



Evaluation of AquaCrop and SWAP models in simulating the growth and biomass of different maize cultivars under the conditions of using saline water with drip irrigation system

Hossein Golshani¹ | Morteza Khoshimaie Chenar²

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail:

Golshani.hossein@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: khoshima.mortaza@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 11, 2024

Revised: March. 25, 2024

Accepted: Apr. 8, 2024

Published online: June. 2024

Keywords:

Calibration and Validation,
Canopy Cover,
Leaf Area Index,
Plant Modeling,
Salinity Stress.

ABSTRACT

Using simulation models is a key strategy in agricultural water management and an effective way to predict the impact of irrigation management and water quality on crop yield. This study aimed to evaluate the performance of the SWAP and AquaCrop models in simulating the growth and biomass production of three maize varieties under the conditions of using saline water for irrigation with a drip irrigation system at the research farm of Tehran University of Agriculture and Natural Resources Campus. In order to calibrate and validate the models, field data obtained from a factorial experiment with two factors of maize variety (SC704, 400, and 260) and irrigation water salinity (0.7, 3, and 5 dS/m) were used. In the validation stage of the AquaCrop model, the R^2 , RMSE, and NRMSE statistics for the canopy cover (CC) showed a high level of agreement between the measured and simulated data, with values of 0.953, 5.69, and 8% respectively. For the SWAP model, the calculated statistics for the leaf area index (LAI) were 0.477, 1.610, and 54.2%, respectively. Despite the poor performance of the SWAP model in estimating LAI, both the SWAP and AquaCrop models effectively simulated the biomass of maize cultivars under different treatments. In the calibration and validation stage, RMSE and NRMSE of both models were less than 0.5 ton/ha, with 3% (calibration) and 1 ton/ha, 7% (validation), respectively. In general, both models can be used in various studies for different maize cultivars under irrigation water and soil salinity conditions.

Cite this article: Golshani, H., & Khoshimaie Chenar, M. (2024). Evaluation of AquaCrop and SWAP models in simulating the growth and biomass of different maize cultivars under the conditions of using saline water with drip irrigation system, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (4), 615-636. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372500.669664>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372500.669664>



ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و زیست‌توده ارقام مختلف ذرت تحت شرایط استفاده از آب شور با سیستم آبیاری قطره‌ای

حسین گلشانی^۱ | مرتضی خوش‌سیمای چنار^۲ ✉

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Golshani.hossein@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: khoshsima.mortaza@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یک استراتژی در مدیریت مصرف آب کشاورزی و روشی مؤثر در پیش‌بینی تأثیر مدیریت آبیاری و کیفیت آب بر عملکرد محصول است. این مطالعه با هدف ارزیابی دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و زیست‌توده سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور با سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شد. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها از داده‌های مزرعه‌ای حاصل از یک آزمایش فاکتوریل با دو عامل رقم ذرت (سه رقم ذرت علوفه‌ای سینگل کراس ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰) و شوری آب آبیاری (سه سطح شوری آب آبیاری ۰/۷، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر) استفاده شد. در مرحله صحت‌سنجی برای مدل AquaCrop، آماره‌های R^2 ، RMSE و NRMSE در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده درصد پوشش سبز (CC) به‌ترتیب برابر ۰/۹۵۳، ۵/۶۹ و ۸ درصد و برای مدل SWAP آماره‌های مذکور برای شاخص سطح برگ (LAI) به‌ترتیب ۰/۴۷۷، ۱/۶۱۰ و ۵۴/۲ درصد محاسبه شد. برخلاف نتایج ضعیف مدل SWAP در برآورد LAI، هر دو مدل AquaCrop و SWAP زیست‌توده ارقام ذرت در تیمارهای مختلف را به‌خوبی شبیه‌سازی کردند. در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی RMSE و NRMSE هر دو مدل به‌ترتیب کمتر از ۰/۵ تن در هکتار، ۳ درصد (واسنجی) و یک تن بر هکتار و ۷ درصد (صحت‌سنجی) به‌دست آمد. به‌طور کلی می‌توان از هر دو مدل در مطالعات مختلف برای ارقام متفاوت ذرت علوفه‌ای تحت شرایط شوری آب آبیاری و خاک استفاده کرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۵

تاریخ انتشار: تیر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

تنش شوری،
شاخص سطح برگ،
کنوپی کاور،
مدل‌سازی گیاهی،
واسنجی و صحت‌سنجی.

استناد: گلشانی، حسین و خوش‌سیمای چنار، مرتضی (۱۴۰۳). ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و زیست‌توده ارقام مختلف ذرت تحت شرایط استفاده از آب شور با سیستم آبیاری قطره‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۴)، ۶۱۵-۶۳۶

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372500.669664>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372500.669664>

مقدمه

کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان است. حدود ۷۰ درصد کل مصرف آب به آبیاری اراضی اختصاص دارد (UNESCO, 2020). پایداری بسیاری از مناطق آبیاری واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل دسترسی محدود به منابع آبی تهدید می‌شود (Reca Khafajeh et al., 2018; Garcia-Caparros et al., 2017). مدیریت آب یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است (Li et al., 2019; Mekonnen and Hoekstra, 2016). به طوری که جهان با کاهش آب شیرین در نتیجه افزایش جمعیت مواجه است (Abdelkhalik et al., 2019). ایران نیز مانند بسیاری از کشورهای دیگر با بحران جدی آب مواجه بوده و عوامل مختلفی از جمله رشد جمعیت، پدیده‌های طبیعی همچون خشک‌سالی و تغییر الگوهای اقلیمی و سوء مدیریت منابع آبی، وضعیت موجود را وخیم‌تر کرده است (Nouri et al., 2023; عابدزاده و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر کمبود آب، نگرانی‌های جدی در مورد کیفیت آب آبیاری نیز وجود دارد. بسیاری از مناطق، تحت تأثیر افزایش شوری منابع آب زیرزمینی ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از لایه‌های آبدار قرار دارند (Colombani et al., 2015). بنابراین، منابع آب نامتعرف در بسیاری از نقاط جهان در حال تبدیل شدن به منابع آب ضروری هستند (Scheierling and Tréguer, 2018). این مناطق به شدت نیاز به طراحی استراتژی‌های مدیریت آب دارند که شامل منابع آب نامتعرف باشد تا با این واقعیت مواجه شوند که آبیاری سنتی با آب معمولی نمی‌تواند نیازهای فعلی و آتی کشاورزی آبی را برآورده کند (Burn et al., 2017; Kaner et al., 2015). یکی از راهکارها و راهبردهای معمول در مناطق کم‌آب استفاده دو یا چند منبع از منابع آب مختلف مانند منابع آب شیرین، آب شور و لب‌شور زیرزمینی شده است (Alvarez-Mendez et al., 2021; Daghari et al., 2020; Li et al., 2019). خوش‌سیمای چنار و نوری، ۱۳۹۸؛ یزدخواستی و همکاران، ۱۳۹۷).

در مناطقی که گیاهان تحت آبیاری هستند، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده بهینه از آب، ضروری به نظر می‌رسد. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفاده بهینه از آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاربرد مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر می‌باشد. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور مفید بوده، اما محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز دارند؛ از جمله محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی و محیطی، کوتاه بودن زمان آزمایش، محدودیت تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می‌شود. گزینه‌های مدیریتی که به وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند به دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌گردند (خوش‌سیمای چنار و همکاران، ۱۴۰۰). از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد. دقت مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های ورودی بستگی داشته و در صورت واسنجی صحیح، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های صحرایی و نیز صرف زمان و هزینه، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری به کار گرفته شوند (Sandhu & Irmak, 2019a, b; نیسی و همکاران، ۱۴۰۲).

پیشینه پژوهش

مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک و همچنین پیش‌بینی پاسخ گیاه به رطوبت و شوری خاک، می‌توانند ابزار مفیدی برای ارزیابی اثرات استراتژی‌های آبیاری با آب شور بر کیفیت خاک و عملکرد محصول باشند (Wang et al., 2016; Kumar et al., 2015). در سال‌های اخیر، مدل‌های عددی مختلفی مانند SWAP, HYDRUS, SALTMED و UNSATCHEM با موفقیت برای ارزیابی اثر آبیاری با آب شور بر گیاهان مختلف و رژیم‌های مختلف استفاده شده‌اند (خوش‌سیمای چنار و همکاران، ۱۴۰۰; Liu et al., 2019; Rasouli et al., 2013; Soothar et al., 2021). با این حال، این مدل‌ها معمولاً به پارامترهای ورودی قابل توجه و فرآیندهای واسنجی و اعتبارسنجی پیچیده نیاز دارند. از سال ۲۰۰۹ تاکنون، مدل AquaCrop به طور فزاینده‌ای برای ارزیابی پاسخ محصول به مدیریت‌های مختلف استفاده از آب شور در شرایط مزرعه، انتخاب شده است (Soomro et al., 2020; Hammami et al., 2020). مهران و همکاران، ۱۳۹۵). AquaCrop یک مدل مبتنی بر آب است و به طور گسترده برای خاک‌ها، محصولات و اقلیم‌های مختلف آزمایش شده است تا رشد و تولید محصول تحت استراتژی‌های مختلف رطوبت خاک و آبیاری شناسایی شود (Ran et al., 2009; Raes et al., 2018; Huang et al., 2022). باید به این نکته توجه کرد که سادگی مدل که AquaCrop به عنوان صفت از آن بهره‌مند است، نباید باعث شود که مهم‌ترین ویژگی در ارزیابی مدل‌ها که دقت پیش‌بینی و شبیه‌سازی آن است؛ نادیده گرفته شود. Hammami و همکاران (2020) به منظور بررسی تأثیر شوری‌های آب مختلف بر رشد و عملکرد دو رقم مختلف جو از مدل AquaCrop استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop با دقت خوبی زیست‌توده و CC دو رقم جو را شبیه‌سازی می‌کند. برای زیست‌توده شاخص RMSE

در واسنجی و صحت‌سنجی را به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۹ تن در هکتار گزارش کردند. همچنین این شاخص برای CC به ترتیب ۱/۵ و ۲/۲۵ درصد گزارش کردند. مهرآذر و همکاران (۱۳۹۵) از مدل AquaCrop در شرایط تنش شوری برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت استفاده کردند و نشان دادند بر اساس شاخص آماری CRM، این مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت، متأثر از تنش شوری نسبت به عملکرد اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه، دچار خطای بیش‌برآورد شد. همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش میزان شوری، عملکرد شبیه‌سازی شده، دچار خطای بیشتری می‌شود.

