



Evaluation of deficit irrigation scenarios at farm level using crop performance modeling in Midandoab plain

Leila Radfard¹ , Behzad Hessari² , Vahid Rezaverdinejad³ , Jamal Ahmadaali⁴ 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail:

radfar.leila@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Department of Environment Research, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: b.hessari@urmia.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail:

v.verdinejad@urmia.ac.ir

4. Agricultural Engineering Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran E-mail: jamal_ahmadaali@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 24, 2022

Revised: Dec. 22, 2022

Accepted: Jan. 18, 2023

Published online: Feb. 20, 2023

Keywords:

Crop yield simulation,
Improving Water productivity,
Field water management,
Wheat,
AquaCrop model.

ABSTRACT

Saving, optimizing water consumption, and improving productivity and efficiency indicators in agricultural sector are important and necessary. Miandoab region is of particular importance as a model of reducing consumption in order to conserve real water for the restoration of Lake Urmia. This research was conducted to evaluate water consumption reduction scenarios at the farm level using AquaCrop plant model in Miandoab region. For this purpose, the information on farms related to the sustainable agriculture project of Iran's Wetlands Protection Plan in Miandoab region was used. The data from the first year (the crop year 2016-2017) and the second year (the crop year 2017-2018) were used for model calibration and validation, respectively. The evaluation of statistical indicators shows the accuracy and high ability of the model in simulating grain yield. After the calibration and validation of the model, the irrigation planning scenarios were analyzed and evaluated in the form of reducing irrigation depth by 10, 20, and 30% for the conditions of the second year. The results of field measurements in 2017-2018 showed that the average irrigation depth and the applied irrigation (Irrigation + effective precipitation) for wheat were 405.44 and 580.44 mm respectively and mean grain yield was 8340 kg/ha, then irrigation water productivity and applied irrigation productivity were 2.27 and 1.52 kg/m³, respectively. Also, the results of the study of deficit irrigation scenarios showed that the S₃ scenario (30% irrigation water reduction) will reduce only 10% crop yield and water productivity will increase from 1.53 to 1.72 kg/m³. The values of water productivity indices were calculated using balance components and performance simulated by the model for each farm. In general, the results showed that it is possible to increase the grain yield of wheat and water productivity using AquaCrop model for proper and accurate irrigation planning and crop management improvement, in order to save and conserve water on a farm scale.

Cite this article: Radfard, L., Hessari, B., Rezaverdinejad, V., & Ahmadaali, J. (2023). Evaluation of deficit irrigation scenarios at farm level using crop performance modeling in Midandoab plain, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (12), 2759-2774. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350372.669381>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350372.669381>



ارزیابی سناریوهای کاهش مصرف آب در سطح مزرعه با استفاده از مدل‌سازی عملکرد محصول (مطالعه موردی دشت میان‌دوآب)

لیلا رادفرد^۱، بهزاد حصاری^۲، وحید رضاوردی‌نژاد^۳، جمال احمدآلی^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: radfar.leila@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و گروه پژوهشی محیط‌زیست، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه،

ارومیه، ایران. رایانامه: b.hessari@urmia.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: v.verdinejad@urmia.ac.ir

۴. بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: jamal_ahmadaali@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

صرفه‌جویی، بهینه‌سازی مصرف آب، ارتقای شاخص‌های بهره‌وری و راندمان‌ها در بخش کشاورزی امری مهم و ضروری است. منطقه میان‌دوآب به‌عنوان الگوی کاهش مصرف جهت حفظ آب واقعی برای احیاء دریاچه ارومیه از اهمیت خاصی برخوردار است. این تحقیق با هدف ارزیابی سناریوهای کاهش مصرف آب در سطح مزرعه با مدل گیاهی AquaCrop در منطقه میان‌دوآب انجام گرفت. برای این منظور از اطلاعات مزارع مربوط به پروژه کشاورزی پایدار طرح حفاظت از تالاب‌های ایران در منطقه میان‌دوآب استفاده شد. اطلاعات سال اول (سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵) برای واسنجی مدل و سال دوم (سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶) برای صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شد. ارزیابی شاخص‌های آماری نشان از دقت و توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه دارد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، سناریوهای برنامه‌ریزی آبیاری در قالب تغییر عمق آبیاری به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش برای شرایط سال دوم مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری آب با استفاده از اجزای بیلان و عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل برای هر یک از مزارع محاسبه گردید. نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه در سال ۹۷-۹۶ نشان داد که در شرایط موجود متوسط میزان آب آبیاری و آب کاربردی برای گندم به ترتیب ۴/۴۰ و ۴/۵۸۰ میلی‌متر، متوسط عملکرد دانه ۸۳۴۰ کیلوگرم در هکتار، بهره‌وری آب آبیاری و آب کاربردی به ترتیب ۲/۲۷ و ۱/۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب است. همچنین نتایج حاصل از بررسی سناریوهای کم آبیاری نشان داد سناریوی S₃ ضمن کاهش ۳۰ درصدی آب آبیاری می‌تواند عملکرد محصول را حدود ۱۰٪ کاهش داده و بهره‌وری آب را از ۱/۵۳ به ۱/۷۲ افزایش دهد. به‌طور کلی نتایج نشان داد می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب و دقیق آبیاری به کمک مدل AquaCrop و بهبود مدیریت زراعی، عملکرد دانه گندم و بهره‌وری آب را افزایش داد و موجب صرفه‌جویی و حفظ آب در مقیاس مزرعه شد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱

واژه‌های کلیدی:

شبیه‌سازی عملکرد محصول، بهبود بهره‌وری آب، مدیریت آب در مزرعه، گندم، مدل AquaCrop.

استناد: رادفرد؛ لیلا، حصاری؛ بهزاد، رضاوردی‌نژاد؛ وحید، احمدآلی؛ جمال، (۱۴۰۱). ارزیابی سناریوهای کاهش مصرف آب در سطح مزرعه با استفاده از مدل‌سازی عملکرد محصول (مطالعه موردی دشت میان‌دوآب). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۲)، ۲۷۷۴-۲۷۵۹.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350372.669381>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350372.669381>

