بوده است؛ AquaCrop با تمرکز بر شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب محصول، و SWAP با تأکید بر فرایندهای انتقال آب، شوری و زهکشی در خاک. مقایسه هم‌زمان این دو مدل در شرایط واقعی تنش شوری و کم‌آبی می‌تواند شکاف موجود در ادبیات را

به توصیه‌های مدیریتی عملی برای افزایش بهره‌وری منابع آب و تولید پایدار در مناطق خشک دست‌یافت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: تحقیق حاضر در بهمن‌ماه ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان زهک در قالب طرح کرت‌های خردشده به‌صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. شهرستان زهک در منطقه سیستان در استان سیستان و بلوچستان در ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم فراخشک بوده و میزان متوسط بارندگی آن در سال ۵۵ میلی‌متر می‌باشد (۲۰). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

پُر کرده و به درک بهتر نقاط قوت و ضعف هر مدل کمک کند. از این‌رو، نتایج این تحقیق نه‌تنها کارایی هر دو مدل را در شبیه‌سازی شرایط تنش در منطقه سیستان تأیید می‌کند، بلکه مبنایی فراهم می‌سازد تا پژوهشگران و مدیران مزرعه بتوانند متناسب با اهداف خود (مدیریت عملکرد یا مدیریت شوری و زهکشی) مدل مناسب را انتخاب کنند. بدین ترتیب، این پژوهش فراتر از تکرار مطالعات پیشین، ارزش‌افزوده‌ای در کاربرد عملی و علمی مدل‌ها ایجاد می‌کند. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف بررسی و مقایسه کارایی مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه تحت شرایط تنش شوری و کم‌آبی و با بهره‌گیری از روش آبیاری قطره‌ای طراحی شده است. با ارزیابی دقت این مدل‌ها و بررسی رفتار گیاه در برابر تنش‌های یادشده، می‌توان



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Location of the study area.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. هم‌چنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. نتایج تجزیه آب و خاک مورد استفاده در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

تیمارها و اجرای مراحل زراعی: به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پیش از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک از اعماق ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد و برخی

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی.

Table 1. Some physical and chemical properties of the research farm soil.

فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg/l)	کربن آلی Organic carbon (mg/l)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg/l)	شوری EC (dSm ⁻¹)	اسیدیته pH	بافت خاک Soil texture	رس Clay %	شن Sand %	سیلت Silt %	عمق نمونه برداری Sampling depth (cm)	سال Year
4.6	0.72	280	2.1	7.6	Loamy sand	9	49	42	0-30	1401
5.7	0.68	231	2.5	7.8	Loamy sand	12	48	40	30-60	
4.5	0.71	282	2.2	7.5	Loamy sand	9	48	41	0-30	1402
5.6	0.69	230	2.5	7.7	Loamy sand	11	49	40	30-60	

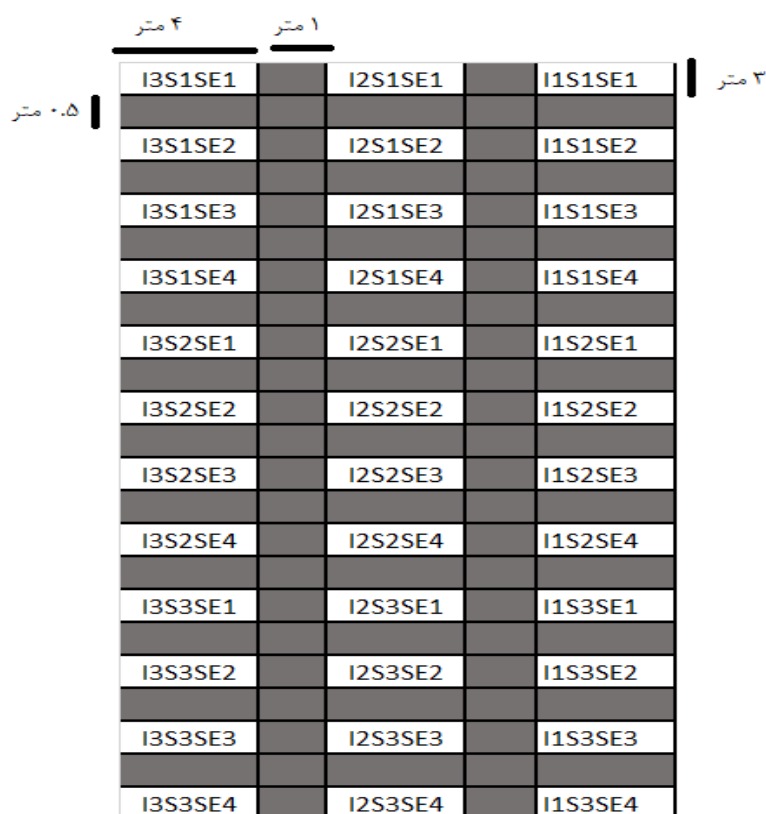
جدول ۲- مقادیر خصوصیات شیمیایی آب آبیاری.

Table 2. Chemical properties of the irrigation water.

آنیون‌ها Anions (meqlit ⁻¹)			کاتیون‌ها Cations (meqlit ⁻¹)				SAR	EC (dSm ⁻¹)	pH	نمونه آب Water sample	سال Year
So ₄ ⁻	Cl	HCO ₃ ⁻	K	Na	Mg	Ca					
5.7	5.6	4.1	0.46	10.5	2.5	4.8	5.4	1	7.7	S1	1401
6.2	9.8	4.5	0.65	17.5	3.8	4.3	8.7	3	7.8	S2	
6.5	12.6	3.8	0.74	21.3	4.7	4.6	9.9	5	7.4	S3	
5.8	5.7	4.2	0.45	10.5	2.6	4.9	5.5	1	7.6	S1	1402
6.3	9.7	4.4	0.66	17.4	3.8	4.3	8.6	3	7.7	S2	
6.4	12.5	3.9	0.73	21.2	4.6	4.5	9.8	5	7.4	S3	

بر اساس نتایج آزمون اولیه خاک، نیاز کودی خاک شامل کمبود عناصر غذایی مهم نظیر پتاسیم، فسفر و ازت به ترتیب با مصرف کودهای سولفات پتاسیم و سوپر فسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در ابتدای فصل کشت و کود اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک در دو مرحله ابتدای کشت و چهار هفته پس از کشت تأمین شد.

هر کرت پنج ردیف کشت بود که دو ردیف کناری به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های مورد نیاز از ردیف‌های میانی برداشت شد. فواصل ردیف‌های کشت از هم ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر بود. شکل ۲ شماتیک طرح را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک طرح.

Figure 2. Schematic of the experiment.