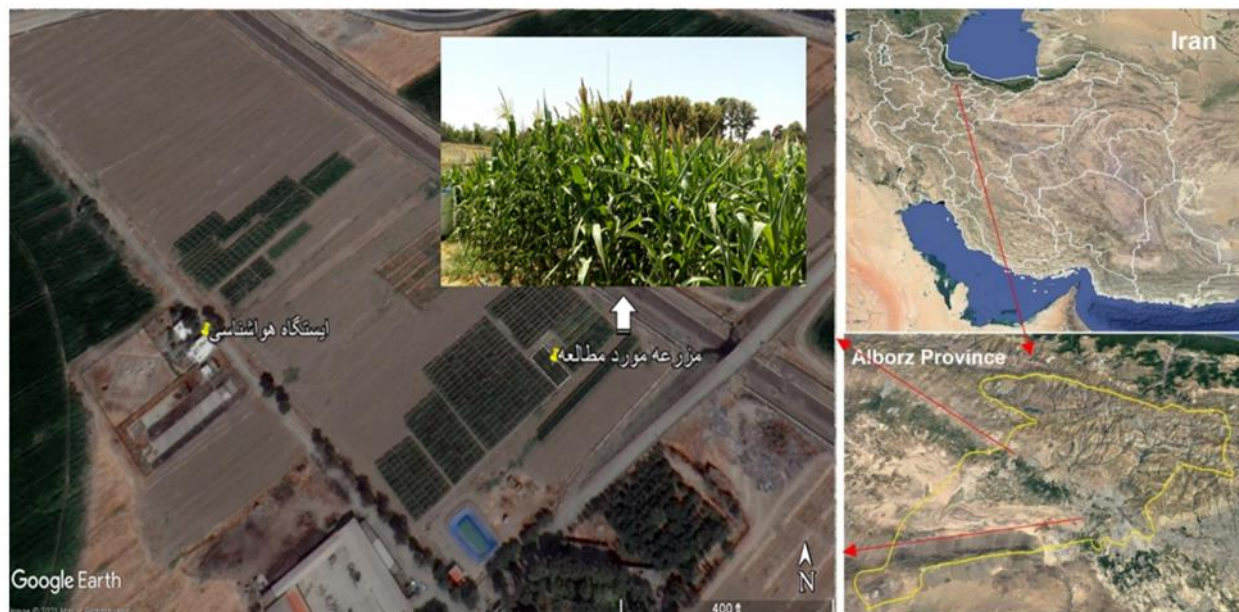
از طرفی یکی از مدل‌هایی که در شرایط استفاده از آب شور و شبیه‌سازی شوری خاک از دقت بسیار خوبی برخوردار است و توسط محققین بسیاری این دقت خوب گزارش شده است (خوش‌سیمای چنار و همکاران، ۱۴۰۰؛ Hassanli et al., 2016; Kamyab-Talesh et al., 2017)، مدل SWAP است. SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیکی بر پایه ارتباط فیزیکی پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه است. این مدل از زیرمجموعه‌های مختلفی برای تحلیل اثرات متقابل میان انتقال آب و املاح، رشد و عملکرد محصول تحت رژیم‌های مختلف عمق و شوری آب آبیاری، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و پیش‌بینی شوری نیم‌رخ خاک در طولانی مدت برخوردار است (Kroes et al., 2017). 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 (Kroes et al., 2017). به همین دلیل مدل SWAP جزء مدل‌های کربن محور دسته‌بندی می‌شود (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ نیسی و همکاران، ۱۴۰۲). Kumar و همکاران (2015) مطالعه‌ای به منظور ارزیابی قابلیت مدل SWAP برای شبیه‌سازی حرکت نمک و عملکرد نسبی سه رقم مقاوم و یک رقم حساس به شوری گیاه گندم در منطقه آب و هوایی نیمه‌خشک هند انجام داده و گزارش کردند که مدل SWAP به خوبی قادر به شبیه‌سازی حرکت نمک در منطقه توسعه ریشه و عملکرد نسبی گندم در شرایط استفاده از آب شور است. Hassanli و همکاران (2016) از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی ذرت در شرایط آب شور استفاده کردند. این محققان نشان دادند که ضریب تبیین برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برابر با ۰/۸۱ بود. ایشان از دو مدل AquaCrop و SALTMED نیز برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط مشابه استفاده کرده و گزارش کردند که دقت مدل SWAP بسیار بهتر از دو مدل دیگر است. همچنین Kamyab-Talesh و همکاران (2017) به منظور تعیین آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد محصولات گندم، جو و ذرت از مدل SWAP در بخش مرکزی ایران (سمنان) استفاده کردند که نتایج مطالعه ایشان نشان داد مدل SWAP عملکرد هر یک از محصولات فوق را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

انجام تحقیقات برای ارزیابی دقت مدل‌های AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با آب شور به دلایل متعددی لازم است. استفاده از آب شور برای آبیاری به دلیل کمبود آب در بسیاری از مناطق کشور رواج یافته است. بنابراین، ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌سازی محصول در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در این شرایط مهم است. از طرفی استفاده از ارقام متنوع ذرت با طول دوره رشد متفاوت (زودرس، میان‌رس و دیررس) در کشور گسترش یافته است. مطالعات متعددی عملکرد مدل‌های AquaCrop و SWAP را در شبیه‌سازی رشد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در شرایط مختلف ارزیابی کرده‌اند. با این حال، نیاز به ارزیابی دقت مدل برای ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با آب شور وجود دارد. ارزیابی دقت این مدل‌ها برای ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری آب شور می‌تواند به کشاورزان و محققین کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد استراتژی‌های مدیریت آبیاری و انتخاب محصول بگیرند. همچنین نتایج چنین ارزیابی‌هایی می‌تواند به بهبود مدل‌ها و دقیق‌تر و قابل اعتمادتر کردن آن‌ها برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با آب شور کمک کند. بنابراین هدف از این مطالعه ارزیابی دو مدل SWAP و AquaCrop در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰) تحت شرایط استفاده از آب شور برای آبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه بلوک (تکرار) انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل سه رقم ذرت سینگل کراس ۷۰۴، سینگل کراس ۴۰۰ و سینگل کراس ۲۶۰ (V1، V2 و V3) و سه سطح شوری آب آبیاری ۰/۷، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر (S1، S2 و S3) برای اعمال تنش شوری بود. این آزمایش در مجموع با ۹ تیمار و ۲۷ کرت آزمایشی در سال ۱۳۹۶ در مزرعه پژوهشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج با طول جغرافیایی ۴۹° ۵۰' شرقی، عرض

جغرافیایی ۴۸' ۳۵° شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۲۹۲/۹ متر انجام شد (شکل ۱). مساحت هر کرت تقریباً ۱۲ مترمربع (۳×۴) که شامل چهار ردیف کشت گیاه ذرت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و طول چهار متر بود.



شکل ۱. موقعیت مزرعه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی

بعد از کاشت، همه تیمارها با منبع آب مزرعه آبیاری شدند. با توجه به اندازه‌گیری انجام‌شده هدایت الکتریکی آب مزرعه ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد که نشان‌دهنده کیفیت خوب (Ayers & Westcot, 1985) آن است. تبخیر - تعرق مرجع توسط نرم‌افزار ETo Calculator (Raes & Munoz, 2009) و بر اساس رابطه پنمن - مانیتث (Allen et al., 1998) و با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه که در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مجاور مزرعه ثبت می‌گردید، به دست آمد. داده‌های روزانه هواشناسی شامل دمای هوای بیشینه و کمینه، متوسط رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد، ساعات آفتابی و بارش بود. سپس با توجه به نشریه فائو ۵۶، ضریب گیاهی در دوره‌های ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب ۰/۳۳، ۱/۲ و ۰/۶۲ اصلاح گردید. با ضرب تبخیر - تعرق مرجع در ضریب گیاهی تبخیر - تعرق گیاهی محاسبه گردید. سپس با توجه به روش آبیاری و حداکثر تبخیر - تعرق ذرت، دور آبیاری سه روز در نظر گرفته شد. با جمع تبخیر - تعرق سه روزه و ضرب آن در مساحت هر کرت آزمایشی، حجم آبی که باید به هر تیمار داده شود، محاسبه گردید. آبیاری مزرعه به صورت قطره‌ای (راندمان ۹۰ درصد) و با استفاده از نوار تیپ با فاصله بین قطره‌چکان‌های ۳۰ سانتی‌متر و دبی دو لیتر بر ساعت صورت گرفت. نوارهای آبیاری نیز به موازات ردیف‌های کاشت با اتصالات مربوطه به لوله‌های لترال متصل شده و کرت‌ها آبیاری شدند. اعمال تنش شوری از مرحله چند برگی شدن ذرت (ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری) آغاز شد. برای تهیه آب شور قبل از اعمال هر تیمار، دبی لوله آبیاری و دبی تزریق و نتوری به صورت حجمی اندازه‌گیری شده و سپس مقدار شوری مخزن با استفاده از رابطه (۱) مشخص شد.

$$C^* = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن C^* مقدار شوری مورد نظر برای هر تیمار و C_1 و C_2 به ترتیب مقدار شوری آب آبیاری و شوری مخزن بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و Q_1 و Q_2 دبی لوله آبیاری و تزریق و نتوری بر حسب لیتر بر ساعت است. برای تهیه آب با شوری‌های مختلف، ابتدا نمک خام صنعتی (موسوم به نمک شکر، NaCl) تهیه‌شده را در مخزن تهیه آب شور به میزانی که محاسبه شد، حل می‌گردید و به وسیله و نتوری به داخل لوله آبیاری تزریق می‌شد. میزان نمک مورد استفاده برای هر سطح شوری از رابطه (۲) (Rhoades et al., 1992) محاسبه گردید.

$$TDS = K \times 640 \times EC \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن TDS مقدار کل نمک‌های محلول در آب بر اساس میلی‌گرم بر لیتر و EC هدایت الکتریکی محلول آب شور بر حسب دسی‌زیمنس بر متر است. K ضریبی است که به درصد خلوص نمک مورد آزمایش بستگی دارد که با توجه به نمکی که در این آزمایش استفاده شد، این ضریب برابر ۰/۸۶ به دست آمد (خوش‌سیمای چنار و نوری، ۱۳۹۸). با توجه به نمونه‌برداری‌های اواسط فصل مشاهده

گردید که جبهه رطوبتی و ریشه ذرت بیش از ۶۰ سانتی متر عمق خاک پیشروی نکرده است؛ نمونه برداری از خاک مزرعه در سه عمق به منظور تعیین بافت خاک انجام شد و بافت خاک از طریق مثلث بافت خاک USDA تعیین گردید. با استفاده از دستگاه سلول فشاری، رطوبت جرمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به دست آمد که با ضرب مقادیر حاصله در چگالی ظاهری، رطوبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به دست آمد. همچنین با استفاده از قیف بوختر و پمپ خلأ، هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک (ECe) در اعماق مختلف مزرعه به دست آمد. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

پارامترهای اندازه‌گیری شده	لایه خاک (cm)		
	۶۰-۴۰	۴۰-۲۰	۲۰-۰
شن (%)	۳۳	۲۸	۳۰
سیلت (%)	۳۸	۴۲	۴۰
رس (%)	۲۹	۳۰	۳۰
بافت خاک (-)	لومی رسی	لومی رسی	لومی رسی
رطوبت ظرفیت زراعی (% حجمی)	۲۹/۵	۲۹/۸	۳۰/۲
رطوبت نقطه پژمردگی (% حجمی)	۱۳/۷	۱۳/۵	۱۳/۵
هدایت هیدرولیکی (سانتی متر بر روز)	۱۰/۵۷	۱۲/۷۵	۱۲/۷۷
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۴۱	۱/۴۰	۱/۳۵
هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۱/۰۶	۱/۰۸	۰/۹۶۷
pH (-)	۷/۸۱	۷/۸۳	۷/۷۱
مواد آلی (%)	۱/۲	۱/۴	۱/۶

در طول دوره رشد، رشد گیاه بر پایه سطح برگ و وزن خشک بوته یک هفته بعد از اعمال تیمار تا پایان رسیدگی در چند نوبت اندازه‌گیری گردید. شاخص سطح برگ^۱ (LAI) برای مدل SWAP و درصد پوشش سبز^۲ (CC) برای مدل AquaCrop به ترتیب با استفاده از دستگاه Area meter مدل C1-203 ساخت کشور آمریکا و نرم‌افزار Image Canopy ورژن ۳/۶ در ۶ نوبت برای ارقام زودرس و ۷ نوبت برای رقم دیررس اندازه‌گیری شد. با توجه به تفاوت سه نوع وارسته ذرت، برداشت و نمونه‌برداری از محصول به صورت علفه‌ای برای رقم‌های زودرس سینگل کراس ۴۰۰ و ۲۶۰ (V2, V3) و رقم دیررس سینگل کراس ۷۰۴ (V1) مطابق جدول ۲ انجام گرفت.