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، بالا رفتن استانداردهای زندگی، کاهش زمین‌های کشاورزی و تغییر اقلیم موجب افزایش مصرف آب شده و امنیت غذایی را به یک چالش تبدیل کرده است (Droogers et al., 2000; Hobbs et al., 2008). امنیت غذایی به‌عنوان یک نگرانی جهانی، بدون آب و کشاورزی غیرممکن است (Pourgholam-Amiji et al., 2021). تأثیر کمبود آب با شیوه‌های ناکارآمد آبیاری تقویت می‌شود، زیرا آبیاری بیش از ۸۵ درصد آب موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک را مصرف می‌کند. بنابراین، چالش بزرگ برای دهه‌های آینده افزایش تولید مواد غذایی با آب کمتر به‌منظور تضمین امنیت غذایی جهانی خواهد بود. در نتیجه، اگر هیچ برنامه‌ریزی آبیاری منطقی و مبتنی بر علم اجرا نشود، ممکن است کشاورزی در این مناطق به خطر بیفتد. با توجه به مسائل پیش رو برای تولید بیشتر از منابع آبی محدود در دسترس و جلوگیری از وابستگی کشاورزی و غذایی به واردات بیشتر باید توجه بیشتری به راه‌کارهای ارتقاء بهره‌وری آب و بهبود عملکرد محصول در مزرعه داشت (Karimi and Jolaini, 2017). بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری محصول عمدتاً بر اساس دو هدف افزایش عملکرد و صرفه‌جویی در مصرف آب انجام می‌شود (Zhao and Jiang, 2021). برای اصلاح الگوی مصرف آب کشاورزی و بهبود کارایی مصرف آب با هدف تولید بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی آگاهی دقیق از رابطه‌ی مصرف آب و عملکرد محصول و اثر آن بر روند رشد، بیلان آب خاک و بهره‌وری تعرق به عنوان مصرف مفید، لازم و ضروری است. شناخت این روابط در چند دهه‌ی اخیر باعث پیدایش مدل‌های مختلف شبیه‌سازی رشد محصول مانند SWAP, WOFOST, DSSAT, CropSyst, CropWat, Budget, CRPSM, CERES, WEAP-Mabia و AquaCrop شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای اغلب وقت‌گیر و پرهزینه است، بنابراین مدل‌های گیاهی با واسنجی مناسب می‌توانند به بهبود مدیریت محصول کمک زیادی کنند (Masasi et al., 2019). مدل‌های گیاهی امکان ارزیابی ترکیبی از عوامل مختلف مؤثر بر عملکرد محصول را برای به‌دست آوردن مقادیر مطلوب آبیاری برای سناریوهای مختلف فراهم می‌کنند (Li et al., 2019). برخی از این مدل‌ها اغلب به پارامترها و داده‌های ورودی پیچیده و بیشتری نیاز دارند که برای انجام شبیه‌سازی به راحتی قابل دستیابی نیستند. AquaCrop یکی از محبوب‌ترین مدل‌های گیاهی آب محور است که نسخه اولیه آن توسط فائو (FAO) در سال ۲۰۰۷ معرفی شد (Steduto et al., 2009). AquaCrop به عنوان ابزاری در سطح مزرعه برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری ایجاد شده است. ویژگی‌های اصلی مدل AquaCrop سادگی، نیاز کمتر به پارامترهای ورودی، توانایی و دقت بالای آن در شبیه‌سازی رشد گیاه است. همچنین قادر به پیش‌بینی بهره‌وری محصول، نیاز آبی و کارایی مصرف آب در شرایط محدودکننده آب است. این مدل برای تعداد زیادی از محصولات مختلف در سراسر جهان با موفقیت واسنجی شده است (Masasi et al., 2019). در سال‌های اخیر، از AquaCrop به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی مصرف آب محصول و عملکرد محصول تحت برنامه‌های مختلف آبیاری استفاده شده است. Akbari, 2012 با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ و مدل شبیه‌سازی AquaCrop به بررسی وضعیت بهره‌وری آب برای تولید گندم و راه‌کارهای افزایش بهره‌وری آب در شرایط مختلف کمی آب شبکه آبیاری آبشار اصفهان پرداخت. نتایج نشان داد که با برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به کمک مدل AquaCrop همراه با بهبود مدیریت زراعی و کاهش عمق آبیاری می‌توان ضمن کاهش در مصرف آب آبیاری، عملکرد گندم و کارایی مصرف آب را افزایش داد. (Khorsand et al., 2014) در مطالعه‌ای به ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه (ارقام روشن و قدس)، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، تحت تنش‌های شوری و آبی پرداختند. آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح شوری آب آبیاری و چهار سطح عمق آبیاری با سه تکرار، طی سال زراعی ۱۳۸۴-۱۳۸۵ در منطقه بیرجند انجام گرفت. بر اساس نتایج، مدل AquaCrop عملکرد دانه را برای هر دو رقم با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. (Ebrahimi et al., 2015) به شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم‌آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل آباد قزوین پرداختند. نتایج نشان داد مقادیر جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) به‌دست آمده برای عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت به ترتیب برابر ۰/۱، ۰/۰۴، ۰/۱۱ و ۰/۰۴ است. همچنین مقادیر آماره شاخص توافق d برای تمامی عوامل بزرگ‌تر از ۰/۹۸ به‌دست آمد که نشان از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بود. (Emdad et al., 2018) در تحقیقی به واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم در منطقه حمیدیه خوزستان پرداختند. پژوهش به مدت دو سال زراعی در سه پایلوت منتخب اجرا شد. مدل برای شرایط سال اول واسنجی شد و سپس با سناریوهای مختلف نوبت‌های آبیاری (۳ تا ۶ نوبت آبیاری) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد ۴ نوبت آبیاری مناسب‌ترین سناریوی آبیاری در شرایط معمول منطقه است. با توجه به نتایج مدل و ۴ نوبت آبیاری، گندم در سال زراعی دوم به‌منظور صحت‌سنجی کاشته شد. بررسی نتایج نشان داد با انجام ۴ نوبت آبیاری کارایی مصرف آب دانه گندم به مقدار ۰/۷ کیلوگرم بر مترمربع افزایش یافت که مؤید کارایی مدل AquaCrop در

شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم در راستای ارتقای کارایی مصرف آب است. Emdad and Tafteh (2019) در پژوهشی به تعیین مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل AquaCrop در راستای ارتقای کارایی مصرف آب پرداختند. نتایج نشان داد با در نظر گرفتن دور آبیاری متعارف گندم در منطقه (۴ تا ۵ نوبت آبیاری) و عمق کاربرد آب ۱۰۰ الی ۱۲۰ میلی‌متر، امکان افزایش عملکرد دانه گندم به میزان ۳۰ درصد و کاهش حجم مصرف آب به مقدار حدود ۴۶ درصد نسبت به شرایط معمول زارع وجود دارد. (Goosheh et al., 2019). در مطالعه‌ای به بررسی برنامه‌ریزی آبیاری به منظور افزایش عملکرد گندم و بهره‌وری مصرف آب در جنوب استان خوزستان پرداختند. در این تحقیق با استفاده از مدل AquaCrop ۱۰ سناریوی برنامه‌ریزی آبیاری از پنج نوبت آبیاری به میزان ۴۰۰ میلی‌متر تا هفت نوبت به میزان ۶۵۰ میلی‌متر، برای یک دوره ۱۲ ساله شبیه‌سازی و اثرات هر سناریو بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. (Jorenush et al., 2019). با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت آن در استان فارس پرداخته و همچنین با اجرای مدل در سناریوهای مختلف اقلیمی، تاریخ کشت و کم آبیاری به این نتیجه رسیدند که حداکثر تأخیر در تاریخ کشت در داراب ۱۵ آذرماه و در زرقان ۱۵ آبان ماه است و کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه در سال‌های مرطوب، نرمال و خشک را به ترتیب تا ۳، ۱۷ و ۲۸ درصد و کاهش ۵۰ درصدی آب آبیاری، مقدار آن را به ترتیب تا ۱۵، ۲۷ و ۴۵ درصد می‌تواند کاهش دهد. (Jalil et al., 2020). مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی گندم زمستانی با داده‌های صحرایی در حوضه رودخانه کابل در افغانستان مورد ارزیابی قرار دادند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی، چهار سناریوی مختلف کم آبیاری را شبیه‌سازی و به بررسی اثرات آن بر روی عملکرد، WP و زیست‌توده پرداختند. (Nunes et al., 2021). مدل AquaCrop را تحت آبیاری‌های مختلف و اثرات تاریخ کاشت برای گیاه نخود در برزیل مورد ارزیابی قرار دادند. شاخص عملکرد مدل برای زیست‌توده از ۰/۹۲ تا ۰/۹۴ و برای عملکرد نهایی از ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ متغیر بود. این نتایج نشان داد AquaCrop از دقت بالایی برای شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد گیاه نخود برخوردار است. علاوه بر این، کاشت در اوایل آوریل برای استفاده بهتر و بهره‌وری از آب مناسب است. با توجه به مصرف ۹۰ درصدی منابع آب حوضه در بخش کشاورزی و بهره‌وری پایین آب در این بخش، یکی از مهم‌ترین راهکارها و اولویت‌های نجات دریاچه ارومیه، انجام اقدامات لازم در راستای کاهش مصرف آب در این بخش است. تأمین نیاز آن برای جمعیت کنونی یکی از جدی‌ترین چالش‌های بخش کشاورزی است. مقایسه مقدار تولید کل گندم در کشور با چند تولیدکننده بزرگ در جهان نشان می‌دهد که ایران دهمین کشور از لحاظ مقدار تولید کل گندم به شمار می‌رود (Curtis and Halford, 2014). اهداف این مطالعه عبارتند از: ۱. واسنجی و اعتبارسنجی مدل در منطقه میان‌دوآب ۲. استفاده از مدل واسنجی شده برای ارزیابی و شبیه‌سازی اثرات سناریوهای مختلف آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب در منطقه مورد مطالعه و ۳. برآورد اجزای بیلان آب با استفاده از مدل اعتبارسنجی شده برای بهینه‌سازی مصرف آب.