ساعت با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال بود. برای هر ردیف گیاهی یک نوار تیپ در نظر گرفته شد. دور آبیاری برای همه تیمارها ثابت و به صورت دو روز در میان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. حجم آب محاسبه شده از رابطه ۱ با استفاده از کنتور به هر کرت داده شد. مقدار آب آبیاری تمامی تیمارها تا زمان سبزشدن (مرحله چهار برگگی) یکسان و با آب شیرین (۱ دسی‌زیمنس بر متر) انجام شد. پس از طی شدن مراحل رشد ابتدایی و استقرار کامل گیاه، تیمارهای کم‌آبیاری و شوری اعمال شد. آب شور از آب چاهک‌های شور موجود در منطقه تهیه شد. آب در تانکرهای کنار مزرعه ذخیره و سپس به مزرعه داده شد. اولین برداشت میوه در هر دو سال اواسط

تعیین مقدار آب آبیاری: اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده مورد نظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR انجام گرفت. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (۲۱).

$$d = \sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_i) \Delta Z_i \quad (1)$$

در معادله فوق، d عمق آبیاری (متر)، θ_{fci} و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه i ام است. همچنین ΔZ ضخامت لایه برحسب متر و n شماره لایه خاک می‌باشد.

سیستم آبیاری مورد استفاده آبیاری قطره‌ای شامل لوله‌های آبیاری قطره‌ای تیپ با فواصل قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر روی لوله و دبی خروجی ۲ لیتر بر

اردیبهشت انجام شد. در مجموع ۸ بار برداشت انجام گردید. عملکرد کل از مجموع برداشت‌ها به دست آمد. بهره‌وری آب (WP^1): عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری. از رابطه ۲ به دست آمد (۲۲).

$$WP = \frac{Y}{IR} \quad (2)$$

در این رابطه، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم در هکتار) و IR مقدار آب آبیاری (مترمکعب) است. مدل **AquaCrop**: به منظور شبیه‌سازی اثر شوری و کم‌آبی بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب از مدل AquaCrop نسخه ۴ استفاده شد. این مدل با تفکیک تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) به تبخیر از سطح خاک (E_a) و تعرق (T_a) و مجزا کردن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) توسعه یافت. این مدل قادر است عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبیاری و شوری تخمین بزند. در این مدل برای تخمین عملکرد محصول از روابط زیر استفاده می‌شود (۷):

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (3)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (4)$$

در این رابطه Y_x و Y_a به ترتیب مقدار حداکثر و واقعی عملکرد، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار حداکثر و واقعی تبخیر-تعرق گیاه و K_y ضریب نسبی کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر-تعرق است. K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش شوری و تنش گیاهی است. K_s ضریب کاهش ناشی از تنش (شوری، آبی، دما و ...) در این مدل برای هر نوع تنش جداگانه محاسبه شده و مقدار آن بین ۰ تا ۱ است. وقتی تنش

وجود ندارد، مقدار K_s برابر ۱ است و در شدت تنش‌های زیاد به سمت صفر میل می‌کند. K_c ضریب گیاهی برای محاسبه تبخیر-تعرق بالقوه گیاه است که از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$ET_0 \times K_c = ET_c \quad (5)$$

که، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$CC = CC_0 \times e^{CGCt} \quad (6)$$

در این رابطه، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد.

بیوماس خشک از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$B = WP * \left[\frac{Tr_i}{ET_{0i}} \right] \quad (7)$$

در این رابطه، T_r مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری مصرف آب آبیاری، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) مطابق رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (8)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است.

داده‌های مورد استفاده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شوند. هر گروه از داده‌ها بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا داده‌های موجود به مدل معرفی شدند. داده‌های اقلیمی از ایستگاه هواشناسی زهک دریافت و از قسمت CLIMWAT وارد مدل

رطوبت قابل نگهداشت خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی نسبت به زطوبت خاک است که از مدل وان‌گنوختن و همکاران (۲۳) در برنامه RetC استفاده شده است. این برنامه با استفاده از پارامترهای بافت خاک (درصد سیلت، شن و رس)، چگالی ظاهری خاک و درصد مواد آلی با استفاده از توابع انتقالی توابع هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند.

در این مدل شبیه‌سازی رشد و تولید محصول با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه انجام می‌شود. تابع اصلی این مدل برای شبیه‌سازی به صورت رابطه ۹ می‌باشد:

$$1 - \frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} = K_{y,k} \left(1 - \frac{T_{a,k}}{T_{p,k}} \right) \quad (9)$$

که در این رابطه $K_{y,k}$ ضریب واکنش گیاه به مرحله رشد K ، $T_{a,k}$ و $T_{p,k}$ تعرق واقعی و پتانسیل (سانتی‌متر) در طول دوره رشد K ، $Y_{a,k}$ و $Y_{p,k}$ مقدار واقعی و پتانسیل محصول (کیلوگرم در هکتار) در طول دوره رشد K می‌باشد. در این مدل ابتدا تبخیر-تعرق مرجع با روش فائو-پنمن ماتیت محاسبه شد. سپس با استفاده از ضریب گیاهی و پوشش تاج (Kc , LAI) تبخیر-تعرق بالقوه گیاه به دست می‌آید. سهم تعرق بالقوه گیاه از ET_p همان $T_{p,k}$ است.

با حل معادلات انتقال آب در خاک (Richards equation) و محاسبه پتانسیل آب در ناحیه ریشه، اگر رطوبت خاک کافی نباشد یا شوری و غرقابی وجود داشته باشد، تعرق واقعی کم‌تر از پتانسیل می‌شود. این کاهش توسط ضرایب تنش آبی و شوری در مدل اعمال شده و نهایتاً $T_{a,k}$ حاصل می‌شود.

تابع تعیین‌کننده محصول در هر مرحله از رشد با استفاده از رابطه ۱۰ به دست آمد:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{k=1}^n \left(\frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} \right) \quad (10)$$

شد. داده‌های گیاهی از بانک اطلاعات پیش‌فرض یا آزمایش مزرعه‌ای گرفته و در Crop file تعریف شد. داده‌های خاک از آنالیز خاک و از Soil database مدل استفاده شد. داده‌های مدیریتی بر اساس شرایط مزرعه و سناریوی پژوهش در Management file وارد شد (۷).

مدل SWAP: مدل (SWAP) (خاک، آب، اتمسفر و گیاه) یک مدل هیدرولوژیکی دو بعدی با اساس فیزیکی است. این مدل توانایی شبیه‌سازی رشد محصولات، جریان آب در خاک، انتقال املاح، انتقال حرارت، تبخیر از خاک و تعرق گیاه در طول فصل رشد در مقیاس صحرایی را دارد. مدل SWAP نسخه اصلاح شده‌ای از مدل‌های SWATR، SWATRE و SWACROP است. این مدل برای شبیه‌سازی توازن آب و مواد محلول در یک خاک کشت شده با انواع مختلف شرایط مرزی شامل امکان زهکشی و مدیریت‌های مختلف آبیاری به کار برده می‌شود.