جدول ۲. زمانبندی کاشت، برداشت و مقادیر آبیاری اندازه‌گیری شده سه رقم ذرت علفه‌ای مورد آزمایش

رقم ذرت	SC 260 (V3)	SC 400 (V2)	SC 704 (V1)
تاریخ کاشت	۲۲ خرداد ۱۳۹۶	۲۲ خرداد ۱۳۹۶	۲۲ خرداد ۱۳۹۶
تعداد نوبت‌های آبیاری	۲۳	۲۳	۲۸
مقدار آب آبیاری (mm)	۵۶۸/۸۹	۵۶۸/۸۹	۶۵۴/۸۱
میزان بارندگی در طول دوره رشد (mm)	۶/۸	۶/۸	۶/۸
تاریخ برداشت	۱۴ شهریور ۱۳۹۶	۱۴ شهریور ۱۳۹۶	۲۹ شهریور ۱۳۹۶

مدل SWAP

مدل SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیکی یک بعدی در مقیاس مزرعه مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی است که حرکت عمودی آب، املاح و گرما را در هر دو شرایط خاک اشباع و غیراشباع شبیه‌سازی می‌کند. این مدل برای شبیه‌سازی رطوبت خاک، انتقال املاح و رشد و عملکرد محصول در مقیاس مزرعه در طول دوره رشد توسعه یافته است. بیلان آب مورد استفاده در مدل، تعامل بین آبیاری، تبخیر - تعرق و پارامترهای هیدرولوژیکی در یک ستون خاک غیراشباع و اشباع است (رابطه ۳).

$$\Delta W = P + I_{irr} + q_{bot} - ET_a - E_i - E_w - R - D_r - S_t \quad \text{رابطه ۳}$$

1 Leaf Area Index, LAI

2 Canopy Cover, CC

که در آن ΔW تغییرات رطوبت در نیم‌رخ خاک، P بارش ناخالص، I_{irr} آب آبیاری، q_{bot} فلاکس جریان از انتهای ستون خاک، ET_a تبخیر - تعرق واقعی گیاه، E_i تبخیر آب از کانوی گیاه، E_w تبخیر آب از ذخیره سطحی در خاک، R رواناب، D_r زهکشی مصنوعی، S_r ذخیره سطحی آب و همگی بر اساس (LT^{-1}) هستند. از SWAP می‌توان برای شبیه‌سازی رطوبت خاک، انتقال املاح، گرما، ناهمگنی خاک، تبخیر - تعرق روزانه، رشد و عملکرد محصول، آبیاری مزرعه و نیاز زهکشی آن استفاده کرد. ترکیب معادلات داری و پیوستگی منجر به معادله عمومی جریان آب در خاک‌های اشباع و غیر اشباع که تحت عنوان معادله ریچاردز شناخته می‌شود و به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a(h) - S_d(h) - S_m(h) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن θ رطوبت حجمی $(cm^3 cm^{-3})$ ، t زمان (d) ، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی $(cm d^{-1})$ ، h هد فشار رطوبت خاک (cm) ، z ارتفاع نقطه از سطح مینا (cm) ، $S_a(h)$ مقدار جذب آب توسط ریشه گیاه $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$ ، $S_d(h)$ مقدار زهکشی از منطقه اشباع $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$ و $S_m(h)$ مقدار تبادل با منافذ ماکرو موجود در خاک $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$ است. مدل SWAP از معادله ریچاردز به‌طور یکپارچه برای منطقه اشباع و غیر اشباع استفاده می‌کند. برای حل این معادله از روش عددی تفاضل‌های محدود و اعمال شرایط مرزی و استفاده از توابع هیدرولیکی خاک استفاده می‌گردد. توابع هیدرولیکی خاک به‌عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی، رطوبت خاک و بار فشاری آب خاک تعریف می‌شوند (Kroes et al., 2017).

مدل SWAP دارای سه ماژول برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه است. الف) ماژول تفصیلی رشد گیاه، ب) ماژول تفصیلی رشد چمن^۲ و ج) ماژول ساده رشد گیاه^۳. در مطالعه حاضر، از ماژول تفصیلی گیاه برای شبیه‌سازی رشد گیاه و عملکرد آن استفاده شده است (Kroes et al., 2017). ماژول تفصیلی گیاه در SWAP بر اساس مدل WOFOST (Van Diepen et al., 1989; Boogaard et al., 1998)، یک مدل شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل کمی رشد و تولید محصولات زراعی یکساله است. شرح کامل WOFOST در سایت www.wur.nl در دسترس است. WOFOST با کمی‌سازی فتوسنتز، تنفس، ذخیره و نحوه تأثیرپذیری آن‌ها از شرایط محیطی، رشد گیاه را شبیه‌سازی می‌کند. در بخش توسعه فنولوژیکی، بر اساس مجموع درجه حرارت، کل دوره رشد گیاه (DVS^4) را به دو بخش دوره رویشی، از جوانه‌زنی $(DVS = 0)$ تا زمان گلدهی $(DVS = 1)$ و دوره زایشی، از گلدهی تا زمان رسیدگی فنولوژیکی $(DVS = 2)$ تقسیم می‌کند و نرخ رشد گیاه را برآورد می‌نماید.

مدل AquaCrop

برای شبیه‌سازی فرایند رشد گیاه و تخمین عملکرد از مدل AquaCrop (ورژن ۶) که سازمان خواروبار جهانی (فاو) توسعه داده است، استفاده شد. این مدل با تفکیک تبخیر - تعرق واقعی (ET_a) به تبخیر از سطح خاک (E_a) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت توسعه یافت. جدا نمودن ET_a به E_a و T_a سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، حائز اهمیت است (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۵). این مدل قادر است میزان عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبایی و در صورت وجود تنش شوری تخمین بزند. در این مدل برای تخمین میزان عملکرد محصول از رابطه (۵) که بر اساس تبخیر - تعرق نسبی و همچنین بیان عمل می‌کند، استفاده می‌شود:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر - تعرق گیاه و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر - تعرق است. کارایی مصرف آب (WUE) نیز از نسبت مقدار عملکرد (Y) در هر تیمار به ET_c (تبخیر - تعرق) همان تیمار طبق رابطه (۶) به‌دست می‌آید:

$$WUE = \frac{Y}{ET_c} \quad \text{رابطه ۶}$$

تنش شوری خاک، ضریب رشد گیاه (GGC) را نسبت به بیشینه کاهش می‌دهد. برای شبیه‌سازی تأثیر تنش بر مقدار عملکرد،

1 Detailed crop growth

2 Detailed grass growth

3 Simple crop growth

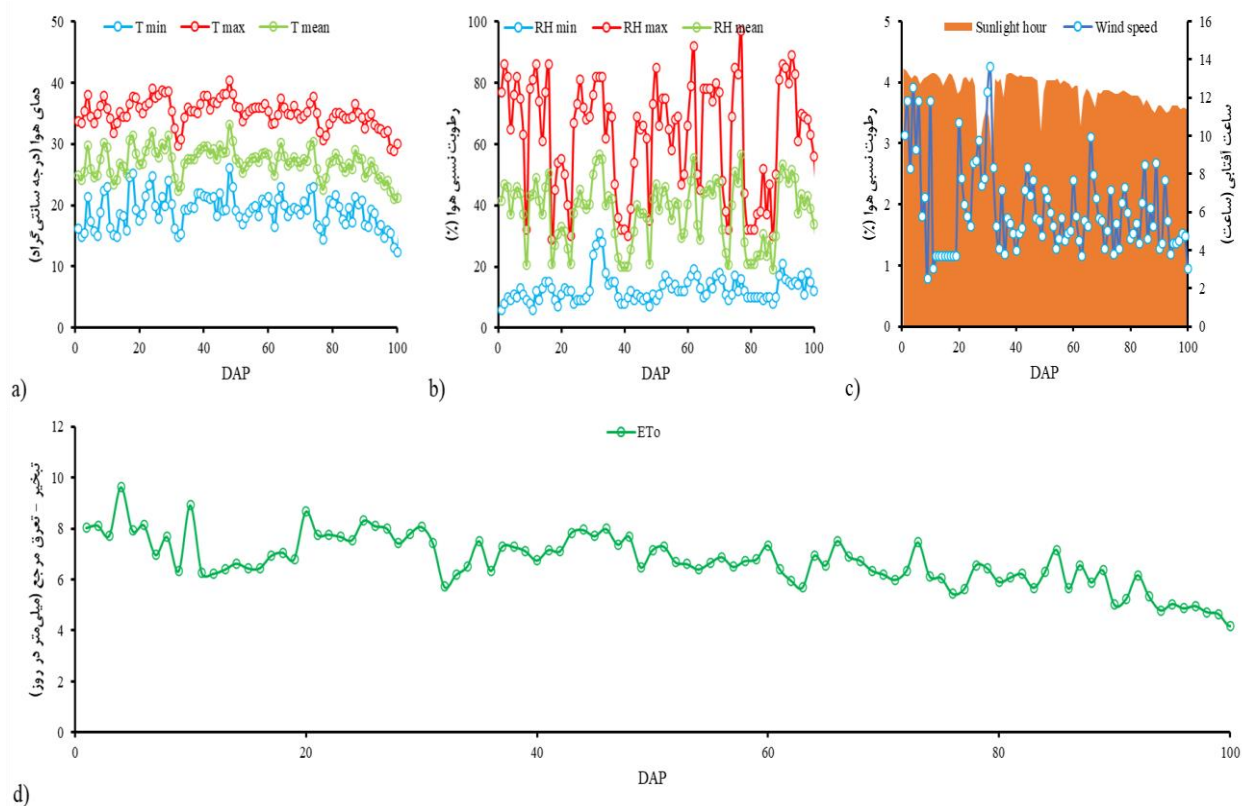
4 Development stage

AquaCrop گروهی از ضرب‌ها را که مبتنی بر توسعه کنوپی و بسته شدن روزنه‌هاست، در نظر می‌گیرد. مدل جریان آب در داخل خاک را بر اساس معادله بیلان آب به کار می‌گیرد که شامل فرآیندهای رواناب، نفوذ، توزیع مجدد یا زهکشی داخلی، نفوذ عمقی، صعود موینگی و تبخیر - تعرق است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷). مدل AquaCrop وزن خشک کل گیاه (زیست‌توده) را شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های ورودی مدل شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است.

داده‌های ورودی مشترک مدل‌های AquaCrop و SWAP

داده‌های هواشناسی

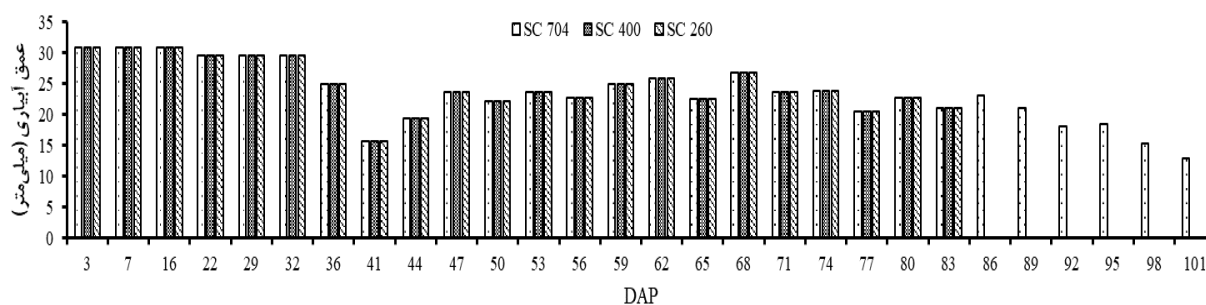
هر دو مدل AquaCrop و SWAP از داده‌های هواشناسی به صورت روزانه استفاده می‌کنند. داده‌های هواشناسی استفاده شده در طول فصل رشد ذرت علوفه‌ای برای ساخت فایل هواشناسی در هر دو مدل و تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده با نرم‌افزار ETo Calculator در شکل (۲) بر اساس روز پس از کاشت (DAP) ارائه شده است.



شکل ۲. داده‌های هواشناسی دما (a)، رطوبت نسبی (b)، سرعت باد و ساعات آفتابی (c) اندازه‌گیری و تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده (d) در طول دوره رشد ذرت علوفه‌ای در سال ۱۳۹۶

داده‌های آبیاری

برنامه‌ریزی آبیاری اعمال شده در هر کرت آزمایشی در طول دوره رشد ذرت علوفه‌ای با سیستم آبیاری قطره‌ای به‌عنوان ورودی ثابت در هر دو مدل AquaCrop و SWAP در نظر گرفته شد که در شکل ۳ بر اساس روز پس از کاشت (DAP) ارائه شده است. برنامه‌ریزی آبیاری برای هر سه رقم در طول فصل رشد یکسان بوده و تنها تفاوت در تعداد آبیاری و مجموع عمق آبیاری است؛ به‌طوری که برای رقم SC704 در مجموع ۲۸ نوبت و برای ارقام SC400 و SC260 ۲۳ نوبت و ۵۶۸/۸۹ میلی‌متر آبیاری انجام شده است (جدول ۲ و شکل ۳).