مواد و روش‌ها

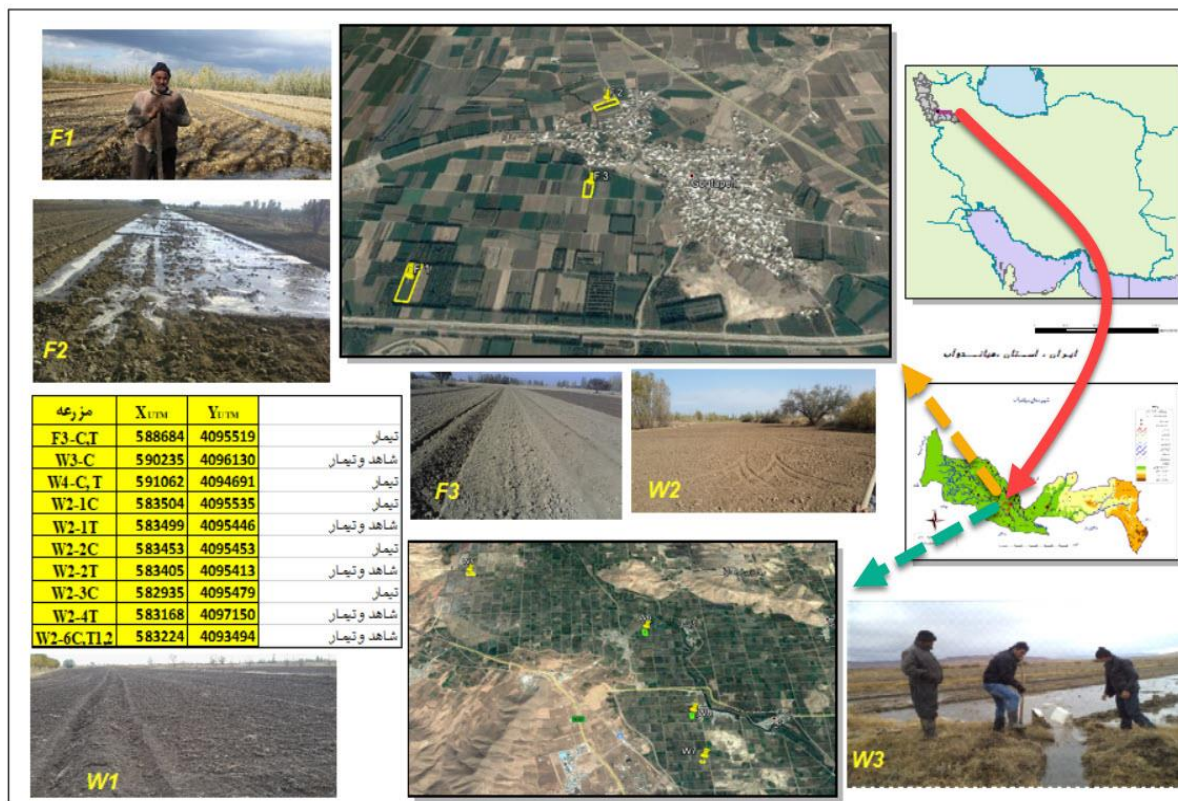
منطقه مورد مطالعه: دشت میان‌دوآب یکی از مهم‌ترین دشت‌های کشاورزی استان آذربایجان غربی و ایران بوده که در جنوب حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار دارد. متوسط عملکرد دانه برای محصول گندم در شهرستان میان‌دوآب طی سال‌های ۹۴-۸۷ به صورت دیم و آبی به ترتیب ۱۰۸۵ و ۳۰۴۴ کیلوگرم در هکتار، مقدار حداکثر عملکرد دیم و آبی به ترتیب ۱۸۴۸ و ۳۶۳۶ کیلوگرم در هکتار و مقدار حداقل عملکرد به ترتیب ۶۵۴ و ۱۸۵۹ است (Rezaverdinjad, 2017). داده‌های مورد استفاده در این مدل داده‌های طرح تحقیقاتی^۱ IPCM^۱ محدوده و مزارع منتخب در دشت میان‌دوآب به مدت دو سال است که با استفاده از نسخه ۶/۱ سال ۲۰۱۸ مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. از داده‌های سال اول ۹۶-۹۵ برای واسنجی مدل و از داده‌های سال دوم ۹۷-۹۶ برای صحت‌سنجی و نهایتاً اعمال سناریوهای مختلف آبیاری استفاده شد. شکل ۱ موقعیت منطقه و مزارع مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

تشریح مدل

ایده اصلی مدل AquaCrop مدل D-K است که توسط Doorenbos و Kassam در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شده است (Seyed Raoufi et al., 2018). شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه شامل مقادیر شاخص بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد محصول در این مدل با استفاده از گام‌های زمانی روزانه انجام می‌گیرد (Masasi et al., 2019). مدل AquaCrop تنها با چند پارامتر می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد محصول و زیست‌توده استفاده شود و در ادامه بهره‌وری محصول را از طریق زیست‌توده و شاخص برداشت شبیه‌سازی کند. Zhao and

(Jiang, 2021)

داده‌های ورودی مدل AquaCrop به چهار دسته داده‌های اقلیمی، داده‌های گیاهی، داده‌های خاک و داده‌های مدیریتی شامل مدیریت آبیاری و مدیریت مزرعه تقسیم می‌شوند (Hosseini et al., 2016).



شکل ۱. موقعیت منطقه و مزارع مورد مطالعه

داده‌هایی که برای محاسبه محاسبه تبخیر-تعرق مرجع ET_0 بر اساس روش فائو پنمن مانیتث لازم است شامل پارامترهای دمای حداکثر و حداقل، بارش، سرعت باد متوسط در ارتفاع دو متری از سطح زمین، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی است. سرعت بادی که معمولاً توسط سازمان هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین است که برای تبدیل به ارتفاع دو متری ضریب ۰/۷۵ در آن اعمال می‌شود. پارامترهای هواشناسی مورد نیاز جهت واسنجی و ارزیابی مدل، از ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی میان‌دوآب، به صورت روزانه برای سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ از زمان کاشت تا برداشت تهیه شد. داده‌های هواشناسی شامل دمای حداکثر و حداقل، تبخیر-تعرق مرجع، مقدار بارندگی و غلظت کربن دی‌اکسید (CO_2) به صورت روزانه است که میانگین سالیانه غلظت (CO_2) به مقدار ۳۶۹/۴۱ ppm به صورت پیش فرض در مدل وجود دارد که برای سال‌های ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ شبیه‌سازی شده است. داده‌های گیاهی ورودی به مدل شامل دو نوع پارامتر گیاهی ثابت و ویژه کاربر می‌باشند. مقادیر پیش فرض این پارامترها توسط کارشناسان فائو ارائه شده است و می‌توان به طور مستقیم از آن‌ها استفاده کرد (Raes et al., 2009). پارامترهایی از قبیل ویژگی‌های آب و خاک، مدیریت آبیاری، پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی و همه پارامترهای مربوط به مکان در گروه پارامترهای مخصوص کاربر طبقه‌بندی می‌شوند. تاریخ جوانه‌زنی عامل مهمی است که باید توسط کاربر به درستی وارد شود (Alizadeh et al., 2010). جدول ۱ اطلاعات مربوط به پارامترهای گیاهی ویژه کاربر ورودی به مدل را نشان می‌دهد.

داده‌های مربوط به خاک: جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه ورودی به مدل را نشان می‌دهد. لایه غیرقابل نفوذ در منطقه اجرای طرح وجود نداشت. قسمت آب زیرزمینی شامل مشخصات لایه آبخوان، وضعیت سطح ایستابی ثابت یا متغیر و کیفیت آب از نظر شوری است. به علت پایین بودن سطح ایستابی آبخوان منطقه از عمق اثرگذار بر منطقه توسعه ریشه گیاه از تأثیر آن صرف نظر شد.