مدل SWAP دارای سه بخش مهم برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه است. (۱) مدل شبیه‌سازی تفصیلی رشد (۲) مدل مشابه تفصیلی که به رشد و نمو گیاه چمن اختصاص دارد (۳) مدل ساده برای برآورد عملکرد محصولات زراعی (۱۲). در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی تفصیلی رشد برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه استفاده شد.

در هر مدل کامپیوتری نیاز به شرایط مرزی می‌باشد که به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود. در این مدل شرایط مرزی بالا تبخیر و تعرق پتانسیل (براساس معادله فائو-پنمن-ماتیت) و مجموع بارندگی و آبیاری تعریف شده است. مرز پایینی به علت پایین بودن سطح ایستابی در منطقه به صورت زهکشی آزاد برای مدل تعریف شد.

برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک نیاز به داده‌های خاکشناسی شامل توابع هیدرولیکی خاک،

مشاهده شده سال اول نزدیک شود. بعد از اتمام مرحله واسنجی، مقادیر همه داده‌های ورودی یادداشت شد و در مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. برای آزمون دقت و بررسی کارایی مدل‌ها از آماره‌های خطای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد خطای نسبی (EF) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}{\bar{O}_i} \quad (13)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}))^2} \quad (15)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

در این روابط P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و N تعداد نمونه می‌باشد.

RMSE همواره مثبت است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص RMSE برابر با صفر خواهد بود. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل می‌باشد. مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیش‌تر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. ضریب تبیین R^2 نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی می‌باشد. مقدار آن از

که در این رابطه Y_a محصول تجمعی واقعی در طول فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، Y_p محصول تجمعی پتانسیل در طول فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، K مرحله رشد و n تعداد مرحله رشد است. در صورت وجود رابطه خطی بین $\frac{Y_a}{Y_p}$ و $\frac{T_a}{T_p}$ در طول کل دوره رشد و یا زمانی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد ضریب واکنش به‌عنوان تابعی از مرحله رشد (D_s) برای یک گیاه خاص موجود نباشد، یک مرحله رشد (k) برای گیاه زراعی مورد نظر معرفی می‌شود (۲۴).

تحلیل حساسیت، واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل: برای تعیین درصد حساسیت مدل‌ها به تغییرات پارامترهای ورودی و نیز تعیین داده‌های مورد نیاز برای واسنجی، از تحلیل حساسیت استفاده شد. برای این منظور از رابطه ۱۱ استفاده شد (۲۵):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (11)$$

که در آن، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد عملکرد دانه بر اساس داده ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عملکرد دانه بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد.

برای تعیین تحلیل حساسیت مدل، در هر نوبت یکی از داده‌های ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. سپس مقادیر ضریب حساسیت به‌دست آمده در کلاس $Sc > 15$ حساسیت بالا، $15 > Sc > 2$ حساسیت متوسط و $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شدند (۲۵).

پس از تحلیل حساسیت، واسنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های سال اول انجام شد. در مرحله واسنجی، داده‌های با حساسیت متوسط و بالا آن‌قدر تغییر داده شدند تا نتایج شبیه‌سازی شده به نتایج

صفر تا یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر مدل می‌باشد. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل‌های رشد گیاهی مقدار عامل موردنظر را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل‌ها: نتایج تحلیل حساسیت برای انتخاب پارامترهای واسنجی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داشت هر دو مدل نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی به مدل‌ها، حساسیت متوسط تا کم داشتند. پارامترهای ضریب رشد پوشش، ضریب کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال شده بر خروجی مدل AquaCrop حساسیت زیادی داشتند. بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری پارامترهایی که ضریب حساسیت متوسط تا زیاد است، دقت بیش‌تری به عمل آورد، زیرا باعث خطای قابل توجهی در خروجی مدل می‌شود. خطای ناشی از اندازه‌گیری در پارامترهایی که مدل نسبت به تغییر آن‌ها حساسیت کمی داشت، قابل اغماض است. علت حساسیت متوسط تا زیاد،

وابسته بودن شبیه‌سازی عملکرد به مقادیر پارامترهای گیاهی از جمله بهره‌وری آب نرمال شده و ضریب گیاهی برای تعرق است. البته برخی محققان بیان کرده‌اند که حساسیت مدل‌های گیاهی نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی می‌تواند به نوع گیاه نیز وابسته باشد (۱۱). نتایج تحقیق با نتایج مطالعات احمدی و همکاران (۲۶) و نصرالهی و همکاران (۲۷) مطابقت داشت. ایشان بیان داشتند در بین پارامترهای رشد گیاهی، مدل به پارامتر WP^* حساسیت زیادی دارد و ضریب حساسیت این پارامتر در دسته زیاد قرار گرفت.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل: واسنجی هر دو مدل با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، انجام شد. از داده‌های سال اول برای واسنجی مدل استفاده شد. مراحل واسنجی مدل شامل انتخاب پارامترهای مدل و تعیین بازه‌های مورد نظر هر پارامتر، برای بهینه‌سازی اختلاف موجود بین مقدار مشاهد شده و پیش‌بینی شده است. نتایج واسنجی در جدول ۴ نشان داده شده است. برخی پارامترهای ورودی به مدل واسنجی، برخی اندازه‌گیری و برخی از پیش فرض مدل استفاده شد. واسنجی مدل عموماً به وسیله تنظیم پارامترهای ورودی و تعیین حدود ثابت برای هر یک صورت می‌گیرد، به طوری که مقادیر خروجی بسیار به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک باشد (۱۶).

جدول ۳- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی به مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد فلفل دلمه.

Table 3. The sensitivity coefficient of some input parameters of the AquaCrop and SWAP models for the simulation of Bell Pepper yield.