شکل ۳. برنامه‌ریزی آبیاری سه رقم ذرت سینگل کراس ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰ به عنوان ورودی مدل‌های AquaCrop و SWAP

ورودی‌های مدل SWAP

مشخصات هیدرولیکی خاک

پارامترهای مورد نیاز برای توصیف خصوصیات هیدرولیکی خاک در مزرعه مورد مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در جدول ۳ ارائه شده است. مدل SWAP با استفاده از پارامترهای معلم - ونگنوختن (Mualem, 1976؛ Van Genuchten, 1980) خصوصیات هیدرولیکی خاک را برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در محیط متخلخل توصیف می‌کند. پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه از طریق نرم‌افزار RETC (Van Genuchten et al., 1991) به دست آمدند.

جدول ۳. پارامترهای مدل معلم - ونگنوختن توصیف‌کننده خصوصیات هیدرولیکی خاک در مزرعه مورد مطالعه

لایه زیرسطحی (cm)	لایه سطحی (cm)		خاک
	۶۰-۴۰	۴۰-۲۰	
۱/۰۶	۱/۰۸	۰/۹۶۷	EC اولیه خاک (dS m ⁻¹)
۲۰	۲۰	۲۰	طول انتشار، LDIS (cm)
۰/۰۷۷۳	۰/۰۸۰۱	۰/۰۸۰۹	رطوبت باقی‌مانده، ORES (cm ³ cm ⁻³)
۰/۴۲۶۷	۰/۴۴۳۲	۰/۴۴۴۵	رطوبت اشباع، OSAT (cm ³ cm ⁻³)
۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۹۷	پارامتر α، ALFA (cm ⁻¹)
۰/۴۷۸۴	۱/۴۹۸۲	۱/۴۹۵۰	پارامتر n NPAR (-)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	پارامتر d LEXP (-)
۹/۵۷	۱۲/۸۹	۱۲/۷۷	هدایت هیدرولیکی اشباع، KSATFIT (cm d ⁻¹) [*]

^۱ اندازه‌گیری شده؛ ^۲ واسنجی شده؛ ^۳ پیش‌فرض SWAP؛ ^{*} نرم افزار RETC

داده‌های گیاهی

داده‌های ورودی مربوط به فایل عمومی و گیاهی مدل SWAP برای سه رقم ذرت علوفه‌ای سینگل کراس ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰ (V1، V2 و V3) مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است.

همچنین سطح ویژه برگ (SLA^۱) سه رقم ذرت مورد مطالعه تحت سه سطح شوری آب آبیاری که با استفاده از رابطه (Torrez et al., 2013؛ Kroes et al., 2017) محاسبه شده‌اند؛ در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$SLA = \frac{LA}{10000 \times W} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن LA مجموع مساحت برگ‌ها (m²) و W وزن خشک برگ‌های گیاه ذرت (kg) است.

ورودی‌های مدل AquaCrop

داده‌های ورودی مربوط به بخش گیاهی مدل AquaCrop برای سه رقم ذرت علوفه‌ای سینگل کراس ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰ (V1، V2 و V3) مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است. پارامترهایی که به ترتیب در مزرعه اندازه‌گیری شدند با عدد ۱ و پارامترهایی که مورد واسنجی قرار گرفتند با عدد ۲ داخل جدول مشخص شده‌اند. همچنین یک سری از پارامترهای بخش گیاهی که به صورت پیش‌فرض داخل مدل AquaCrop استفاده شده‌اند با عدد ۳ مشخص شده‌اند.

جدول ۴. داده‌هایی ورودی مربوط به فایل عمومی و گیاهی مدل SWAP برای سه رقم سینگل کراس V1، V2 و V3 ذرت علوفه‌ای مورد مطالعه

رقم‌های ذرت علوفه‌ای			داده‌های ورودی اصلی
V3	V2	V1	
بخش عمومی			
۲۲ مهر - ۲۲ خرداد ۰/۴۵، ۱/۹۲، ۳/۲	۲۲ مهر - ۲۲ خرداد ۰/۴۵، ۱/۹۲، ۳/۲	۲۲ مهر - ۲۲ خرداد ۰/۴۵، ۱/۹۲، ۳/۲	دوره شبیه‌سازی غلظت آب آبیاری، IRCONC (mg cm ⁻³)
بخش گیاهی			
۲۷ خرداد ۱۳۹۶ ۶۰	۲۷ خرداد ۱۳۹۶ ۶۰	۲۷ خرداد ۱۳۹۶ ۶۰	تاریخ جوانه‌زنی، CROPSTART
۲۲۰، ۲۳۰، ۲۵۰ ۰/۳	۲۰۰، ۲۰۵، ۲۰۵ ۰/۳	۲۵۵، ۲۶۵، ۲۶۵ ۰/۳	حداکثر عمق ریشه، RDS (cm)
۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	حداکثر ارتفاع گیاه، CH (cm)
۹۷۵/۱۵	۱۱۰۰/۱۵	۱۲۰۰/۱۵	ضریب بازتابش گیاه، ALBEDO (-)
۷۵۵	۶۲۰	۸۰۰/۲۵	حداقل مقاومت پوشش گیاهی، RSC (s m ⁻¹)
۲۰	۲۰	۲۰	دمای تجمعی از جوانه‌زنی تا گلدهی، TSUMEA (C)
۰/۰۴۸۳۶	۰/۰۴۸۳۶	۰/۰۴۸۳۶	دمای تجمعی از گلدهی تا رسیدگی، TSUMAN (C)
۰/۰۸۷۸۸	۰/۱۵۵۳۱	۰/۱۰۵۱۹	کل وزن خشک اولیه گیاه، TDWI (kg ha ⁻¹)
۳۳	۳۰	۳۶	شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی، LAIEM (m ² m ⁻²)
۰/۶	۰/۶۵	۰/۶	حداکثر افزایش نسبی در شاخص سطح برگ، RGRLAI (m ² m ⁻² d ⁻¹)
۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۷۵	طول عمر ریزش برگ‌ها در شرایط مطلوب، SPAN (d)
۰/۵۴	۰/۶۹	۰/۶	ضریب خاموشی برای پخشیدگی نور مرئی، KDIF (-)
۲/۶۹۰	۲/۸۲۰	۶/۸۴۵	ضریب خاموشی برای نور مرئی مستقیم، KDIR (-)
۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۲۵	کارایی مصرف نور برای برگ واقعی، EFF (kg CO ₂ J ⁻¹ adsorbed)
			آستانه تحمل غلظت نمک، SALTMAX (mg cm ⁻³)
			شیب کاهش جذب آب توسط ریشه، SALTSLOPE (mg cm ⁻³)

^۱ اندازه‌گیری شده؛ ^۲ واسنجی شده؛ ^۳ پیش‌فرض SWAP؛ * خوش‌سیمای چنار و نوری (۱۳۹۹)

جدول ۵. سطح ویژه برگ (SLA) اندازه‌گیری شده در مزرعه به عنوان ورودی مدل SWAP برای سه رقم سینگل کراس V1، V2 و V3 ذرت علوفه‌ای

مورد مطالعه			DVS	رقم ذرت
سطح ویژه برگ در سطوح مختلف شوری آب آبیاری، SLA ^۱				
EC = ۵ dS m ⁻¹	EC = ۳ dS m ⁻¹	EC = ۰/۷ dS m ⁻¹		
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۰	۰	
۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۶۶	
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۱	۰/۸۴	
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۹	V1
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۸	۱/۱	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۸	۱/۶۴	
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۱/۹۴	
۰/۰۰۳۳۹	۰/۰۰۱۵۹	۰/۰۰۱۳۵	۰	
۰/۰۰۱۴۴	۰/۰۰۱۳۴	۰/۰۰۱۳۴	۰/۴۷	
۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۱۱۶	۰/۷۷	
۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۱۰۴	۰/۹۸	V2
۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۷۲	۱/۲۹	
۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۶۴	۱/۵۷	
۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۰۰۶۴	۱/۹۲	
۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۷	۰	
۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۴۷	
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۱	۰/۷۷	
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۹۸	V3
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۱/۲۹	
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۱/۵۷	
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۱/۹۲	

^۱ اندازه‌گیری شده

جدول ۷. داده‌هایی ورودی مربوط به بخش گیاهی مدل AquaCrop برای سه رقم سینگل کراس V1، V2 و V3 ذرت علوفه‌ای مورد مطالعه

رقم‌های ذرت علوفه‌ای			داده‌های ورودی اصلی
V3	V2	V1	
بخش عمومی			
۲۲ مهر - ۲۲ خرداد	۲۲ مهر - ۲۲ خرداد	۲۲ مهر - ۲۲ خرداد	دوره شبیه‌سازی
۰/۷، ۳، ۵	۰/۷، ۳، ۵	۰/۷، ۳، ۵	غلظت آب آبیاری، (dS m^{-1})
بخش گیاهی			
۵	۵	۶	مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی (day) ^۱
۵۲	۵۲	۶۲	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کنوبی (day) ^۱
۵۸	۵۸	۶۸	مدت زمان کاشت تا گلدهی (day) ^۱
۴۸	۴۸	۵۱	مدت زمان کاشت تا حداکثر عمق ریشه (day) ^۲
۸۵	۸۵	۱۰۰	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول (day) ^۱
۹۶	۹۶	۹۶	حداکثر رشد پوشش گیاهی (%) ^۲
۶۰	۶۰	۶۰	حداکثر عمق ریشه (cm) ^۱
۱۱/۷	۱۱/۷	۱۱/۷	ضریب کاهش پوشش گیاهی (day^{-1}) ^۲
۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۶۲	پوشش گیاهی اولیه در جوانه‌زنی (%) ^۲
۳۰/۸	۳۱/۲	۳۲/۱	شاخص بهره‌وری آب (g m^{-2}) ^۲
۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	ضریب تعرق گیاه (-) ^۲
۹۵۰۰۰	۹۵۰۰۰	۹۵۰۰۰	تراکم کشت (n ha^{-1}) ^۱
۸/۰	۸/۰	۸/۰	دمای پایه ($^{\circ}\text{C}$) ^۳
۳۰/۰	۳۰/۰	۳۰/۰	دمای ماکزیمم ($^{\circ}\text{C}$) ^۳
۲/۱	۲/۲	۲/۸	آستانه تحمل شوری (dS m^{-1}) [*]
۶/۷۸	۶/۷۸	۳/۲۶	شیب کاهش شوری (%) [*]
۱/۰	۱/۰	۲/۰	آستانه پایین برای شوری (dS m^{-1}) ^۲
۸/۰	۸/۰	۱۲/۰	آستانه بالا برای شوری (dS m^{-1}) ^۲

^۱ اندازه‌گیری شده؛ ^۲ واسنجی شده؛ ^۳ پیش فرض AquaCrop؛ * خوش‌سیمای چنار و نوری (۱۳۹۹)

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مراحل واسنجی مدل شامل انتخاب پارامترهای مدل و تعیین بازه‌های مورد نظر هر پارامتر برای بهینه‌سازی اختلافات موجود بین مقدار مشاهده شده و پیش‌بینی شده‌است. 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 (Sandhu & Irmak, 2019a, b).

صحت‌سنجی در اصل آزمودن مستقل مدل است، در مرحله‌ای که برآوردهای مدل با داده‌هایی که در واسنجی استفاده نشده است، آزموده می‌شود. هدف از صحت‌سنجی مدل اطمینان از کیفیت و ظرفیت برآوردهای مدل به وسیله مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای است. برای صحت‌سنجی، شرایط ابتدایی، شرایط مرزی و همه پارامترهای ورودی مدل باید به صورت صحیح انجام شود. در این مطالعه واسنجی هر دو مدل AquaCrop و SWAP به ترتیب برای شاخص سطح برگ و پوشش گیاهی سبز (CC) و عملکرد علوفه در هر سه رقم ذرت علوفه‌ای مورد مطالعه، به ترتیب بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمارهای V1S1، V1S3، V2S1، V2S3، V3S1 و V3S3 انجام شد.