جدول ۱. پارامترهای گیاهی ویژه کاربر مربوط به مراحل فنولوژیکی گندم

پارامترها	واحد	سال	
		۹۶-۹۵	۹۷-۹۶
بذر مصرفی	کیلوگرم در هکتار	۲۰۰	۲۲۰-۲۰۰
زمان ظهور جوانه‌ها	روز بعد از کاشت	۱۵	۱۶
زمان ماکزیمم پوشش گیاهی	روز بعد از کاشت	۱۶۲	۱۶۵
زمان پیری	روز بعد از کاشت	۲۰۳	۲۰۶
زمان بلوغ کامل	روز بعد از کاشت	۲۴۰	۲۳۷
زمان شروع گلدهی	روز بعد از کاشت	۱۸۸	۱۹۱
مدت گلدهی	روز	۱۰	۱۰
حداکثر عمق موثر ریشه	سانتی‌متر	۶۰	۶۰

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری

شوری عصاره EC (dS/m)	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	نقطه پژمردگی PWP (%)	ظرفیت زراعی FC (%)	رطوبت اشباع (حجمی) (%)	بافت خاک	درصد ذرات تشکیل دهنده خاک			مزرعه
						شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	
۴/۵۸	۱/۳	۹	۳۳	۴۳	سیلت	۱۵	۵۶	۲۹	F3-C,T
۲/۹۶	۱/۳	۱۳	۳۴	۵۳	سیلت رسی	۱۴	۴۹	۳۷	W3-C
۲/۱۷	۱/۳	۹	۳۳	۴۳	سیلت	۲۲	۵۵	۲۳	W4-C,T
۳/۷۲	۱/۳	۱۰/۲	۳۳	۴۰	سیلت	۱۶	۵۹	۲۵	W2-1C,T
۱/۶۹	۱/۳	۱۳	۳۴	۵۵	سیلت رسی	۴	۶۰	۳۶	W2-2C,T
۱/۱۶	۱/۳	۱۱	۳۲	۴۷	سیلت رسی	۱۹	۵۱	۳۰	W2-3C
۲/۰۲	۱/۳	۱۸/۴	۳۴/۹	۶۰	رس	۹	۳۳	۵۸	W2-4T
۲/۴۵	۱/۳	۱۲	۳۴/۲	۵۱	سیلت رسی	۱۹	۴۸	۳۳	W2-6C,T1,T2

جداول ۳ و ۴ اطلاعات مربوط به مدیریت آبیاری و مزرعه را برای سال اول و دوم مطالعه نشان می‌دهند. روش آبیاری معمول در منطقه برای گندم به صورت نواری و تعداد محدودی فارو است. آب آبیاری در مزارع از طریق منابع سطحی و معمولاً زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به میزان جریان آب ورودی به مزارع و افزایش دقت اندازه‌گیری، فلوم‌های WSC برای اندازه‌گیری آب در مزارع مورد استفاده قرار گرفتند. شرایط پایین‌دست در تمام مزارع به صورت انتها بسته و فاقد رواناب خروجی بوده و اندازه‌گیری آب خروجی انجام نگردید.

جدول ۳. نوبت و عمق آب آبیاری برای سال زراعی ۹۵-۹۶

مزرعه	F3-C	F3-T	W3-T	W4-C	W4-T
نوبت آبیاری	۵	۵	۵	۶	۶
مجموع عمق آبیاری	۹۰۰	۵۱۶	۶۳۲	۱۵۰۹	۱۰۳۱

جدول ۴. نوبت و عمق آب آبیاری برای سال زراعی ۹۶-۹۷

مزرعه	W2-1C	W2-1T	W2-2C	W2-2T	W2-3C	W2-4T	W2-6C	W2-6T1	W2-6T2
نوبت آبیاری	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
مجموع عمق آبیاری	۳۸۲	۲۷۲	۵۷۹	۳۵۶	۴۹۷	۶۳۶	۳۵۴	۳۸۲	۲۹۱

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

پس از واسنجی مدل بر اساس داده‌های سال اول که شامل داده‌های پنج مزرعه می‌شد، صحت‌سنجی به منظور اثبات کارایی مدل در شبیه‌سازی توسط داده‌های سال دوم با ۹ مزرعه انجام شد. صحت‌سنجی بدون تغییر در فابل‌های گیاهی واسنجی شده نهایی اجرا و مقادیر

شبیه‌سازی شده عملکرد محصول (دانه) با مقادیر مشاهده شده در سال دوم زراعی بر اساس شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل‌ها در تخمین عملکرد دانه از شاخص‌های ضریب تبیین^۱ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۳ (NRMSE)، متوسط خطای نسبی^۴ (MBA)، ضریب توده باقیمانده^۵ (CRM) و معیار کارایی نش-ساتکلیف^۶ (NSE)، شاخص ویلموت^۷ (Willmott, 1982) (d) استفاده گردید. این شاخص‌ها در روابط (۱) تا (۷) آورده شده‌اند.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - O_i}{n} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$CRM = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این روابط S_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر مشاهده شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} و \bar{S} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰ درصد است. NRMSE در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عدم اطمینان از مدل است (Jamieson et al., 1991). مقادیر مثبت MBA نشان‌دهنده بیش برآورد بودن مدل، مقادیر منفی نشانگر کم برآورد بودن و مقدار صفر نشان‌دهنده توزیع مساوی بین مقادیر مثبت و منفی است (Toumi et al., 2016). CRM پارامتری بی بعد است که نشانگر تمایل مدل برای بیش برآورد (مقادیر منفی) و یا کم برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است (Singh et al., 2008). مقدار شاخص NSE از $-\infty$ تا ۱ متغیر است. NSE در بازه ۱ تا ۰/۷۵ نشان از عملکرد خیلی خوب مدل، بازه ۰/۷۵ تا ۰/۶۵ عملکرد خوب مدل، بازه ۰/۶۵ تا ۰/۵ عملکرد رضایت‌بخش مدل و مقادیر کمتر از ۰/۵ نشان‌دهنده غیرقابل قبول بودن و عدم اطمینان از عملکرد مدل است (Hessari, 2013). شاخص ویلموت^۸ (d) مقدار آن از $-\infty$ تا ۱+ تغییر می‌کند و مقادیر نزدیک به یک نشان از تطابق و سازگاری بالای

1. Determination Coefficient
2. Root Mean Square Error
3. Normalized Root Mean Square Error
4. Mean Bias Error
5. Coefficient of Residual Mass
6. Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
7. Index of Agreement
8. Index of Agreement

مدل است.

شاخص‌های بهره‌وری آب

بهره‌وری بیوفیزیکی آب نسبت تولید محصول به ازای هر واحد آب مصرفی تعریف می‌شود. معمولاً به بهره‌وری بیوفیزیکی آب کارایی مصرف آب نیز می‌گویند که میزان آن به نوع محصول و محل کشت آن بستگی دارد (Perry et al., 2017). بهره‌وری بیوفیزیکی آب را می‌توان با کارکردهای مختلف تعریف کرد. محصول تولیدی را می‌توان ماده خشک یا بیوماس کل و مقدار آب مصرف‌شده را می‌توان مقدار تعرق، تبخیر-تعرق، آب آبیاری و یا آبیاری و بارش و تبخیر و تعرق به‌اضافه نفوذ عمقی در نظر گرفت. بهره‌وری آب کشاورزی، مقدار عملکرد محصول به ازای واحد حجم آب مصرفی است. اگر مقدار آبیاری به‌عنوان آب مصرفی در نظر گرفته شود، بهره‌وری مصرف آب با WP_I نشان داده‌شده و اگر مقدار آبیاری و بارش با هم به‌عنوان آب مصرفی در نظر گرفته شود، بهره‌وری مصرف آب یا بهره‌وری آب کاربردی با WP_{I+P} نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Verdinejad et al., 2009). شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب زیر است.