درجه حساسیت Sensitivity rate	مقدار SC در حالت -۰.۲۵٪ Sc at -0.25%	مقدار SC در حالت +۰.۲۵٪ Sc at +0.25%	پارامترهای ورودی مدل Model input parameters
AquaCrop model			
متوسط Average	3.8	4.9	ضریب گیاهی برای تعرق crop transpiration coefficient
متوسط Average	5.8	4.2	عمق مؤثر ریشه effective rooting depth
متوسط Average	3.8	6.9	حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه soil water depletion threshold for canopy expansion-upper
متوسط Average	4.9	6.4	حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه soil water depletion threshold for canopy expansion-lower
متوسط Average	6.3	7.5	بیشینه رشد سایه‌انداز maximum canopy cover
کم Low	1.9	1.8	شاخص برداشت Harvest index
زیاد High	15.9	17.3	ضریب رشد پوشش canopy growth coefficient
زیاد High	15.6	15.1	ضریب کاهش پوشش canopy decrease coefficient
زیاد High	15.8	15.5	بهره‌وری آب نرمال شده normalized water productivity
SWAP model			
متوسط Average	5.8	5.9	حد آستانه بالای دما Upper temperature threshold
متوسط Average	6.2	6.4	دمای حداکثر Maximum temperature
کم Low	1.6	1.8	دمای حداقل Minimum temperature
متوسط Average	4.2	3.6	ضریب تبخیر-تعرق Evapotranspiration coefficient
متوسط Average	5.3	4.9	بار فشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه Pressure head for the onset of water uptake by roots
متوسط Average	5.1	5.2	بار فشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه Pressure head for optimal onset of water uptake by roots

جدول ۴- مقادیر عوامل گیاهی ورودی به مدل‌ها.

Table 4. Values of models input parameters.

توضیح Description	واحد Unit	مقدار Value	پارامتر Parameter
AquaCrop model			
واسنجی Calibrated	سانتی‌متر (Cm)	30	عمق مؤثر ریشه Effective rooting depth
واسنجی Calibrated	روز (day)	46	مدت زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه Time to reach maximum root
اندازه‌گیری Measured	روز (day)	7	مدت زمان کاشت تا جوانه زنی Time from planting to germination
اندازه‌گیری Measured	روز (day)	50	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد سایه‌انداز Time from cultivation to maximum crop canopy
واسنجی Calibrated	روز (day)	65	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول Time from planting to harvest
پیش فرض Default	درجه سانتی‌گراد (°C)	2	دمای پایه Base temperature
پیش فرض Default	درجه سانتی‌گراد (°C)	30	دمای بالا Upper temperature
اندازه‌گیری Measured	سانتی‌متر مربع (cm ²)	0.5	پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی Canopy cover of each seedling during germination
واسنجی Calibrated	درصد (%)	6	پوشش گیاهی اولیه (CC0) Initial canopy cover
واسنجی Calibrated	درصد (%)	52	بیشینه رشد سایه‌انداز (CCx) Maximum canopy cover
واسنجی Calibrated	-	0.5	حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-upper
واسنجی Calibrated	-	0.7	حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-lower
واسنجی Calibrated	درصد روز (% day ⁻¹)	8.5	ضریب رشد پوشش (CGC) Canopy growth coefficient
واسنجی Calibrated	درصد روز (% day ⁻¹)	9	ضریب کاهش پوشش (CDC) Canopy decrease coefficient
پیش فرض Default	درصد روز (% day ⁻¹)	1.05	حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق Maximum crop transpiration coefficient
واسنجی Calibrated	گرم بر متر مربع (gr m ⁻²)	9.5	بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity
واسنجی Calibrated	گرم بر متر مربع (gr m ⁻²)	85	ضریب کاهش بهره‌وری نرمال شده Normalized water productivity decrease coefficient
واسنجی Calibrated	درصد (%)	0.5	شاخص برداشت Harvest Index
واسنجی Calibrated	دسی‌زیمنس بر متر (dS m ⁻¹)	3	آستانه تحمل شوری Salt tolerance threshold
واسنجی Calibrated	درصد (%)	0.12	شیب کاهش شوری Salinity response slope
واسنجی Calibrated	دسی‌زیمنس بر متر (dS m ⁻¹)	0.5	آستانه پایین برای شوری Lower salinity threshold
واسنجی Calibrated	دسی‌زیمنس بر متر (dS m ⁻¹)	3.5	آستانه بالا برای شوری Upper salinity threshold

ادامه جدول ۴-

Continue Table 4.

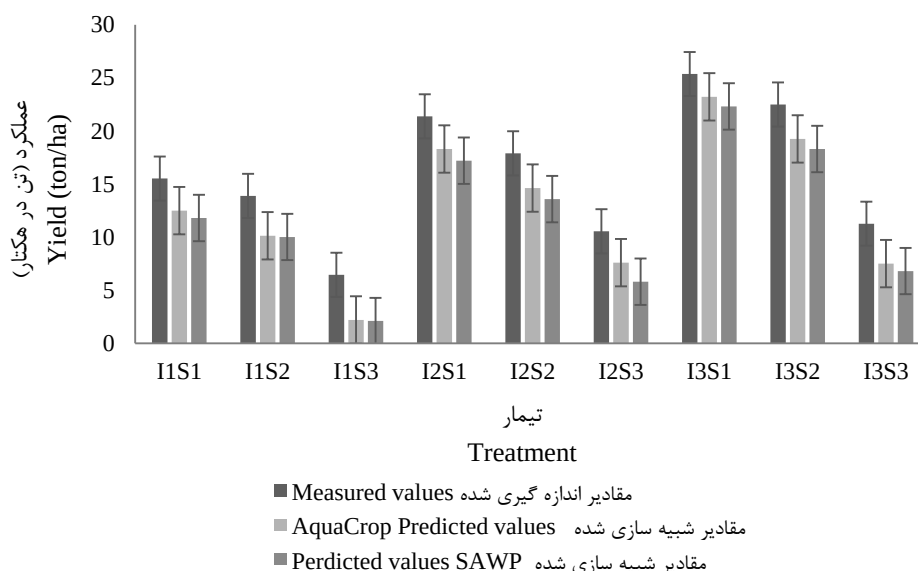
SWAP model			
پیش فرض Default	-	1	ضریب نابودی نور پخش شده Extinction coefficient of diffused radiation
پیش فرض Default	-	0.75	ضریب نابودی نور مستقیم Extinction coefficient of direct radiation
واسنجی Calibrated	سانتی متر (cm)	-18	بار فشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه Pressure head for the onset of water uptake by roots
واسنجی Calibrated	سانتی متر (cm)	-25	بار فشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه Pressure head for optimal onset of water uptake by roots
واسنجی Calibrated	ژول بر متر مربع بر ثانیه (Jol m ⁻² s ⁻¹)	0.49	کارایی مصرف نور یک برگ Light use efficiency of a leaf
پیش فرض Default	متر مربع بر متر مربع (m ² m ⁻²)	0.0589	شاخص سطح برگ در زمان سبز شدن Leaf area index at the time of greening
پیش فرض Default	سانتی متر (cm)	10	عمق اولیه ریشه Initial root depth
پیش فرض Default	سانتی متر (cm)	50	حداکثر عمق ریشه Maximum root depth
واسنجی Calibrated	دسی زیمنس بر متر (dS m ⁻¹)		آستانه تحمل شوری Salt tolerance threshold
واسنجی Calibrated	دسی زیمنس بر متر (dS m ⁻¹)		شیب کاهش شوری Salinity response slope