ارزیابی نتایج مدل

ارزیابی مدل AquaCrop و SWAP در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی با مقایسه CC، شاخص سطح برگ و عملکرد اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی شده دو مدل مذکور انجام و از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب باقی‌مانده (CRM) و ضریب تعیین (R^2) (رابطه‌های ۱۰-۸) استفاده شد (Moriasi et al., 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$NRMSE = RMSE \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۹}$$

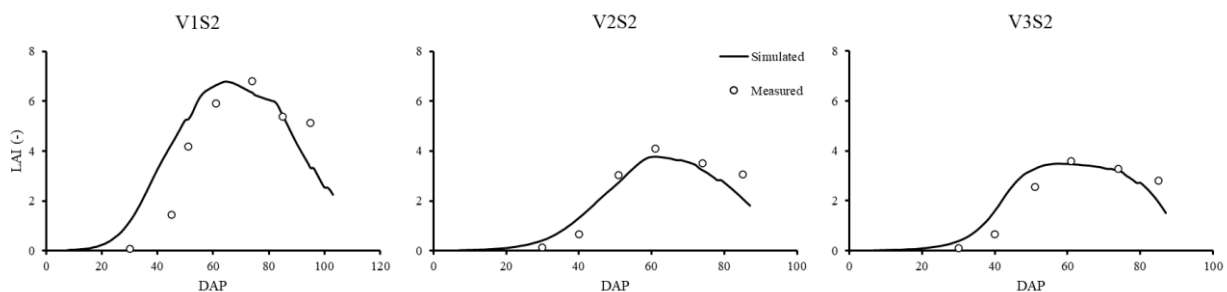
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در رابطه‌های بالا O_i و S_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است و n تعداد مقادیر مشاهداتی و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

شاخص سطح برگ یک پارامتر مهم برای توصیف جذب نور، وضعیت رشد گیاه و بهره‌وری است و اندازه‌گیری آن با دقت بالا در مقیاس‌های مختلف بسیار مهم است (Huang et al., 2023). LAI یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامترها برای مدل SWAP به‌شمار می‌آید و یکی از پارامترهایی محسوب می‌گردد که محاسبات مدل برای تخمین عملکرد گیاه با استفاده از این پارامتر انجام می‌شود (Kroes et al., 2017). نتایج ارزیابی مدل SWAP در برآورد LAI در مرحله واسنجی در شکل ۳ و جدول ۸ ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل SWAP در تیمار V1S2 (شکل ۳) خیلی خوب روند LAI را در طول فصل شبیه‌سازی نمی‌کند و بیشترین خطای مدل مربوط به این تیمار است، اما در دو تیمار دیگر V2S2 و V3S2 (شکل ۳) دقت مدل بیشتر بوده و LAI شبیه‌سازی مدل با نتایج LAI اندازه‌گیری در مزرعه تقریباً بر همدیگر منطبق هستند. بررسی نتایج شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۸ نیز نشان‌دهنده این موضوع است و در مرحله واسنجی کمترین RMSE و NRMSE و بیشترین ضریب تعیین (R^2) مربوط به تیمار V2S2 (رقم زودرس سینگل کراس ۴۰۰) به ترتیب $0.545 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ و $22/5$ درصد و 0.913 به دست آمد. همچنین شاخص CRM نشان‌دهنده این موضوع است که مدل بیش‌برآورد یا کم‌برآورد داشته است. این شاخص در تیمارهای V1S2 و V3S2 عددی منفی به دست آمده است که نشان می‌دهد مدل تمایل به کم‌برآورد LAI در دو رقم V1 و V2 دارد، اما در تیمار V2S2 مقدار شاخص CRM 0.070 به دست آمد که نشان می‌دهد مدل در این تیمار تمایل به کم‌برآورد کردن LAI دارد.



V1 = SC704, V2 = SC400, V3 = SC260 | S2 = 3.0 dS/m

شکل ۳. نتایج واسنجی مدل SWAP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ در سه تیمار V1S2، V2S2 و V3S2

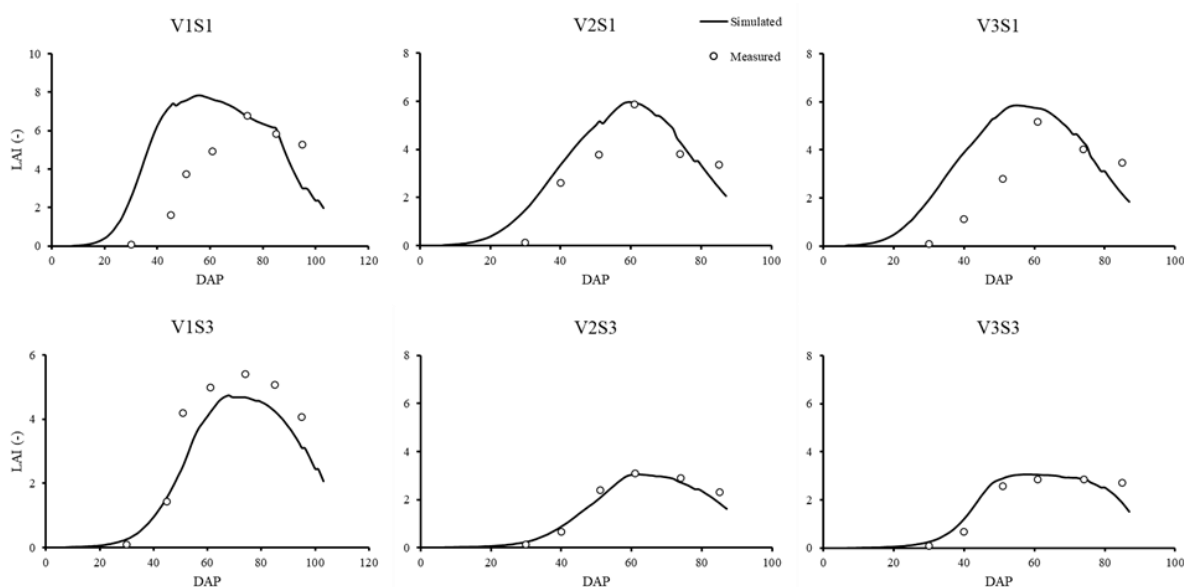
در مجموع با بررسی وضعیت شاخص‌های آماری در سه تیمار در نظر گرفته برای واسنجی مدل (کل تیمارها در جدول ۸) مشخص می‌شود که مدل دارای CRM، RMSE، NRMSE و R^2 به ترتیب 0.10 ، 0.986 ، $33/2$ درصد و 0.763 است. این نتایج نشان‌دهنده دقت متوسط مدل SWAP در شبیه‌سازی LAI ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت شوری متوسط (3 dS m^{-1}) آب آبیاری است و در کل تمایل به کم‌برآورد LAI دارد (جدول ۸).

شکل ۴ نتایج LAI ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در طول فصل رشد و تیمارهای مختلف و در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ و شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۸ مشاهده می‌شود که در رقم V1 و در هر دو سطح شوری S1 و S3 (V1S1 و V1S3) نتایج LAI شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با LAI اندازه‌گیری شده در مزرعه اختلاف دارد و مدل در تیمار V1S1 و V1S3 به ترتیب تمایل به کم‌برآورد و بیش‌برآورد LAI دارد. سرعت افزایش و به حداکثر رسیدن میزان LAI در مدل نسبت به مزرعه بیشتر است و زودتر به ماکزیمم LAI رسیده است (شکل ۳). مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 در تیمار V1S1 به ترتیب $3/051 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ، $75/7$ درصد و 0.106 به دست آمده است که ضعیف‌ترین نتایج شبیه‌سازی در بین تیمارهایی است

که برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شده است. از طرفی بهترین نتایج مدل مربوط به V2S3 با شاخص‌های آماری CRM برابر 0.059 که نشان‌دهنده بیش‌برآورد LAI، شاخص‌های RMSE و NRMSE به‌ترتیب برابر با $0.257 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ و $13/4$ درصد و ضریب تعیین برابر با 0.969 به‌دست آمد.

جدول ۸. نتایج شاخص‌های آماری دو مدل AquaCrop و SWAP در برآورد LAI و CC ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری

مرحله	تیمار	LAI (SWAP)				CC (AquaCrop)			
		R ²	NRMSE (%)	RMSE (-)	CRM (-)	R ²	NRMSE (%)	RMSE (%)	CRM (-)
آب‌سپاری	V1S2	0.652	34/8	1/438	-0.120	0.988	4/2	3/157	-0.118
	V2S2	0.913	22/5	0.545	-0.70	0.950	10/3	7/302	-0.13
	V3S2	0.801	28/0	0.607	-0.666	0.949	10/3	7/291	-0.002
	کل تیمارها	0.763	33/2	0.986	-0.10	0.953	8/4	6/107	-0.059
صحت‌سنجی	V1S1	0.106	75/7	3/051	-0.449	0.996	3/0	2/215	-0.08
	V1S3	0.935	24/3	0.876	-0.181	0.989	6/0	4/408	-0.48
	V2S1	0.779	29/4	0.958	-0.157	0.986	10/6	7/669	-0.90
	V2S3	0.969	13/4	0.257	-0.59	0.954	10/5	6/903	-0.20
	V3S1	0.350	67/3	1/87	-0.419	0.988	7/0	5/080	-0.29
	V3S2	0.855	22/3	0.436	-0.33	0.953	9/8	6/665	-0.04
	V3S3	0.477	54/2	1/610	-0.158	0.953	8/0	5/69	-0.05
	کل تیمارها								



V1 = SC704, V2 = SC400, V3 = SC260 | S1 = 0.7, S2 = 3.0, S3 = 5.0 dS/m

شکل ۴. نتایج صحت‌سنجی مدل SWAP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ در تیمارهای V1S1, V1S3, V2S1, V2S3, V3S1 و V3S3

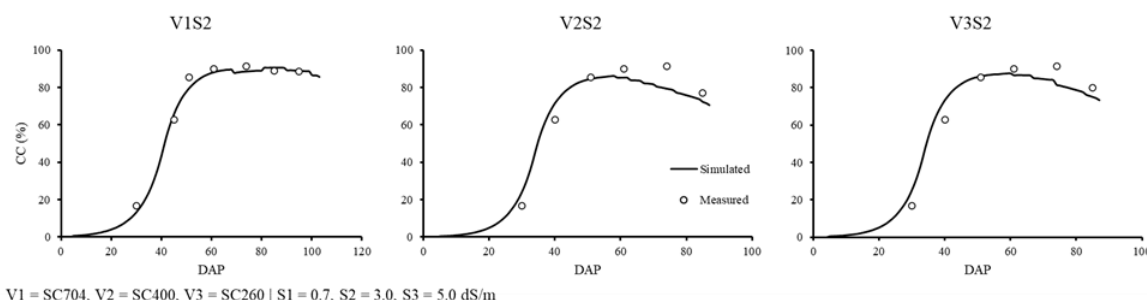
به‌طور کلی در مرحله صحت‌سنجی، با محاسبه شاخص‌های آماری برای همه تیمارهای استفاده شده مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 به‌ترتیب برابر با 0.158 ، $1/610 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ و $54/2$ درصد و 0.477 به دست آمد. با توجه به اینکه LAI در آزمایشگاه و به صورت تک بوته اندازه‌گیری شده است و مدل SWAP میزان LAI را با استفاده از SLA برآورد می‌کند و تراکم کشت را به‌عنوان پارامتر ورودی در خود ندارد؛ به نظر می‌رسد یکی از دلایل دقت پایین این مدل در برآورد این شاخص باشد. همچنین می‌توان این دقت پایین در شبیه‌سازی را به خطاهای موجود در انتخاب بوته برای اندازه‌گیری LAI نسبت داد. محققین دیگر نیز به دقت پایین مدل SWAP در برآورد LAI اشاره کرده‌اند (امیری و شیرشاهی، ۱۳۹۶؛ Wang et al., 2023؛ Zhao et al., 2020a) که باعث توسعه نسخه‌های اصلاح شده مدل SWAP به‌عنوان مثال قابلیت داده‌گویی (Liang et al., 2017؛ Zhao et al., 2020a؛ Wang et al., 2023) شده است که باعث بهبود نتایج LAI می‌شود. ژائو و همکاران به این موضوع اشاره کرده‌اند که دمای خاک یک شاخص جامع از وضعیت حرارتی خاک

بوده که بر فنولوژی گیاه، توسعه آن (در مدل SWAP با LAI نشان داده می‌شود) و تولید ماده خشک تأثیر می‌گذارد؛ بهبود نتایج شبیه سازی دمای خاک (در این مطالعه بررسی نشده است) می‌تواند باعث بهبود نتایج مربوط به LAI نیز گردد. به نظر می‌رسد علاوه بر دلایل ذکر شده در بالا، دقت پایین مدل در شبیه‌سازی دمای خاک نیز می‌تواند یکی از دلایل شبیه‌سازی ضعیف LAI باشد (Zhao et al., 2020a). به‌طور کلی لازم به‌ذکر است که مدل SWAP تفاوت بین سه رقم ذرت مورد مطالعه را توانسته است پشتیبانی کند.