$$WP_T = \frac{Y(kg\ ha^{-1})}{T(m^3\ ha^{-1})} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$WP_{ET} = \frac{Y(kg\ ha^{-1})}{ET(m^3\ ha^{-1})} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$WP_{ETQ} = \frac{Y(kg\ ha^{-1})}{ETQ(m^3\ ha^{-1})} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$WP_{Irr} = \frac{Y(kg\ ha^{-1})}{I(m^3\ ha^{-1})} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$WP_{I+P} = \frac{Y(kg\ ha^{-1})}{I+P(m^3\ ha^{-1})} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در معادلات بالا Y عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار، T میزان تعرق گیاه، ET تبخیر-تعرق واقعی، ETQ مجموع تبخیر-تعرق واقعی و نفوذ عمقی، I میزان آب آبیاری و P میزان بارش مؤثر است. WP_T مقدار محصول تولیدی را در واحد مقدار تعرق گیاه بیان می‌کند و حد کمی از آب مصرفی گیاه را شامل می‌شود. WP_T به نوع گیاه (C_3 یا C_4) و وارثه آن وابسته است که در واقع عملکرد فیزیولوژیکی گیاه را بیان می‌کند. همچنین WP_T را می‌توان راندمان تعرق گیاه نامید. WP_{ET} مقدار محصول تولیدی به ازای تبخیر-تعرق واقعی گیاه است و بستگی به مقدار آب مورد استفاده برای تولید محصول دارد (Singh et al., 2006; Dehghan et al., 2011). I و P مقدار آبیاری و بارندگی مؤثر در طول فصل رشد و Y عملکرد اندام هوایی گیاه به‌صورت خشک یا قابل ارائه به بازار می‌باشند. باران مؤثر به‌صورت بخشی از باران قابل اطمینان و با استفاده از رابطه پیشنهادی ASCE (۱۹۹۰)، به‌صورت زیر محاسبه گردید:

$$Pe = (1.253Pt^{0.8242} - 2.935)10^{ETC*0.00095} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن: Pe باران مؤثر (mm)، Pt متوسط بارندگی ماهانه قابل اطمینان (mm) و ETC نیاز آبی گیاه در ماه مورد نظر (mm) است. بارندگی ماهانه قابل اطمینان عبارت است از متوسط بارندگی ماهانه ضرب در بارندگی سالانه با احتمال ۸۰ درصد تقسیم بر بارندگی سالانه.

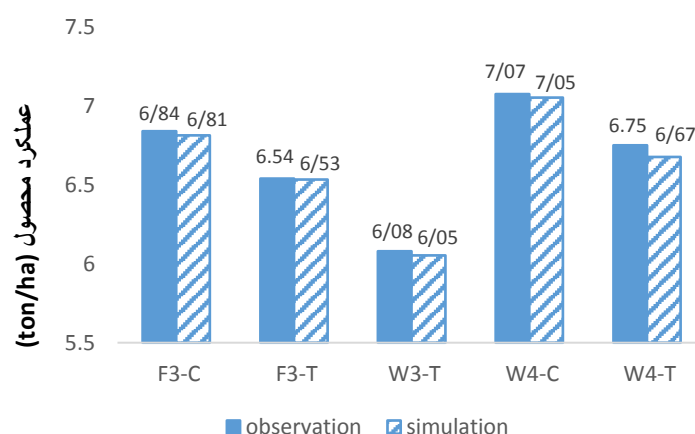
نتایج و بحث

نتایج مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی ثابت گندم در جدول ۵ ارائه شده است. مدل AquaCrop به پارامترهای ضریب تعرق گیاهی، بهره‌وری آب نرمال شده و شاخص برداشت حساسیت بالایی نسبت به سایر پارامترها دارد (Jorenush et al., 2019). این پارامترهای گیاهی با توجه به مطالعات انجام گرفته توسط سایر محققان برای واسنجی محصول گندم با مقداری تغییر در مقادیر پیش فرض مدل در

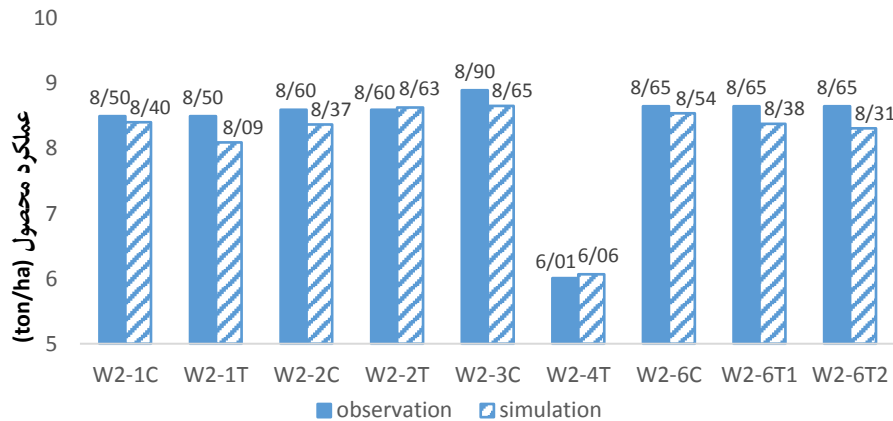
چند مرحله اعمال گردید تا نتیجه مطلوب برای شبیه سازی عملکرد دانه به دست آید. مقادیر عملکرد دانه حاصل از شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده بر اساس شاخص های آماری برای مرحله واسنجی و صحت سنجی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه عملکرد دانه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده گندم توسط مدل در مرحله واسنجی و صحت سنجی به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ ارائه شده است که نشان دهنده تطابق خوب مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل است.

جدول ۵. واسنجی پارامترهای گیاهی ثابت مدل برای محصول گندم

روش واسنجی	مقدار پارامتر	واحد	پارامترها
پیش فرض	۰	°C	دمای پایه رشد
پیش فرض	۲۶	°C	دمای بالا
تنظیم شد	۳/۶	%/day	ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)
تنظیم شد	۷/۴	%/day	ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)
تنظیم شد	۱۶	g/m ²	بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)
تنظیم شد	۹۶	%/day	حداکثر پوشش گیاهی
تنظیم شد	۴۱	days	کاهش پوشش تاجی
تنظیم شد	۴۶	%	شاخص برداشت (HI)
تنظیم شد	۱/۱۶	(-)	ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل (K _{cTr,x})
پیش فرض	۰/۲	(-)	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه
پیش فرض	۰/۶۵	(-)	آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه
پیش فرض	۵/۰	(-)	ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه
پیش فرض	۰/۶۵	(-)	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها
پیش فرض	۲/۵	(-)	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها
پیش فرض	۰/۷	(-)	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه
پیش فرض	۲/۵	(-)	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه

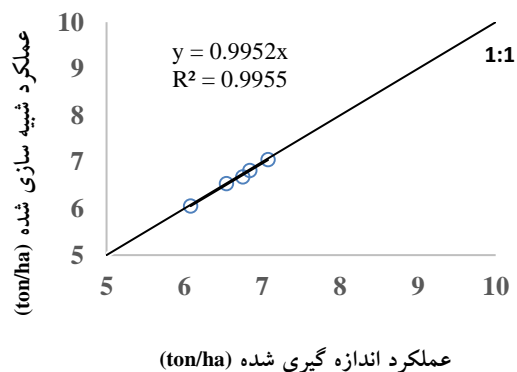
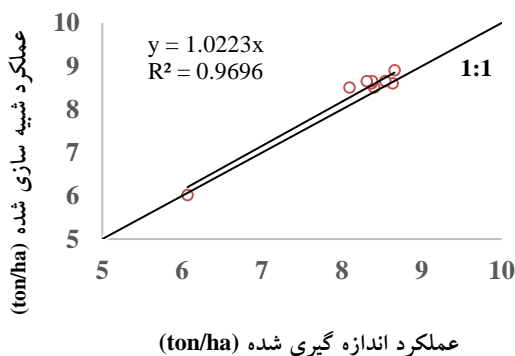


شکل ۲. مقایسه عملکرد دانه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط مدل در مرحله واسنجی