هکتار بود. در تمامی تیمارها مقدار شبیه‌سازی شده کم‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. نتایج به‌دست آمده از مدل SWAP نیز نشان داد بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل ۴/۳۵ و ۳/۰۵ تن در هکتار بود که به‌ترتیب در تیمارهای IIS3 و IIS1 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده ۴/۰۹ تن در هکتار بود. در تمامی تیمارها مقدار شبیه‌سازی شده کم‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت خطای هر دو مدل تقریباً در تیمارهایی که دچار تنش شوری و آبی بودند بیش‌تر بود. به همین دلیل محققان پیشنهاد می‌کنند که تنش‌های شدید با این مدل‌های گیاهی شبیه‌سازی نشود یا ضریب اطمینان برای تصحیح نتایج آن، با استفاده از تیمارهای بدون تنش یا

با توجه به پارامترهای ورودی واسنجی شده، با داده‌های سال دوم صحت‌سنجی مدل انجام شد و شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بررسی شد. شکل ۳ مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده عملکرد گیاه را بر اساس مدل‌های AquaCrop و SWAP در شرایط استفاده از آب شور و کم‌آبیاری نشان می‌دهد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده به‌ترتیب ۲۵/۳۶ و ۶/۴۵ تن در هکتار بود که از تیمارهای IIS3 و IIS1 به‌دست آمد. براساس نتایج به‌دست آمده از مدل AquaCrop، بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل ۴/۲۵ و ۲/۱۵ تن در هکتار بود که به‌ترتیب در تیمارهای IIS3 و IIS1 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده ۳/۲۷ تن در

بدون تنش انجام شد (۷). نتیجه دیگری که از شبیه‌سازی مدل‌ها می‌توان گرفت، روند کاهش عملکرد تحت تأثیر تنش آبی و شوری بود که به خوبی توسط هر دو مدل شبیه‌سازی شد.

تنش کم، برآورد گردد (۲۸). سایر محققان نیز به نتایج مشابه دست یافتند و بیان داشتند برآورد عملکرد کینوا در شرایط تنش شوری و کم‌آبی با استفاده از مدل AquaCrop با خطای بیش‌تری نسبت به تیمارهای

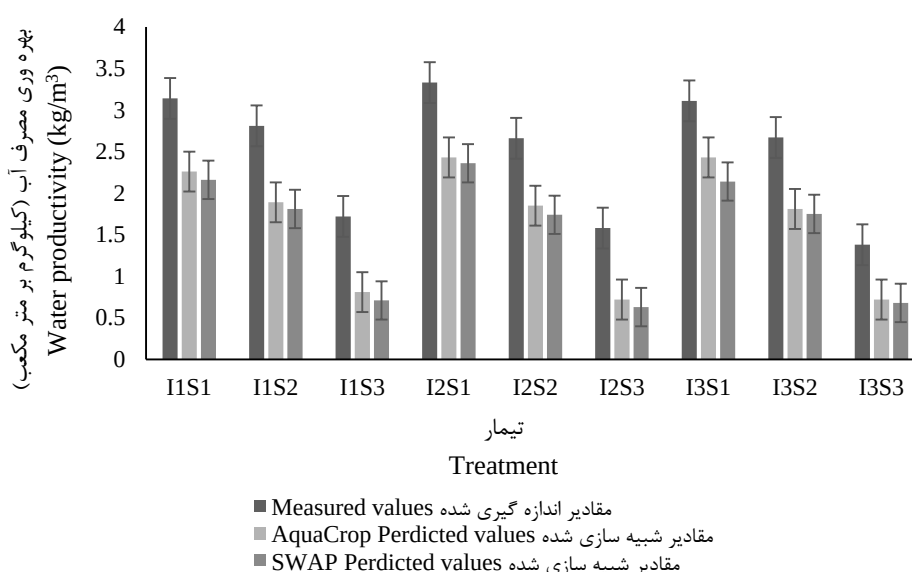


شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل AquaCrop و SWAP در تیمارهای مختلف شوری و کم‌آبی.

Figure 3. Comparison of simulated yield results with measured values using AquaCrop and SWAP models under different salinity and deficit irrigation treatments.

شده و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل ۱/۰۱ و ۰/۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود که به ترتیب در تیمارهای I1S3 و I3S1 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده ۰/۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در تیمارهای تحت تنش شوری و کم‌آبی شدید مقادیر بهره‌وری آب کم‌تری، هم در مقادیر اندازه‌گیری شده و هم در مقادیر شبیه‌سازی شده به دست آمد. این امر به دلیل عملکرد کم‌تر در اثر تنش‌های وارده به گیاه و کاهش رشد گیاه و توان تولیدی در تیمارهای تحت تنش نسبت به دیگر تیمارها است که مدل به خوب آن را نشان داده است.

مقایسه بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و SWAP در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل AquaCrop، بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل ۰/۹۱ و ۰/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود که به ترتیب در تیمارهای I1S3 و I3S1 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده ۰/۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در تمامی تیمارها مقدار شبیه‌سازی شده کم‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. نتایج به دست آمده از مدل SWAP نیز نشان داد بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده بهره‌وری مصرف آب با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل AquaCrop و SWAP در تیمارهای مختلف شوری و کم‌آبی.

Figure 4. Comparison of simulated water use efficiency results with measured values using AquaCrop and SWAP models under different salinity and deficit irrigation treatments.