درصد پوشش سبز

تنظیم پارامترهای مربوط به CC در مدل AquaCrop برای برآورد دقیق تعرق محصول، تبخیر خاک، زیست توده و عملکرد مهم است؛ بنابراین مدل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمارهای V1S2، V2S2 و V3S2 واسنجی شده (به ترتیب شکل 5a, b, c) و با داده‌های دیگر تیمارها (شکل ۶) صحت‌سنجی انجام شد تا توسعه محصول و تغییرات CC در طول فصل رشد شبیه‌سازی شود. شکل ۵ مقادیر CC اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای سه تیمار مذکور در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۸ شاخص‌های آماری محاسبه شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عملکرد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵a، بهترین نتایج مدل AquaCrop در برآورد CC در تیمار V1S2 با ضریب تعیین برابر با ۰/۹۸۸ به‌دست آمد. در تیمارهای V2S2 و V3S2 (شکل ۵) مشاهده می‌شود که در ابتدای فصل رشد مدل میزان CC را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر شبیه‌سازی می‌کند و بعد از آن این وضعیت تغییر کرده و مدل میزان CC را کمتر برآورد می‌کند، اما در مجموع، در مرحله واسنجی و در هر سه تیمار مقادیر CC اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده به‌خوبی مطابقت دارد ($R^2 = 0.953$). همچنین مقدار کم RMSE (برابر با ۶/۱۰۷ درصد) و NRMSE (برابر با ۸/۴ درصد) تأیید کننده این موضوع است که مدل AquaCrop دقت خوب و رضایت‌بخشی در برآورد و شبیه‌سازی CC دارد (جدول ۸).

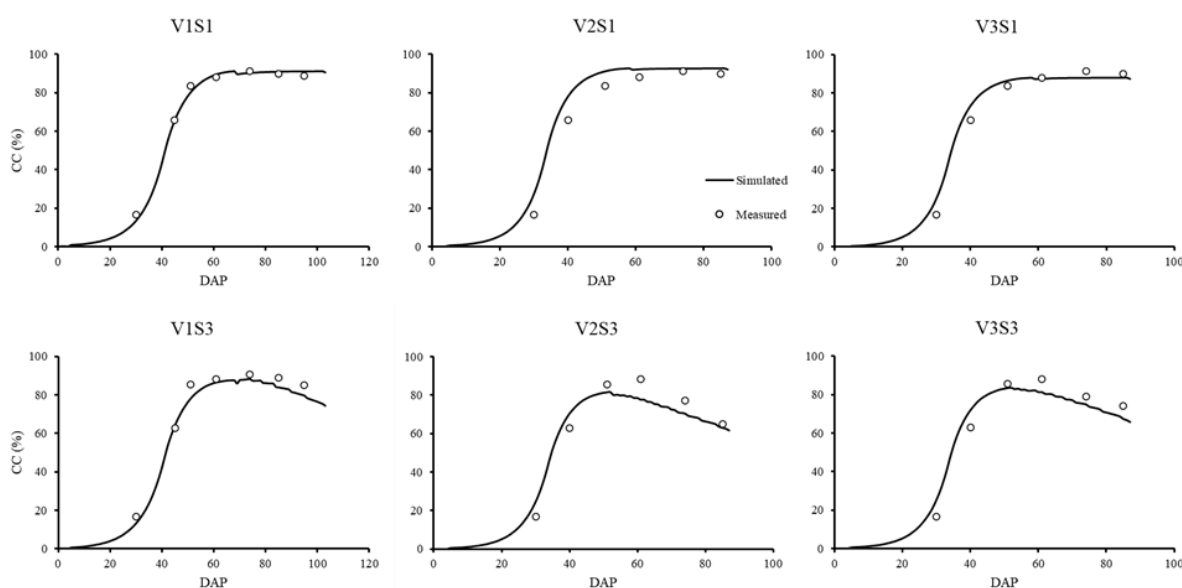


شکل ۵. نتایج واسنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC در سه تیمار V1S2، V2S2 و V3S2

شکل ۶ نتایج CC ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در طول فصل رشد و تیمارهای مختلف در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ و شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۸ مشاهده می‌شود که به‌صورت کلی، در همه تیمارها، مدل AquaCrop توانسته است CC را به‌خوبی شبیه‌سازی کند ($R^2 = 0.953$). خطای کم مدل در شبیه‌سازی CC در پارامترهای آماری نیز به‌خوبی مشاهده می‌شود به طوری که RMSE و NRMSE به ترتیب برابر با ۵/۶۹ و ۸ درصد محاسبه شده است (جدول ۸). پارامتر آماری CRM برابر با ۰/۰۰۵- به‌دست آمده است که نشان‌دهنده بیش‌برآورد CC توسط مدل AquaCrop است.

با توجه به شاخص‌های آماری در جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری در هر سه رقم ذرت علوفه‌ای، دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC کاهش می‌یابد؛ به طوری که مقدار RMSE در تیمارهای V1S1، V1S2 و V1S3 به ترتیب برابر با ۲/۲۱۵، ۳/۱۵۷ و ۴/۴۰۸ درصد به دست آمده است. اما این کاهش به مقداری نیست که بتوان به نادرست بودن نتایج مدل AquaCrop نسبت داد. همچنین با مقایسه نتایج مدل در تیمارهای مختلف و ارقام V2 و V3 که نسبت به رقم V1 حساس‌تر به شوری هستند (خوش‌سیمی‌چنار و نوری، ۱۳۹۸) مشخص می‌شود که مدل AquaCrop تفاوت ذاتی بین ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای را به‌خوبی پشتیبانی کرده و کاهش رشد گیاه در شرایط تنش شوری آب آبیاری و خاک را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است (شکل ۵ و ۶). دقت خوب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC ذرت توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است. به‌عنوان مثال عبدالهی و همکاران در چین و برای

ذرت تحت تیمارهای مختلف کم‌آبیاری میزان RMSE برای شبیه‌سازی CC را $۸/۶ - ۴/۴$ درصد گزارش کردند (Abdalhi et al., 2019). ساندو و ایرماک در یک مطالعه ۷ ساله در نبراسکا و ذرت تحت شرایط تاریخ‌های کشت مختلف و دیم، شاخص RMSE برای CC را $۱۲/۷ - ۵/۳$ درصد گزارش کردند (Sandhu and Irmak, 2019a). Ranjbar و همکاران (2019) نشان دادند که می‌توان از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی CC تحت سطوح مختلف نیتروژن کاربردی با R^2 در محدوده $۰/۹۳ - ۰/۶۳$ استفاده کرد. He و همکاران (2021) در شمال چین نیز شاخص R^2 برای شبیه‌سازی CC ذرت در شرایط استفاده از مالچ برابر با $۰/۹۷$ گزارش نمودند. همچنین مطالعه Feng و همکاران (2022) نشان داد که مدل AquaCrop به جز در شرایط دیم، CC ذرت را به خوبی شبیه‌سازی کند؛ به طوری که RMSE کمتر از $۱۵/۲$ درصد به دست آمد. این مطالعات نشان‌دهنده دقت خوب مدل AquaCrop در شرایط مختلف برای شبیه‌سازی CC ذرت بوده و تأیید کننده نتایج این مطالعه است.



V1 = SC704, V2 = SC400, V3 = SC260 | S1 = 0.7, S2 = 3.0, S3 = 5.0 dS/m

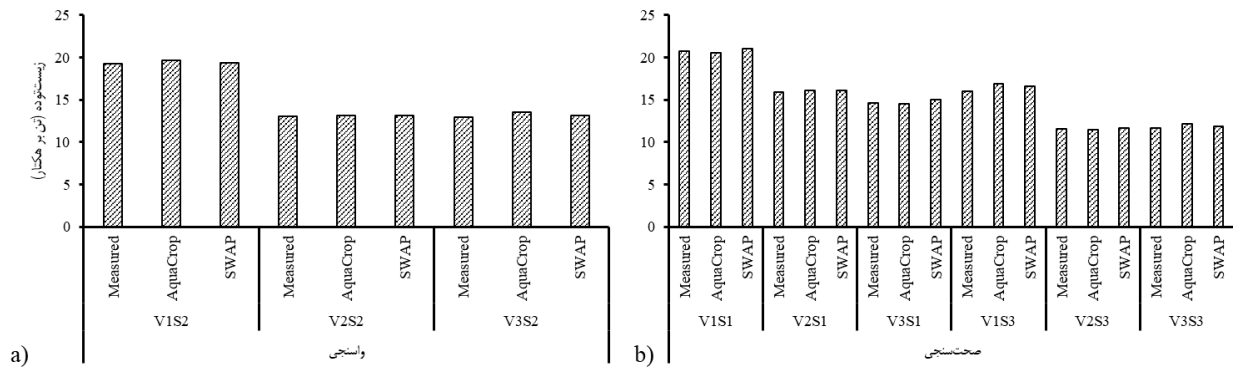
شکل ۶. نتایج صحت‌سنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC در تیمارهای VIS1، VIS3، V2S1، V2S3، V3S1 و V3S3

عملکرد زیست‌توده

هر دو مدل AquaCrop و SWAP به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده تولیدی ذرت با استفاده از داده‌های مربوط به تیمارهای VIS2، V3S2 و V2S2 که نتایج آن در شکل ۷a ارائه شده است؛ کالیبره شدند. همچنین آماره‌های محاسبه شده در مرحله واسنجی در جدول (۹) نشان داده شده است. با توجه به نتایج هر دو مدل با دقت خوبی میزان زیست‌توده تولیدی را شبیه‌سازی می‌کنند (شکل ۷a). با بررسی بیشتر آماره‌های محاسبه شده، مشاهده می‌شود که هر دو مدل در مرحله واسنجی تمایل به بیش‌برآورد زیست‌توده دارند (CRM_{AquaCrop} = -0.025؛ CRM_{SWAP} = -0.009)؛ اما شاخص‌های آماری نشان‌دهنده این است که مدل SWAP نسبت به AquaCrop از دقت بیشتری برخوردار است. شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE و R^2 برای مدل AquaCrop در مرحله واسنجی به ترتیب عبارتند از $۰/۴۰۹$ تن بر هکتار، $۲/۷$ درصد و $۰/۹$. اما همین پارامترهای آماری برای مدل SWAP به ترتیب $۰/۱۳۷$ تن بر هکتار، $۰/۹$ درصد و ۱ محاسبه شدند که تأیید کننده این است که SWAP نسبت به AquaCrop زیست‌توده ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای را بهتر و با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۹).