شکل ۳. مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی

مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس نتایج جدول ۶، مدل AquaCrop، عملکرد دانه را با دقت مناسب و بالایی، شبیه‌سازی کرده است. مقدار RMSE در سال اول ۰/۰۳ (ton/ha)، کمتر از ۰/۱ به دست آمد که نشان از برازندگی بسیار عالی مدل دارد. مقدار این پارامتر برای سال دوم ۰/۲۳ (ton/ha)، در محدوده ۰/۵-۱/۰ قرار گرفت که بر اساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد دانه، خوب است. مورد افزایش عملکرد در سال دوم لازم بذکر است مقدار باران و مصرف کود موثر بوده است. مقدار NRMSE در هر دو سال (سال اول ۰/۵۸ و سال دوم ۲/۷۹) کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد که نشان از ایده‌آل بودن مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه است. مقدار پارامتر MBE برای سال اول و دوم (به ترتیب ۰/۰۳- (ton/ha) و ۰/۱۷- (ton/ha)) نشان‌دهنده این است که مدل عملکرد دانه را اندکی کمتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب توده باقیمانده CRM برای سال اول و دوم (به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۲) نشان از این دارد که مدل عملکرد دانه را اندکی کمتر از مقدار واقعی آن پیش‌بینی می‌کند. با توجه به بررسی نتایج حاصل از دو پارامتر MBE و CRM مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه گندم اندکی تمایل به کم برآورد دارد. شاخص نش-ساتکلیف NSE برای سال اول و دوم (به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۲) نزدیک به یک به دست آمد که نشان از سازگاری و دقت بالای مقدار عملکرد دانه در مدل با مقادیر واقعی دارد. همچنین مقدار شاخص ویل‌موت برای هر دو سال (به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۹) نزدیک به یک است که تطابق و سازگاری بالای مدل را در شبیه‌سازی عملکرد دانه دارد. مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن همراه با خط همسانی (خط ۱:۱) برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل ۴ نشان داده شده است. خط رگرسیونی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب دارای ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۶ است. نتایج نشان از توانمندی مدل در پیش‌بینی مناسب عملکرد دانه گندم دارد و با نتایج حاصل از تحقیقات مندرج در جدول ۷ مطابقت دارد.



شکل ۴. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه توسط مدل AquaCrop با خط همسانی ۱:۱ شکل سمت راست برای دوره واسنجی و سمت چپ برای دوره صحت‌سنجی

جدول ۶. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه گندم (واسنجی)

مرحله ارزیابی	d (-)	NSE (-)	CRM (-)	MBE (ton/ha)	NRMSE (%)	RMSE (ton/ha)	R ² (-)
واسنجی	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۰۰۴	-۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۰۳	۰/۹۹
صحت‌سنجی	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۰۲	-۰/۱۷	۲/۷۹	۰/۲۳	۰/۹۶

جدول ۷. مقایسه پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه گندم در تحقیقات مختلف

محققین	منطقه مورد مطالعاتی	مرحله ارزیابی	d (-)	NSE (-)	CRM (-)	MBE (ton/ha)	NRMSE (%)	RMSE (ton/ha)	R ² (-)
تحقیق حاضر	میاندوآب	واسنجی	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۰۰۴	-۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۰۳	۰/۹۹
		صحت-سنجی	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۰۲	-۰/۱۷	۲/۷۹	۰/۲۳	۰/۹۶
Andarzian و همکاران (۲۰۱۱)	اهواز	صحت‌سنجی	۰/۹۷	-	-	-	۵	۰/۲۷	۰/۹۵
Salemi و همکاران، (۲۰۱۱)	اصفهان	واسنجی	۰/۹۸	۰/۹۰	۰/۰۲	-	-	۳/۴۸	۰/۹۵
		صحت-سنجی	۰/۹۹	۰/۹۷	-۰/۰۱۵	-	-	۲/۸۷	۰/۹۵
Zhang و همکاران، ۲۰۱۳	فلات جنوبی چین	صحت-سنجی	-۰/۹۵	-	-	-	-	۱/۰-۴۴/۵	-
Toumi و همکاران ۲۰۱۶	منطقه نیمه‌خشک مراکش	واسنجی	-	-	-	۰/۰۵	-	-	-
		صحت-سنجی	-	-	-	۰/۰۶	-	-	-
Kale Celik و همکاران ۲۰۱۸	آناتولی مرکزی ترکیه	صحت-سنجی	۰/۸۲	۰/۹۵	-	-	-	۰/۳۲	۰/۹۹
توکلی و همکاران ۱۳۹۲	لرستان	صحت-سنجی	۰/۹۹	۰/۷۸	-۰/۰۱۵	-	۸/۳۴	-	۰/۹۶
امداد و همکاران، ۱۳۹۷	منطقه حمیدیه خوزستان	صحت-سنجی	۰/۸۹	-	-	-	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۹۲

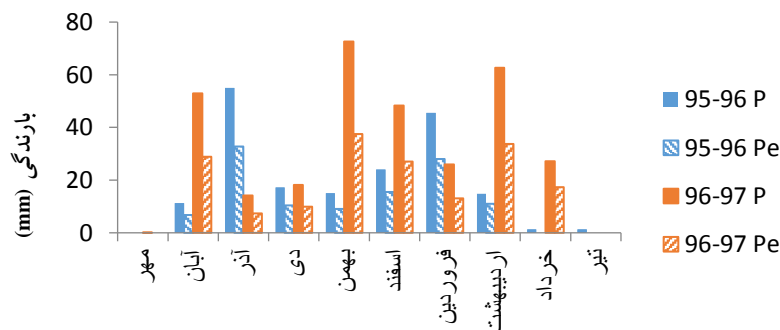
سناریوهای ارتقای بهره‌وری آب (برنامه‌ریزی آبیاری)

هر برنامه‌ریزی آبیاری که با استفاده از آب کمتری از آنچه در آبیاری کامل انجام می‌شود صورت گیرد به‌عنوان یک استراتژی کم آبیاری در نظر گرفته می‌شود (Chartzoulakis and bertaki, 2015). به‌منظور بهبود بهره‌وری آب در مزرعه و کاهش راهکارهای مزرعه‌ای که منجر به صرفه‌جویی در آب می‌شود، مدل واسنجی شده AquaCrop برای محصول گندم مورد استفاده قرار گرفت. به‌عنوان راهکار مزرعه‌ای با توجه به محدودیت‌های شرایط موجود، استراتژی کم آبیاری در قالب تغییر عمق آبیاری برای شرایط سال دوم مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. تمامی پارامترهای موجود در مدل ثابت فرض شد و تنها عمق آبیاری‌ها تغییر داده شد. عمق آب آبیاری در چهار کلاس (شرایط موجود) S₁، S₂ و S₃ به ترتیب ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد عمق آب آبیاری در شرایط زارع تعریف گردید. جدول ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد دانه و محاسبه شاخص‌های بهره‌وری را تحت سناریوهای کم آبیاری نشان می‌دهد. بدیهی است عملکرد محصول به‌جز مدیریت آبیاری به عواملی مانند میزان کود، بروز آفات و بیماری‌ها، تراکم علف‌های هرز و ... بستگی دارد، ولی در شبیه‌سازی‌ها از این محدودیت‌ها صرف نظر شده است.

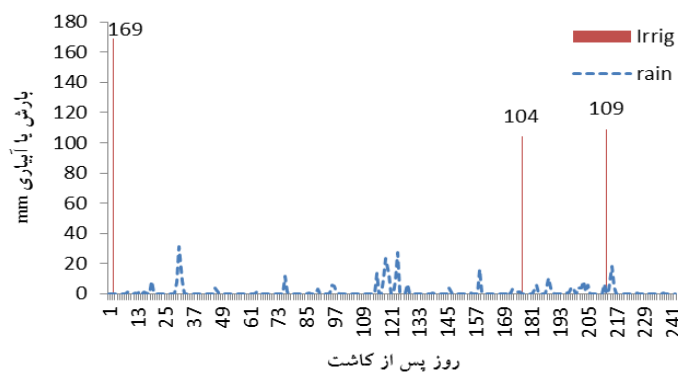
محاسبه شاخص‌های بهره‌وری آب تحت شرایط مدیریت کشاورز و سناریوهای کم آبیاری