شکل ۵ همبستگی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه را با استفاده از هر دو مدل AquaCrop و SWAP نشان می‌دهد. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و SWAP توانایی بالایی در شبیه‌سازی عملکرد محصول دارند، به‌طوری‌که همبستگی قوی بین عملکردهای پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده مشاهده شد. مقدار ضریب تعیین برای مدل SWAP برابر با ۰/۹۲۲۵ و برای مدل AquaCrop برابر با ۰/۹۳۸۱ بود که بیانگر دقت بالاتر AquaCrop در برآورد عملکرد است. شیب خط رگرسیون نیز در هر دو مدل کم‌تر از یک بود (۰/۷۸ برای SWAP و ۰/۸۳ برای AquaCrop، که نشان‌دهنده تمایل هر دو مدل به بیش‌برآورد عملکرد، به‌ویژه در سطوح عملکرد بالا می‌باشد؛ با این حال، شیب نزدیک‌تر به خط ۱:۱ در AquaCrop بیانگر تطابق بهتر این مدل با داده‌های واقعی و

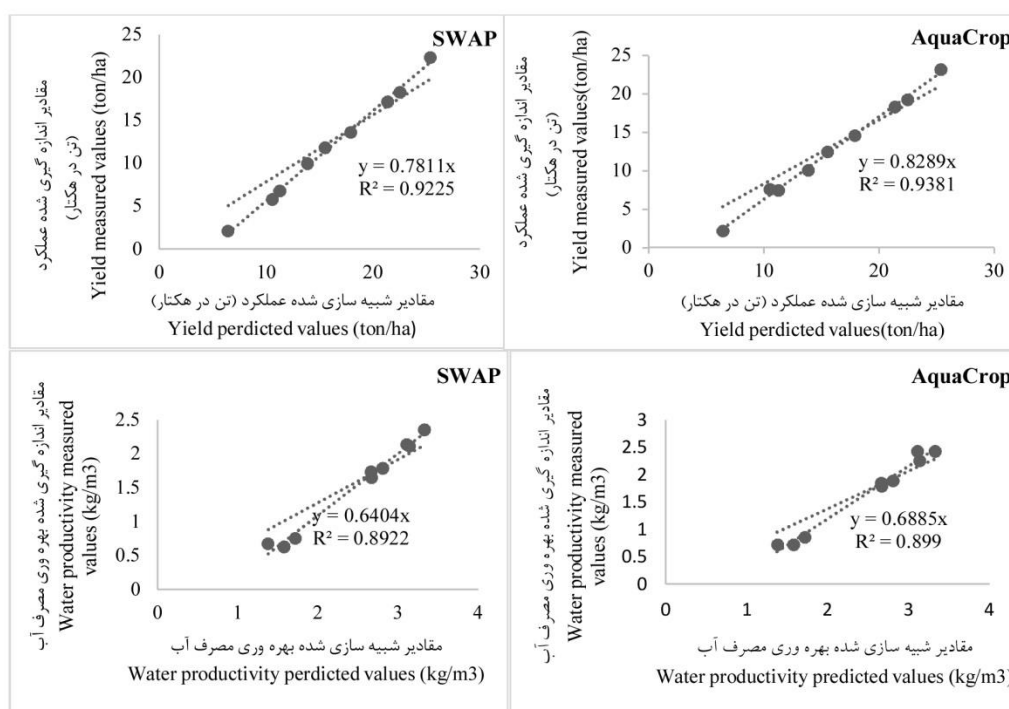
حساسیت بالاتر آن به تنش‌های محیطی از جمله کم‌آبی و شوری است. این نتایج با یافته‌های سایر محققین همخوانی دارد که گزارش کردند AquaCrop به دلیل ساختار ساده‌تر و تمرکز مستقیم بر پاسخ بیوماس و عملکرد به تنش آبی، قادر است عملکرد محصول را با دقت بالاتری نسبت به بسیاری از مدل‌های فیزیکی-مکانیکی شبیه‌سازی کند (۳۰ و ۲۹). در مقابل، اگرچه مدل SWAP به‌عنوان یک مدل مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی خاک-گیاه-اتمسفر توانایی مناسبی در شبیه‌سازی رشد و عملکرد دارد، اما مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این مدل در شرایط تنش شدید و عملکردهای بالا نیازمند کالیبراسیون دقیق‌تر پارامترهای گیاهی است (۱۳).

بررسی الگوی پراکنش نقاط در هر دو نمودار بیانگر وجود یک رابطه خطی قوی و معنی‌دار بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است که نشان‌دهنده توانایی مناسب هر دو مدل در بازتولید روند کلی

تغییرات بهره‌وری مصرف آب تحت شرایط مختلف آبیاری می‌باشد. در مدل AquaCrop، مقدار ضریب تعیین (۰/۸۹۹) حاکی از آن است که این مدل قادر است بخش عمده‌ای از تغییرات بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده را توضیح دهد. تمرکز نقاط داده در اطراف خط رگرسیون و پراکندگی نسبتاً محدود آن‌ها نشان می‌دهد که AquaCrop از پایداری مناسبی در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب برخوردار است. با این حال، شیب خط رگرسیون (۰/۶۸۸۵) که به‌طور محسوسی کمتر از خط ۱:۱ می‌باشد، بیانگر وجود کم‌برآوردی سیستماتیک در مقادیر شبیه‌سازی شده است؛ به‌ویژه در سطوح بالاتر بهره‌وری مصرف آب که فاصله نقاط از خط ۱:۱ افزایش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که AquaCrop اگرچه روند تغییرات را به‌خوبی بازتولید می‌کند، اما در شرایط کارایی بالاتر مصرف آب، حساسیت کم‌تری نسبت به مقادیر واقعی از خود نشان می‌دهد. در مدل SWAP نیز همبستگی قابل قبولی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به‌دست آمد ($R^2=0/8922$)، اما شیب خط رگرسیون (۰/۶۴۰۴) کم‌تر از AquaCrop بوده و نشان‌دهنده کم‌برآوردی شدیدتر بهره‌وری مصرف آب است. علاوه بر این، پراکندگی بیش‌تر نقاط در نمودار SWAP نسبت به AquaCrop بیانگر حساسیت بالاتر این مدل به تغییرات پارامترهای ورودی و پیچیدگی فرآیندهای شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقایسه این دو مدل نشان می‌دهد که اگرچه هر دو مدل در بازتولید روند کلی بهره‌وری مصرف آب موفق عمل

کرده‌اند، اما AquaCrop به دلیل ضریب تعیین بالاتر، شیب نزدیک‌تر به خط ۱:۱ و پراکندگی کم‌تر داده‌ها، عملکرد دقیق‌تر و پایداری نسبت به SWAP دارد. این برتری را می‌توان به ساختار مفهومی AquaCrop نسبت داد که بهره‌وری مصرف آب را مستقیماً از طریق ارتباط بین تولید بیوماس و تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی می‌کند. چنین رویکردی باعث می‌شود این مدل در شرایط محدودیت آب، پاسخ واقع‌بینانه‌تری نسبت به تغییرات مصرف آب نشان دهد. یافته‌های این مطالعه با نتایج سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد که گزارش کردند که AquaCrop در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب محصولات مختلف، به‌ویژه در شرایط تنش آبی، از دقت بالایی برخوردار بوده و معمولاً مقادیر R^2 بالاتر از ۰/۸۵ را نشان می‌دهد (۶ و ۸). هم‌چنین، مطالعات انجام‌شده نشان داد که AquaCrop اگرچه ممکن است در برخی شرایط دچار کم‌برآوردی شود، اما توانایی بالایی در بازتولید روند تغییرات بهره‌وری مصرف آب دارد (۳۱).