جدول ۹. نتایج شاخص‌های آماری دو مدل AquaCrop و SWAP در برآورد زیست‌توده ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای مختلف شوری

SWAP				AquaCrop				مرحله / شاخص آماری
R ²	NRMSE (%)	RMSE (ton/ha)	CRM (-)	R ²	NRMSE (%)	RMSE (ton/ha)	CRM (-)	
۱/۰	۰/۹	۰/۱۳۷	-۰/۰۰۹	۰/۹۹۷	۲/۷	۰/۴۰۹	-۰/۰۲۵	واسنجی
۰/۹۴۹	۴/۷	۰/۷۲۴	۰/۰۰۶	۰/۹۱۴	۶/۱	۰/۹۳۵	۰/۰۱۰	صحت‌سنجی



شکل ۷. مقایسه نتایج دو مرحله واسنجی (a) و صحت‌سنجی (b) دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی زیست‌توده ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری

از داده‌های مربوط به تیمارهای V1S1، V1S3، V2S1، V2S3، V3S1 و V3S3 در هر دو مدل AquaCrop و SWAP به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی زیست‌توده تولیدی ذرت استفاده شد و مقایسه نتایج مربوطه در شکل ۷b و شاخص‌های آماری در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج خوب هر دو مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری در مرحله واسنجی؛ در مرحله صحت‌سنجی نیز تکرار شده است و هر دو مدل در همه تیمارهایی که برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شده بودند؛ با دقت بسیار خوبی زیست‌توده ذرت را شبیه‌سازی می‌کند. به‌طور کلی در مرحله صحت‌سنجی نیز مدل SWAP از RMSE (AquaCrop = 6.1 % و SWAP = 4.7 %) NRMSE، (AquaCrop = 0.935 ton ha⁻¹ و SWAP = 0.724 ton ha⁻¹) کمتر و R² (AquaCrop = 0.914 و SWAP = 0.949) بالایی برخوردار است. مقدار CRM برای هر دو مدل AquaCrop و SWAP در مرحله صحت‌سنجی عددی مثبت به‌دست آمد (AquaCrop = 0.01 و SWAP = 0.006) که نشان می‌دهد هر دو تمایل به کم‌برآورد کردن زیست‌توده ذرت دارند.

دقت خوب هر دو مدل توسط محققین مختلفی اشاره شده است؛ به‌عنوان مثال برای SWAP نتایج نیسی و همکاران (۱۴۰۲) نشان داد که این مدل می‌تواند در شرایط کم‌آبایی و سطوح مختلف نیتروژن میزان زیست‌توده ذرت را با RMSE کمتر از ۰/۵۵ تن بر هکتار شبیه‌سازی کند. نتایج سرکه‌کی و همکاران (۱۴۰۰b) نشان داد که مدل SWAP دارای NRMSE ۰/۱۲ و ۰/۰۴ برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده ذرت تحت سه تیمار نوع آبیاری و پنج کیفیت مختلف آب بود که نشان‌دهنده دقت خوب این مدل است. کریمی و همکاران (۱۳۹۹) دقت مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم ذرت متوسط‌سرس SC500 و زودرس SC302 تحت تراکم‌های کشت و مقادیر آبیاری مختلف را قابل قبول ارزیابی نموده و درصد خطای گزارش شده توسط ایشان کمتر از ۰/۲ بود. نتایج امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶) برای رقم ذرت SC260 نشان داد که روند کلی تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل در مدیریت‌های مختلف آبیاری بر روند تغییرات عملکرد به‌دست آمده در مزرعه با مقادیر R² بیشتر از ۰/۹ و NRMSE در محدوده ۶/۹ - ۱/۹ درصد مطابقت دارد. همچنین مقادیر شاخص R² برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت توسط جیانگ و همکاران و ژائو و همکاران به ترتیب، ۰/۹۲ و ۰/۹۸ - ۰/۹۷ گزارش شده است (Hassanli et al., 2016; Jiang et al., 2016; Zhao et al., 2020a). برای AquaCrop سرکه‌کی و همکاران (۱۴۰۰a) نیز شاخص NRMSE مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده ذرت با مدیریت‌های مختلف آبیاری تحت تنش شوری را به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۹ به‌دست آورده و نتایج مدل را عالی گزارش کردند. ساندو و همکاران شاخص RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت را در محدوده ۱/۶۱ - ۰/۸۳ تن در هکتار گزارش کرده و در کل نتایج مدل را خوب ارزیابی کردند (Sandhu and Irmak, 2019a). همچنین Zhao et al., (2020b) برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در مرحله واسنجی شاخص‌های RMSE و CRM را به ترتیب ۰/۰۸۸ تن بر هکتار و ۰/۰۰۹ و در مرحله صحت‌سنجی ۰/۳۱۱ تن بر هکتار و ۰/۰۳۸ گزارش کردند که تأیید کننده نتایج این مطالعه (دقت خوب مدل و کم‌برآورد کردن عملکرد ذرت) توسط مدل AquaCrop است (Zhao et al., 2020b).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج، در مدل SWAP به‌جز شاخص سطح برگ، زیست‌توده ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای شبیه‌سازی شده بر مقدار اندازه‌گیری شده تطابق خوبی داشت و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شد، اما مدل AquaCrop در شبیه‌سازی CC و زیست‌توده در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بسیار خوب عمل کرده و خطای آن برای CC

حدود ۱۰ درصد و برای زیست‌توده ۶ درصد به‌دست آمد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و بررسی کارایی مدل با شاخص‌های آماری، مدل AquaCrop و SWAP دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت تحت شرایط استفاده از آب شور برای آبیاری را داشته و تحت سناریوهای مختلف قابلیت استفاده دارند. به‌طور کلی می‌توان از دو مدل AquaCrop و SWAP در مطالعات مختلف برای ارقام متفاوت ذرت علوفه‌ای تحت شرایط شوری آب آبیاری و خاک استفاده کرد. اما باید به این نکته توجه کرد که مدل SWAP به یک سری پارامترهای ورودی پیچیده نیاز داشته که در شرایط مزرعه نمی‌توان به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد. در نهایت نتایج این مطالعه می‌تواند به کشاورزان و محققین کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد استراتژی‌های مدیریت آبیاری و انتخاب محصول بگیرند. همچنین نتایج چنین ارزیابی‌هایی می‌تواند به بهبود مدل‌ها و دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر کردن آن‌ها برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری آب شور کمک کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- ابراهیمی‌پاک، نیازعلی؛ اگدرنژاد، اصلان و خدادادی دهکردی، داود (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپر جاذب. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۳): ۱۸۴-۱۶۶.
- ابراهیمی‌پاک، نیازعلی؛ اگدرنژاد، اصلان؛ تافته، آرش و احمدی، محسن (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۳): ۷۲۶-۷۱۵.
- امیری، ابراهیم و شیرشاهی، فهیمه (۱۳۹۶). ارزیابی عکس‌العمل ذرت دانه‌ای به مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، ۴(۴۴): ۷۷۴-۷۵۹.
- خوش‌سیمای چنار، مرتضی و نوری، حمیده (۱۳۹۸). اثر شوری آب آبیاری بر عملکرد و صفات زراعی سه هیبرید ذرت (*Zea mays L.*) با استفاده از آبیاری قطره‌ای نواری. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۸): ۲۰۴۹-۲۰۳۷.
- خوش‌سیمای چنار، مرتضی و نوری، حمیده (۱۳۹۹). اثرات شوری آب آبیاری بر شوری خاک و عملکرد سه هیبرید ذرت علوفه‌ای در سیستم آبیاری قطره‌ای، نخستین همایش ملی کم‌آبیاری و استفاده از آب‌های نامتعارف در کشاورزی مناطق خشک، قطب علمی مدیریت کم‌آبیاری و آب نامتعارف، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- خوش‌سیمای چنار، مرتضی؛ نوری، حمیده و محمودی ملامحمود، ژیلا (۱۴۰۰). ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور. مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۳): ۵۱۲-۴۹۵.
- ذبیحی، ابوالفضل؛ درزی نفت چالی، عبدالله و خوش‌روش، مجتبی (۱۳۹۵). آنالیز اثر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۹(۴): ۳۸۵-۳۷۵.
- سرکهکی، افشین؛ اگدرنژاد، اصلان و مینایی، سهراب (۱۴۰۰ الف). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت ذرت با مدیریت‌های مختلف آبیاری تحت تنش شوری، پژوهش آب ایران، ۱۵(۱): ۱۴۷-۱۳۳.
- سرکهکی، افشین؛ اگدرنژاد، اصلان و مینایی، سهراب (۱۴۰۰ ب). تعیین دقت و کارایی دو مدل گیاهی آب‌محور و کربن‌محور برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت. علوم آب و خاک، ۲۵(۱): ۱۵۶-۱۴۱.
- عابدزاده، سعیده؛ روزبهرانی، عباس و حیدری، علی (۱۳۹۹). ارزیابی ریسک طرح‌های توسعه منابع آب با روش تحلیل درخت خطا (مطالعه موردی: ناحیه ۴ مکران و بندرعباس). اکوهیدرولوژی، ۷(۱): ۴۵-۲۹.
- کریمی، شکوه؛ اگدرنژاد، اصلان و نخجوانی مقدم، محمد مهدی (۱۳۹۹). ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسط‌رس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی. آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱۴): ۱۹۰۷-۱۸۹۳.
- مهراذر، آیدا، سلطانی، جابر و رحمتی، امید (۱۳۹۵). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت (*Zea mays L.*) تحت شرایط تنش شوری. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۵): ۱۴۳۹-۱۴۲۶.
- نیسی، کریم؛ اگدرنژاد، اصلان و عباسی، فریبرز (۱۴۰۲). ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در مدیریت مختلف آب و کود. آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۷): ۵۸۴-۵۷۳.
- یزدخواستی، مریم؛ شایان‌نژاد، محمد؛ عشقی‌زاده، حمیدرضا و فیضی، محمد (۱۳۹۷). تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری با آب شور بر عملکرد سورگوم دانه‌ای و شبیه‌سازی عملکرد آن با استفاده از مدل SWAP. علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۲(۳): ۱۰۶-۹۵.



REFERENCE

- Abdalhi, M. A., Jia, Z., Luo, W., Tang, S., Ali, O. O., & Cheng, J. (2019). FAO AquaCrop model performance: in green canopy cover, soil moisture and production of maize at middle and lower reaches plain of Yangtze River of China. *Russian Agricultural Sciences*, 45, 186-193.
- Abdelkhalik, A., Pascual-Seva, N., Nájera, I., Giner, A., Baixauli, C., & Pascual, B. (2019). Yield response of seedless watermelon to different drip irrigation strategies under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 212, 99-110.
- Abedzadeh, S., Roozbahani, A., & Heidari, A. (2020). Risk Assessment of Water Resources Development Plans Using the Fault Tree Analysis Method (Case Study: District 4 of Mokran and Bandar Abbas). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(1), 29-45. doi: 10.22059/ije.2020.288016.1201 (In Persian)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Álvarez-Méndez, S. J., Padrón-Armas, I., & Mahouachi, J. (2021). Irrigation management strategies through the combination of fresh water and desalinated sea water for banana crops in El Hierro, Canary Islands. *Water Reuse*, 11(3), 464-474.
- Amiri, E., & Shirshahi, F. (2018). Evaluation of Maize Response to Less Irrigation Management Using Swap Model. *Crop Ecophysiology (Agriculture Science)*, 4 (44), 759-774. (In Persian)
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and agriculture organization of the United Nations.
- Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Rotter, R. P., Cabrera, J. M. C. A., & Van Laar, H. H. (1998). *WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5* (No. 52). SC-DLO.
- Burn, S., Hoang, M., Zarzo, D., Olewniak, F., Campos, E., Bolto, B., & Barron, O. (2015). Desalination techniques—A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination*, 364, 2-16.
- Colombani, N., Mastrocicco, M., & Giambastiani, B. M. S. (2015). Predicting salinization trends in a lowland coastal aquifer: Comacchio (Italy). *Water Resources Management*, 29, 603-618.
- Daghari, I., Bani, A., Bousnina, H., & Chaabane, A. (2020). On-farm water and salt management under a strawberry-pepper combination in the Korba area. *Irrigation and Drainage*, 69(3), 441-447.
- Ebrahimipak, N. A., 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. (In Persian)
- Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(3), 715-726. (In Persian)
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., ... & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261, 107372.
- Garcia-Caparros, P., Contreras, J. I., Baeza, R., Segura, M. L., & Lao, M. T. (2017). Integral management of irrigation water in intensive horticultural systems of Almería. *Sustainability*, 9(12), 2271.
- Hammami, Z., Qureshi, A. S., Sahli, A., Gauffreteau, A., Chamekh, Z., Ben Azaiez, F. E., ... & Trifa, Y. (2020). Modeling the effects of irrigation water salinity on growth, yield and water productivity of barley in three contrasted environments. *Agronomy*, 10(10), 1459.
- Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A., & Shokouhi, A. (2016). Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. *Agricultural water management*, 176, 91-99.
- He, Q., Li, S., Hu, D., Wang, Y., & Cong, X. (2021). Performance assessment of the AquaCrop model for film-mulched maize with full drip irrigation in Northwest China. *Irrigation Science*, 39, 277-292.
- Huang, M., Wang, C., Qi, W., Zhang, Z., & Xu, H. (2022). Modelling the integrated strategies of deficit irrigation, nitrogen fertilization, and biochar addition for winter wheat by AquaCrop based on a two-year field study. *Field Crops Research*, 282, 108510.
- Huang, X., Lin, D., Mao, X., & Zhao, Y. (2023). Multi-source data fusion for estimating maize leaf area index over the whole growing season under different mulching and irrigation conditions. *Field Crops Research*, 303, 109111.
- Jiang, J., Feng, S., Ma, J., Huo, Z., & Zhang, C. (2016). Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. *Field Crops Research*, 196, 85-97.
- Kamyab-Talesh, F., Mostafazadeh-Fard, B., Vazifedoust, M., Shayannejad, M., & Navabian, M. (2017). Salt