به‌طورکلی، نتایج حاضر نشان می‌دهد که AquaCrop گزینه‌ای کارآمدتر برای پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب تحت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و تنش شوری است، در حالی که SWAP می‌تواند برای تحلیل‌های دقیق‌تر فرایندهای فیزیکی و مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب فلفل دلمه تحت شرایط تنش شوری و کم‌آبی.
Figure 5. Measured and predicted values of yield and water use efficiency of bell pepper under salinity and deficit irrigation stress conditions.

عملکرد و بهره‌وری آب خوب بوده است. با توجه به مقادیر به‌دست آمده شاخص‌های آماری (جدول ۵) می‌توان بیان داشت، مدل SWAP نیز به خوبی توانسته است مقادیر عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه را در شرایط تنش شوری و کم‌آبی شبیه‌سازی کند. کارایی این مدل (EF) در شبیه‌سازی قابل قبول بود (۰/۸۴ و ۰/۸۲). در تحقیقی در کشور هلند گزارش شد که کارایی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی بین ۸۹/۹۵-۰/۰ متغیر بود که از مقادیر به‌دست آمده در تحقیق حاضر بیش‌تر بود (۳۲). در تحقیقی به بررسی مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و زیست‌توده ارقام مختلف ذرت تحت شرایط استفاده از آب شور با سیستم آبیاری قطره‌ای پرداخته شد. نتایج تحقیق با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت و بیان شد از هر دو مدل می‌توان برای شبیه‌سازی استفاده کرد و مدل AquaCrop اندکی بهتر عمل کرده است (۱۹).

جدول ۵ مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه در شرایط تنش شوری و کم‌آبی را با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده برای مدل AquaCrop، آماره‌های RMSE، NRMSE، MBE و R^2 به ترتیب ۲/۳۴، ۰/۱۶، ۱/۸۵- و ۰/۹۳ برای عملکرد و ۰/۳۶، ۰/۱۹، ۰/۴۲- و ۰/۸۹ برای بهره‌وری آب به دست آمد. مقادیر منفی شاخص MBE نشان داد مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی شده است. بالا بودن مقادیر R^2 و پایین بودن RMSE نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آن‌ها حول یک خط و برازش خوب مدل می‌باشد. با توجه به مقدار آماره EF (۰/۸۷ و ۰/۸۱) کارایی مدل AquaCrop، برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب قابل قبول بود. مقادیر NRMSE (۰/۱۶ و ۰/۱۹) نشان داد دقت مدل در شبیه‌سازی

بهره‌وری آب فلفل دلمه را در شرایط تنش شوری و کم‌آبی شبیه‌سازی کنند. بنابراین با توجه به مقادیر کم‌تر شاخص‌های خطا در مدل AquaCrop، این مدل نسبت به مدل SWAP بهتر عمل کرده است که احتمالاً به دلیل پیچیدگی مدل SWAP و داده‌های ورودی به این مدل می‌باشد. مدل SWAP به یک سری پارامترهای ورودی پیچیده نیاز دارد که در شرایط مزرعه نمی‌توان به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده از تحقیق سایر محققان همخوانی داشت (۳۳ و ۱۸).

به‌طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در این تحقیق و سایر تحقیقات انجام شده می‌توان گفت در همه مدل‌ها انتظار رسیدن به مقادیر اندازه‌گیری شده غیرمنطقی است. علت آن نیز می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌هایی باشد که برای شرایط کشت انجام می‌شود. این فرضیات در شرایط تنش بیش‌تر تغییر می‌کند و باعث می‌شود که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده بیش‌تر شود. اما در مجموع بر اساس نتایج جدول ۵ می‌توان گفت هر دو مدل به خوبی توانسته‌اند عملکرد و

جدول ۵- مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه در شرایط تنش شوری و کم‌آبی با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP.

Table 5. Statistical comparison of simulated yield and water productivity results of bell pepper under salinity and deficit irrigation stress conditions using AquaCrop and SWAP models.

R ²	MBE	NRMSE	RMSE	EF	پارامتر Parameter	مدل Model
0.93	-1.85	0.16	2.34	0.87	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons/ha)	AquaCrop
0.89	-0.42	0.19	0.36	0.81	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water productivity (kg/m ³)	
0.92	-1.83	0.17	2.89	0.84	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons/ha)	SWAP
0.89	-0.38	0.19	0.43	0.82	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) Water productivity (kg/m ³)	

نتیجه‌گیری کلی

خطا و ضریب تبیین نشان داد هر دو مدل به خوبی توانسته‌اند مقادیر عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه را در شرایط تنش شوری و کم‌آبی شبیه‌سازی کنند. کارایی هر دو مدل در شبیه‌سازی قابل قبول بود و هر دو مدل در شبیه‌سازی دچار خطای کم‌برآوردی شدند. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب در هر دو مدل، کم‌تر از ۱۰ درصد بود. نتایج نشان داشت هر دو مدل نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی به مدل‌ها، حساسیت متوسط تا کم داشتند. پارامترهای

توجه به بهره‌وری آب و ارتقای آن با اعمال روش‌ها و سیاست‌های کارآمد از جمله افزایش راندمان آبیاری، حذف نفوذ عمقی و کاهش تبخیر یکی از مؤثرترین راه‌کارهای مقابله با بحران آب و افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی است. تحقیق حاضر به منظور مقایسه و ارزیابی دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه در شرایط تنش شوری و کم‌آبی در منطقه سیستان انجام شد. نتایج آماره‌های

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه زابل و مسئولین آزمایشگاه‌های گروه مهندسی آب، جهت همکاری‌های کارساز و راهگشا در طی انجام این پژوهش کمال سپاسگزاری را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رساله دکتری نویسنده دوم نگارش شده است. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۱ در آزمایشگاه‌های آب‌و خاک دانشگاه زابل انجام شده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت تحقیق، تهیه و اصلاح نهایی مقاله و بازبینی مقاله، مشارکت در آنالیزها و نظارت بر کشت و کار و انجام طرح. نویسنده دوم: آماده‌سازی و اندازه‌گیری داده‌ها، انجام محاسبات.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر، رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837 انجام شده است.

ضریب رشد پوشش، ضریب کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال‌شده بر خروجی مدل AquaCrop حساسیت زیادی داشتند. بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری پارامترهایی که ضریب حساسیت متوسط تا زیاد است، دقت بیش‌تری به عمل آورد، زیرا باعث خطای قابل‌توجهی در خروجی مدل می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از هر دو مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب فلفل دلمه در شرایط تنش شوری و کم‌آبی استفاده کرد. ولی دقت مدل AquaCrop اندکی بهتر بود. باین‌حال، این تحقیق محدود به یک منطقه و شرایط خاص بود. همچنین، فرضیات مدل‌ها ممکن است در شرایط متفاوت به همان دقت عمل نکنند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزیابی مدل‌ها در مناطق و شرایط اقلیمی مختلف، بررسی سایر گونه‌ها و محصولات، و بهبود پارامترهای حساس برای افزایش دقت شبیه‌سازی انجام شود. نتایج مطالعه می‌تواند به کشاورزان و محققان کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در شرایط استفاده از آب‌شور و کم‌آبایی در منطقه سیستم اتخاذ کنند. همچنین نتایج چنین ارزیابی‌هایی می‌تواند به بهبود مدل‌ها و دقیق‌تر کردن آن‌ها برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاهان کمک کند. افزون بر این، در این مطالعه عدم قطعیت مدل‌ها بررسی نشد. درحالی‌که انجام تحلیل عدم قطعیت می‌تواند به شناسایی دامنه تغییرات نتایج و برآورد دقت واقعی مدل‌ها کمک کند. در نظر گرفتن عدم قطعیت ورودی‌ها و پارامترهای حساس می‌تواند توان پیش‌بینی مدل‌ها را افزایش داده و اطمینان بیشتری برای کاربرد نتایج در مدیریت مزرعه و تصمیم‌گیری کشاورزان فراهم سازد. بنابراین توصیه می‌شود در مطالعات آینده ارزیابی عدم قطعیت به‌طور کامل انجام شود تا قابلیت اطمینان مدل‌ها در شرایط مختلف تنش شوری و کم‌آبی دقیق‌تر مشخص گردد.

منابع

- 1.FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point. FAO.
- 2.Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- 3.Van Dam, J. C., et al. (1997). SWAP Version 2.0: Theory Description and User Manual. Wageningen Agricultural University.
- 4.Todorovic, M., et al. (2014). Comparison of AquaCrop and SWAP models in simulating tomato growth under water stress. *Irrigation Science*, 32(2), 313-329. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0421-7>.
- 5.Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1435-1446. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.020>.
- 6.Steduto, P., et al. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. *Agricultural Water Management*, 96(3), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.011>.
- 7.Tourajzadeh, O., Piri, H., & Barati, M. (2024). Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and biochar and nanobiochar application. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(1), 1-25.
- 8.Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2017). AquaCrop: FAO's Crop-Water Productivity Model. FAO.
- 9.Kaviani, B., et al. (2018). Simulation of growth and water productivity of bell pepper under deficit irrigation. *Journal of Plant Nutrition*, 41(10), 1342-1353. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1450426>.
- 10.Gharibvand, J., Piri, H., Haghighatjoo, P., & Naserin, A. (2025). Sensitivity analysis of the AquaCrop model under salinity and water stress in tape drip irrigation in quinoa plant. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32(1).
- 11.Kool, D., et al. (2014). Review of SWAP model applications. *Agricultural Water Management*, 144, 123-134.
- 12.Karimi Avargani, H. A., Rahimikhoob, A., & Nazari Fard, M. (2019). Sensitivity analysis of AquaCrop model for barley in Pakdasht region. *Journal of Water and Soil Science*, 23(3), 53-63. [In Persian]
- 13.Kroes, J. G., Van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., & Van Walsum, P. E. V. (2017). SWAP Version 4: Theory Description and User Manual. Alterra Report 2780, Wageningen University & Research.
- 14.Nisi, K., Aghdarnajad, A., & Abbasi, F. (2023). Evaluation of the SWAP model for simulating maize yield and water productivity under different water and fertilizer management practices. *Irrigation and Drainage, Iran*, 17(3), 573-584.
- 15.Mousavi, A. H., Egdernezhad, A., & Gilani, A. (2019). Yield and water use efficiency simulation of different rice cultivars under various cultivation methods using AquaCrop and SWAP. *Water Management in Agriculture*, 6(1), 123-134.
- 16.Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687.
- 17.Kurunç, A., Ünlükara, A., & Cemek, B. (2011). Salinity and drought affect yield response of bell pepper similarly. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil & Plant Science*, 61(3), 207-213.

18. Gammoudi, N., Yahia, L. B., Lachiheb, B., & Ferchichi, A. J. J. (2016). Salt response in pepper (*Capsicum annuum* L.): Components of photosynthesis inhibition, proline accumulation and K^+/Na^+ selectivity. *Journal of Aridland Agriculture*, 2, 1-12.
19. Khan, M. I. R., et al. (2019). Salinity and drought stress responses in pepper (*Capsicum annuum* L.): A review. *Agricultural Water Management*, 210, 42-56.
20. Golshani, H., & Khoshsimaei Chenar, M. (2024). Evaluation of AquaCrop and SWAP models in simulating the growth and biomass of different maize cultivars under saline water drip irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 615-636.
21. Negaresh, H., & Latifi, L. (2018). The origin of wind deposits in the east of Zabol through morphoscopy and physical and chemical analysis of sediments. *Geography and Environmental Planning*, 20(1), 1-22.
22. Liu, F., Savic, S., Jensen, C. R., Shahnazari, A., Jacobsen, S., & Andersen, M. N. (2006). Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation. *Scientia Horticulturae*, 111, 128-132.
23. Payero, J. O., Melvin, S. R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 84, 101-112.
24. Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, version 1.0*. EPA Report 600/2-91/065, USDA-ARS.
25. Ansari, M. A., Egdernezhad, A., & Ebrahimipak, N. A. (2022). Evaluation of SWAP for simulation of potato and determination of adequate irrigation depth. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 16(5), 891-903.
26. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., & Cusicanqui, J. A. (2009). Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101, 499-508.
27. Ahmadee, M., Ghanbarpour, M., & Egdernezhad, A. (2021). Applied irrigation water of wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 15-30. [In Persian]
28. Nasrolahi, A. H., Ahmadee, M., & Rustum, R. (2024). Sensitivity analysis of AquaCrop model for winter wheat under different water supply conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150(2).
29. 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. *Agricultural Water Management*, 96, 351-363.
30. Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66.
31. Greaves, G. E., & Wang, Y. M. (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in northern China. *Agricultural Water Management*, 168, 85-97.
32. Shabani, A., Zakarinia, M., & Hossam, M. (2018). Evaluation of AquaCrop model in simulating soybean yield under salinity stress and different irrigation levels. *Irrigation Science and Engineering*, 42(1), 49-62. [In Persian]
33. Karimi, Sh., Egdernezhad, A., & Nakhjavanimoghaddam, M. M. (2021). Evaluation of SWAP for simulation of medium and early corn cultivars under different plant densities under sprinkler irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(6), 1893-1907.