- Tolerance Analysis of Crops Using the SWAP Model. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 14(2), 643-649.
- Kamyab-Talesh, F., Mostafazadeh-Fard, B., Vazifedoust, M., Shayannejad, M., & Navabian, M. (2017). Salt Tolerance Analysis of Crops Using the SWAP Model. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 14(2), 643-649.
- Kaner, A., Tripler, E., Hadas, E., & Ben-Gal, A. (2017). Feasibility of desalination as an alternative to irrigation with water high in salts. *Desalination*, 416, 122-128.
- Karimi, S., Egdernezhad, A., & Nakhjavanimoghaddam, M. M. (2021). Evaluation of SWAP Model for Simulation of Early and Mid-Corn in Different Plant Densities under Sprinkler Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(6), 1893-1907. (In Persian)
- Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., & Delavar, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model of cucumber under greenhouse cultivation. *The Journal of Agricultural Science*, 158(10), 845-854.
- Khoshsimaie chenar, M., & Noory, H. (2019). Effect of Irrigation Water Salinity on Yield and Agronomic Characteristics of Three Corn (*Zea mays* L.) Hybrids Using Drip-Tape Irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8), 2037-2049. doi: 10.22059/ijswr.2019.271808.668073 (In Persian)
- Khoshsimaie chenar, M., & Noory, H. (2020). Effect of Irrigation Water Salinity on Soil Salinity and Yield of Three Maize Hybrids in Drip Irrigation System. *The first national conference on irrigation deficiency and the use of unconventional water in agriculture in dry areas Mashhad*. <https://civilica.com/doc/1193778> (In Persian)
- Khoshsimaie chenar, M., Noory, H., & Mahmoudi molamahmoud, Z. (2021). Evaluation of SWAP model in estimating soil water content, salinity and yield of three forage maize cultivars under saline water use conditions. *Water and Irrigation Management*, 11(3), 495-512. doi: 10.22059/jwim.2021.325835.893 (In Persian)
- 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-rapport-Wageningen University and Research Centre*, (2780).
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K., Parihar, S. S., & Sahoo, R. N. (2015). Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*, 148, 72-83.
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K., Parihar, S. S., & Sahoo, R. N. (2015). Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*, 148, 72-83.
- Li, J., Chen, J., Qu, Z., Wang, S., He, P., & Zhang, N. (2019). Effects of alternating irrigation with fresh and saline water on the soil salt, soil nutrients, and yield of tomatoes. *Water*, 11(8), 1693.
- Liang, H., Hu, K., Qin, W., Zuo, Q., & Zhang, Y. (2017). Modelling the effect of mulching on soil heat transfer, water movement and crop growth for ground cover rice production system. *Field Crops Research*, 201, 97-107.
- Liu, B., Wang, S., Kong, X., Liu, X., & Sun, H. (2019). Modeling and assessing feasibility of long-term brackish water irrigation in vertically homogeneous and heterogeneous cultivated lowland in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 211, 98-110.
- Mehrazar, A., Soltani, J., & Rahmati, O. (2016). Evaluation of the AquaCrop Model to Simulate Maize Yield Response under Salinity Stress. *Water and Soil*, 30(5), 1426-1439 (In Persian)
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2), e1500323.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- Neysi, K., Egdernezhad, A., & Abbasi, F. (2023). Evaluation of SWAP Model for Simulating Corn Yield and Water Productivity under Different Conditions of Irrigation Water and Nitrogen Fertilizer Management. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(3), 573-584. (In Persian)
- Nouri, M., Homaeae, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480.
- Raes, D., & Munoz, G. (2009). The ETo Calculator. *Reference Manual Version*, 3, 480.
- 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(3), 438-447.
- Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., ... & Zhang, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203, 438-450.
- Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimian, H., & Varavipour, M. (2019). Assessment of the AquaCrop model for simulating maize response to different nitrogen stresses under semi-arid climate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2899-2912.
- Rasouli, F., Kiani Pouya, A., & Šimůnek, J. (2013). Modeling the effects of saline water use in wheat-cultivated lands using the UNSATCHEM model. *Irrigation Science*, 31, 1009-1024.
- Reca, J., Trillo, C., Sánchez, J. A., Martínez, J., & Valera, D. (2018). Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. *Agricultural Systems*, 166, 173-183.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). The use of saline waters for crop production-FAO irrigation and drainage paper 48. *FAO, Rome*, 133.
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019a). Assessment of AquaCrop model in simulating maize canopy cover, soil-water, evapotranspiration, yield, and water productivity for different planting dates and densities under irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 224, 105753.
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019b). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687.
- Sarkohaki A, Egdernezhad A, & Minaei S. (2021b). Determining the Accuracy and Efficiency of Water-driven and Carbon-driven Crop Models to Simulate the Yield, Biomass and Water Use Efficiency of Corn. *Journal of Water and Soil Science*, 25(1), 141-156. (In Persian)
- Sarkohaki, A., Egdernezhad, A., & Minaei, S. (2021a). Evaluation of AquaCrop for Yield and Water Use Efficiency Simulation of Corn with Different Irrigation Management under Salinity Stress. *Iranian Water Researches Journal*, 15(1), 133-147. (In Persian)
- Scheierling, S. M., & Tréguer, D. O. (2018). *Beyond crop per drop*. Washington, DC: World Bank.
- Soomro, K. B., Alaghmand, S., Shahid, M. R., Andriyas, S., & Talei, A. (2020). Evaluation of AquaCrop model in simulating bitter melon water productivity under saline irrigation. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 63-73.
- Soothar, R. K., Wang, C., Li, L., Cui, N., Zhang, W., & Wang, Y. (2021). Soil salt accumulation, physiological responses, and yield simulation of winter wheat to alternate saline and fresh water irrigation in the North China Plain. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 2072-2082.
- Torrez, V., Jørgensen, P. M., & Zanne, A. E. (2013). Specific leaf area: a predictive model using dried samples. *Australian Journal of botany*, 61(5), 350-357.
- UNESCO, U. W. (2020). United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO.
- Van Diepen, C. V., Wolf, J., Van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and management*, 5(1), 16-24.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Wang, B., van Dam, J., Yang, X., Ritsema, C., Du, T. and Kang, S., (2023). Reducing water productivity gap by optimizing irrigation regime for winter wheat-summer maize system in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 280, p.108229.
- Wang, Q., Huo, Z., Zhang, L., Wang, J., & Zhao, Y. (2016). Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China. *Agricultural Water Management*, 163, 125-138.
- yazdekhasti M., Shayannejad M., Eshghizadeh H., & Feizi M. (2018). The Effect of Different Saline Irrigation Regimes on the Yield of Grain Sorghum and Yield Simulation using SWAP Model. *Water and Soil Science - Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 22(3), 95-106. (In Persian)
- Zabihi, A., Darzi-Nafchali, A., & Khoshravesh, M. (2017). Analysing drought stress effects on yield and water use efficiency of rice and the root zone salinity. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(4), 375-385. doi: 10.22077/escs.2017.465 (In Persian)

- Zhao, Y., Li, F., Wang, Y. and Jiang, R., (2020b). Evaluating the effect of groundwater table on summer maize growth using the AquaCrop model. *Environmental Modeling & Assessment*, 25, pp.343-353.
- Zhao, Y., Mao, X., & Shukla, M. K., (2020a). A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed-maize growth under film mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*, 292, 108127.



Evaluation of AquaCrop and SWAP models in simulating the growth and biomass of different maize cultivars under the conditions of using saline water with drip irrigation system

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water management is one of the most significant challenges of this century. The world is experiencing a decrease in fresh water due to population growth. Furthermore, the widespread use of saline water for irrigation has become prevalent due to water scarcity in many regions of the country. In areas where plants are under irrigation, it is necessary to have proper management and planning for the optimal use of water. It is possible to enhance irrigation management and precise planning for optimal water use in arid and semi-arid areas through the use of mathematical models. The use of simulation models is a strategy for managing agricultural water consumption and an effective method for predicting the impact of irrigation management and water quality on crop yield, provided that the models are proven to be accurate. Therefore, it is important to assess the accuracy of product simulation models in simulating product performance under these conditions.

Objective

The aim of this study is to assess the performance of two SWAP and AquaCrop models in simulating the growth of different maize cultivars under conditions involving the use of saline water for irrigation with a drip irrigation system.

Materials and method

This research was conducted using a factorial experiment and a randomized complete block design with two factors and three blocks (repetitions), resulting in a total of 9 treatments and 27 experimental plots in 2016 at the research farm of the Department of Irrigation and Development Engineering, University of Tehran, situated in Karaj. The area of each plot is approximately 12 m² (3 × 4), which includes four rows of maize plants spaced 75 cm apart and extending four meters in length. The experimental factors included three maize varieties: SC 704, 400, and 260 (V1, V2 and V3), and three levels of irrigation water salinity: 0.7, 3 and 5 dS m⁻¹ (S1, S2 and S3) to apply salinity stress. The data measured in the field, including leaf area index, canopy cover, and biomass, were used to calibrate and verify two AquaCrop and SWAP models.

Results and discussion

In the calibration stage of the AquaCrop model, the R², RMSE, NRMSE, and CRM statistics between the measured and simulated data of crop canopy cover (CC) are 0.953, 6.107%, 8.4%, and -0.059, respectively. For the SWAP model, the corresponding statistics for leaf area index (LAI) were calculated as 0.763, 0.986 (m² m⁻²), 33.2%, and 0.010. In the validation stage of the AquaCrop model, the R², RMSE, and NRMSE statistics for the comparison between the measured and simulated data of CC are 0.953, 5.69, and 8%, respectively. For the SWAP model, the corresponding statistics for LAI are 0.477, 1.610 (m² m⁻²), and 54.2%. Considering that LAI was measured in the laboratory for a single plant, and the SWAP model estimates LAI using specific leaf area (SLA) without considering crop density as an input parameter, it appears that one of the reasons for the low accuracy of this model in estimating this index is the omission of crop density as a factor. The low simulation accuracy can also be attributed to errors in selecting the plant for LAI measurement. Contrary to the poor results of the SWAP model in LAI estimation, both the SWAP and AquaCrop models effectively simulated the biomass of corn cultivars in different treatments. In the calibration and validation phase, RMSE and NRMSE of both models were less than 0.5 ton/ha and 3% (validation), and 1 ton/ha and 7% (validation), respectively.

Conclusion

According to the simulation results and the assessment of model efficiency using statistical indicators, both the AquaCrop and SWAP models demonstrate acceptable accuracy in simulating the growth and yield of corn when irrigated with saline water. These models can be utilized under various scenarios. In general, the SWAP and AquaCrop models can be utilized in various studies involving different maize cultivars under varying irrigation water and soil salinity conditions. Finally, the results of this study can assist farmers and researchers in making informed decisions about irrigation management strategies and crop selection. Furthermore, the outcomes of these evaluations can contribute to enhancing the models, making them more precise and dependable for simulating the growth and performance of various maize cultivars under saltwater irrigation.

Keywords: Calibration and Validation, Canopy Cover, Leaf Area Index, Plant Modeling, Salinity Stress.