Zwart and Bastiaanssen (2004) طبق پژوهشی که برای ۲۵ سال و بر اساس ۸۴ منبع تحقیقاتی انجام داد، نشان داد شاخص بهره‌وری آب حاصل از پژوهش نسبت به آمارهای ارائه شده فائو بیشتر است. از دیدگاه آن‌ها علت تفاوت در شاخص بهره‌وری آب می‌تواند تفاوت در شرایط آب و هوایی، مدیریت آبیاری و مدیریت خاک (کیفیت) باشد. نتیجه‌ی بارز این تحقیق آن است که با اعمال کم آبیاری، شاخص کارایی مصرف آب می‌تواند به مقدار زیادی افزایش یابد. (Azizizohan et al. (2014 به بررسی دامنه تغییرات بهره‌وری آب

گندم پرداختند و مقدار آن را ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند؛ درحالی که غالب تکرارهای آن در محدوده ۰/۶ تا ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است که با نتایج Zwart and Bastiaanssen (2004) همخوانی دارد. مقدار بارش مؤثر برای سال اول زراعی ۹۵-۹۶، ۱۱۴ میلی‌متر و برای سال دوم زراعی ۹۷-۹۶، ۱۷۵ میلی‌متر به دست آمد. شکل ۵ این مقادیر را نشان می‌دهد. به طور تقریبی می‌توان گفت ۶۰ درصد از بارندگی کل دوره رشد به بارندگی مؤثر تبدیل شده است. شکل ۶ مقدار آب کاربردی (بارش و آبیاری) را در طول دوره رشد گندم برای مزرعه W2-1C نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های بهره‌وری جدول ۸ تلفات تبخیر مستقیم از سطح خاک باعث می‌شود بهره‌وری آب از WP_T به WP_{ET} کاهش یابد همچنین تلفات ناشی از نفوذ عمقی (Q_{bot}) باعث کاهش بهره‌وری از WP_{ET} به WP_{ETQ} می‌شود. لحاظ نفوذ عمقی به عنوان تلفات بستگی به کیفیت و عمق آب زیرزمینی منطقه دارد. در مناطقی با عمق آب زیرزمینی کم و کیفیت مناسب نفوذ عمقی موجب تغذیه آب زیرزمینی می‌شود و آب نفوذ یافته می‌تواند با پمپاژ دوباره مورد استفاده قرار گیرد. اما در صورتی که عمق آب زیرزمینی زیاد و کیفیت مناسب نباشد، نفوذ عمقی به عنوان تلفات لحاظ می‌شود (Singh et al., 2006; Dehghan et al., 2011). بررسی سطح آب زیرزمینی منطقه نشان داد عمق آب زیرزمینی زیاد بوده و نفوذ عمقی در مزارع به عنوان تلفات محسوب می‌شود. همچنین مقایسه مقادیر WP_T و WP_{I+P} نشان داد WP_{I+P} کمتر از WP_{ET} بوده که دلیل آن نفوذ عمقی و کارایی کم آبیاری در مزارع است. بررسی نتایج نشان داد بهترین سناریوی ممکن و قابل اجرا توسط شرایط زارع در مزرعه سناریوی S_3 است. این سناریو با کاهش ۳۰ درصدی (معادل ۱۱۴/۶ میلی‌متر) آب آبیاری عملکرد محصول را فقط ۱۰/۴۴ درصد (معادل ۸۸۸ کیلوگرم در هکتار) کاهش داده و موجب افزایش ۱۲/۴۵ درصدی (معادل ۰/۲) بهره‌وری آب کاربردی می‌شود. با اینکه کاهش مقدار آبیاری منجر به کاهش عملکرد شد، اما آب مورد نیاز برای به دست آوردن حداکثر WP_T بسیار کمتر از مقدار مورد نیاز برای به دست آوردن حداکثر عملکرد است (Jonubi and et al., 2018). بر اساس برنامه‌ریزی‌های بلندمدت باید تا پایان سال ۱۴۰۴ سطح تولید محصولات کشاورزی در کشور به مرز ۱۹۰ میلیون تن برسد. در راستای رسیدن به این هدف باید بهره‌وری آب در بخش کشاورزی حداقل تا میزان ۲-۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یابد (Esmaili Khoshmardan, 2016).



شکل ۵. مقایسه توزیع بارندگی و بارش مؤثر در ماه‌های مختلف فصل زراعی گندم برای سال اول و دوم



شکل ۶. مقادیر آب کاربردی (بارش + آبیاری) گندم در طول دوره رشد برای مزرعه W2-1C

جدول ۸. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری آب بر اساس سناریوهای پیشنهادی

مزرعه	سناریو	حجم آب مصرفی (I+Pe) (m ³ /ha)	تبخیر - تعرق ET (mm)	عملکرد دانه Dry yield kg/ha	WP _T kg/m ³	WP _{ET} kg/m ³	WP _{ETQ} kg/m ³	WP _I kg/m ³	WP _{I+Pe} kg/m ³
W2-1C	S	۵۵۷۰	۵۳۴/۵۰	۸۵۰۰	۱/۹۷	۱/۵۹	۱/۱۴	۲/۲۳	۱/۵۳
	S ₁	۵۱۸۸	۵۲۹/۶۰	۸۳۴۵	۱/۹۵	۱/۵۸	۱/۱۸	۲/۴۳	۱/۶۱
	S ₂	۴۸۰۶	۵۱۲/۳۰	۸۰۰۸	۱/۹۶	۱/۵۶	۱/۱۹	۲/۶۲	۱/۶۷
	S ₃	۴۴۲۴	۴۹۳/۸۰	۷۶۱۲	۱/۹۵	۱/۵۴	۱/۱۹	۲/۸۵	۱/۷۲
W2-1T	S	۴۴۷۰	۵۱۸/۶۰	۸۵۰۰	۲/۰۵	۱/۶۴	۱/۳۳	۳/۱۲۵	۱/۹۰
	S ₁	۴۱۹۸	۵۰۴/۷۰	۷۸۳۷	۱/۹۶	۱/۵۵	۱/۲۷	۳/۲۰	۱/۸۶
	S ₂	۳۹۲۶	۴۸۷/۵	۷۴۶۷	۱/۹۵	۱/۵۳	۱/۲۷	۳/۴۳	۱/۹۰
	S ₃	۳۶۵۴	۴۷۱/۷	۷۱۴۰	۱/۹۶	۱/۵۱	۱/۲۷	۳/۷۵	۱/۹۵
W2-2C	S	۷۵۴۰	۵۴۸/۶۰	۸۶۰۰	۲/۰۱	۱/۵۳	۰/۹۹	۱/۵۰	۱/۱۴
	S ₁	۶۹۶۱	۵۴۵	۸۳۰۹	۱/۹۶	۱/۵۲	۱/۰۲	۱/۶۰	۱/۲۰
	S ₂	۶۳۸۲	۵۴۷/۴۰	۸۳۵۳	۱/۹۶	۱/۵۳	۱/۱۰	۱/۸۰	۱/۳۰
	S ₃	۵۸۰۳	۵۴۷/۴۰	۸۳۵۳	۱/۹۶	۱/۵۳	۱/۲۰	۲/۱۰	۱/۴۴
W2-2T	S	۵۳۱۰	۵۳۷/۱۰	۸۶۰۰	۲/۰۷	۱/۶	۱/۳۳	۲/۴۱	۱/۶۲
	S ₁	۴۹۵۴	۵۳۴/۶۰	۸۶۰۱	۲/۰۸	۱/۶۱	۱/۴۱	۲/۶۸	۱/۷۳
	S ₂	۴۵۹۸	۵۲۸/۵۰	۸۵۱۰	۲/۰۹	۱/۶۱	۱/۴۸	۲/۹۸	۱/۸۵
	S ₃	۴۲۴۲	۵۲۰/۲۰	۸۴۰۲	۲/۱۰	۱/۶۱	۱/۵۵	۳/۳۷	۱/۹۸
W2-3C	S	۶۷۲۰	۵۲۹/۷۰	۸۹۰۰	۲/۱۰	۱/۷۰	۱/۰۴	۱/۸۰	۱/۳۲
	S ₁	۶۲۲۳	۵۳۰/۴۰	۸۶۷۵	۲/۰۳	۱/۶۴	۱/۱۰	۱/۹۴	۱/۴۰
	S ₂	۵۷۲۶	۵۳۰/۷۰	۸۶۸۰	۲/۰۳	۱/۶۴	۱/۱۶	۲/۲۰	۱/۵۱
	S ₃	۵۲۲۹	۵۳۰	۸۶۶۸	۲/۰۳	۱/۶۴	۱/۲۴	۲/۵۰	۱/۶۶
W2-4T	S	۸۱۱۰	۴۵۵/۸۰	۶۰۰۱	۱/۹۱	۱/۳۲	۰/۶۷	۰/۹۴	۰/۷۴
	S ₁	۷۴۷۴	۴۵۵/۷۰	۶۰۶۳	۱/۹۳	۱/۳۳	۰/۷۱	۱/۰۶	۰/۸۱
	S ₂	۶۸۳۸	۴۶۳/۸۰	۶۱۷۰	۱/۹۱	۱/۳۳	۰/۷۸	۱/۲۱	۰/۹۰
	S ₃	۶۲۰۲	۴۶۵/۹۰	۶۲۲۸	۱/۹۰	۱/۳۴	۰/۸۵	۱/۴۰	۱/۰۰
W2-6C	S	۵۲۹۰	۵۱۶/۵۰	۸۶۵۰	۲/۰۱	۱/۶۷	۱/۲۴	۲/۴۴	۱/۶۳
	S ₁	۴۹۳۶	۵۰۹/۱۰	۸۳۸۶	۱/۹۸	۱/۶۵	۱/۲۶	۲/۶۳	۱/۷۰
	S ₂	۴۵۸۲	۴۹۹	۸۱۰۹	۱/۹۷	۱/۶۳	۱/۲۸	۲/۸۶	۱/۷۶
	S ₃	۴۲۲۸	۴۷۸/۸	۷۶۴۵	۱/۹۷	۱/۶	۱/۲۷	۳/۰۸	۱/۸
W2-6-T1	S	۴۵۷۰	۴۹۴/۱۰	۸۶۵۰	۲/۱۳	۱/۷۵	۱/۵۸	۳/۰۶	۱/۸۹
	S ₁	۴۲۸۸	۴۷۹/۴۰	۸۰۲۷	۲/۰۷	۱/۶۷	۱/۵۴	۳/۱۶	۱/۸۷
	S ₂	۴۰۰۶	۴۶۴/۳۰	۷۶۴۴	۲/۰۶	۱/۶۵	۱/۵۵	۳/۳۸	۱/۹۰
	S ₃	۳۷۲۴	۴۴۹/۲۰	۷۲۲۳	۲/۰۲	۱/۶۱	۱/۵۴	۳/۶۵	۱/۹۳
W2-6-T2	S	۴۶۶۰	۴۹۵/۵۰	۸۶۵۰	۲/۰۴	۱/۷۴	۱/۵۷	۲/۹۷	۱/۸۵
	S ₁	۴۳۶۹	۴۸۱/۴۰	۷۹۷۳	۲/۰۵	۱/۶۶	۱/۵۲	۳/۰۴	۱/۸۲
	S ₂	۴۰۷۸	۴۶۵/۶۰	۷۵۹۰	۲/۰۵	۱/۶۳	۱/۵۳	۳/۲۶	۱/۸۶
	S ₃	۳۷۸۷	۴۴۹/۱۰	۷۱۸۶	۲/۰۳	۱/۶۰	۱/۵۴	۳/۵۲	۱/۸۹

نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از مدل AquaCrop برای برنامه‌ریزی آبیاری، بیان آب در خاک و رشد محصول در شرایط متفاوت قابلیت دسترسی به آب بهره‌گرفت و نتایج قابل قبول و رضایت بخشی به دست آورد. این نتایج با نتایج تحقیقات سایر محققان از جمله (Patel et al., 2008; Farahani et al., 2009; Akbari, 2012; Emdad et al., 2018) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر دلالت بر آن دارد که مدل AquaCrop از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی



عملکرد دانه در مزرعه برخوردار است. با توجه به تحقیقات انجام گرفته پیشین می‌توان از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده AquaCrop در مدیریت آبیاری مزرعه استفاده کرد. حذف یا کاهش تبخیر از سطح خاک در ابتدای دوره رشد گیاه موجب صرفه‌جویی در مصرف آب و همچنین ارتقاء قابل توجه بهره‌وری آب خواهد شد. لذا جهت کاهش یا حذف پارامتر تبخیر در مراحل ابتدایی دوره رشد، پیشنهاد می‌شود از طریق مالچ‌پاشی خاک یا بهره‌گیری از روش‌های آبیاری زیرسطحی این جزء را به حداقل مقدار خود رسانید. با انجام تسطیح دقیق اراضی کشاورزی، طراحی مناسب سامانه‌های آبیاری سطحی، بهره‌گیری از روش‌های آبیاری تحت فشار، زیرسطحی و انجام آبیاری در زمان مناسب و متناسب با نیاز واقعی گیاه می‌توان تلفات نفوذ عمقی و رواناب در مزرعه را کاهش داد و راندمان آبیاری و عملکرد محصول را بهبود بخشید و حجم آب قابل توجهی را ذخیره کرد. بررسی نتایج نشان داد بهترین سناریوی ممکن و قابل اجرا توسط شرایط زارع در مزرعه سناریوی S₃ است. این سناریو با کاهش ۳۰ درصدی (معادل ۱۱۴/۶ میلی‌متر) آب آبیاری عملکرد محصول را فقط ۱۰/۴۴ درصد (معادل ۸۸۸ کیلوگرم در هکتار) کاهش داده و موجب افزایش ۱۲/۴۵ درصدی (معادل ۰/۲ کیلوگرم در مترمکعب) بهره‌وری آب کاربردی می‌شود. همیشه افزایش عمق آب آبیاری منجر به افزایش عملکرد محصول و بهبود بهره‌وری آب نخواهد شد؛ چون این افزایش تا حدودی وابسته به عمق آب آبیاری است و به عوامل دیگری همچون پایداری شاخص برداشت (HI)، تراکم بوته در واحد سطح، به‌کارگیری کود و مواد آلی و وارپته گیاه و همچنین مدیریت زراعی و آبیاری بستگی دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Akbari, M. (2012). Soil water balance and crop yield of winter wheat using AquaCrop simulation model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(4), 19-34. (In Persian)
- Alizadeh, H., Nazari, B., Parsinezhad, M., Ramazani etedali, H., & Janbaz, H., 2010. Evaluation of AquaCrop Model on weath deficit irrigation in karaj area, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 4(2), pp.273-283. (In Persian)
- Azizizohan, A.A., Shahabi Far, M., Ebrahimi Pak, N.A., Razavi, R., Ghalebi, S., Sorayi Tabrizi, M., Toulueai, R., & Piri, R. (2014). Evaluating the efficiency of wheat water consumption in Iran and the world. The first national conference on water and soil management in wheat production. Tehran, Iran. Soil and Water Research Institute. (In Persian)
- Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 88-98.
- Chehbouni, A., Escadafal, R., Boulet, G., Duchemin, B., Simonneaux, V., Dedieu, G., ... & Sobrino, J. (2008). The use of remotely sensed data for integrated hydrological modeling in arid and semi-arid regions: the SUDMED program. *Int. J. Remote Sens*, 29, 5161-5181.
- Curtis, T. and Halford, N.G., 2014. Food security: the challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. *Annals of applied biology*, 164(3), pp.354-372.
- Dehghan, H., Alizadeh, A., Ansari, H., & Haghayeghi, M. S. (2011). Evaluation of Water Productivity Indicators in Wheat Irrigated Fields (Case Study: Neyshabur Plain).
- Droogers, P., Bastiaanssen, W. G., Beyazgül, M., Kayam, Y., Kite, G. W., & Murray-Rust, H. (2000). Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western Turkey. *Agricultural Water Management*, 43(2), 183-202.
- Ebrahimi, M., Verdinejad, V., & Mjnooni - Heris, A. (2015). Dynamic Simulation through Aqua Crop of Maize Growth under Different Management Decisions of Water Application and Nitrogen Fertilizer Use, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2), pp. 207-220. (In Persian) doi: 10.22059/ijswr.2015.55926
- Emdad, M., & Tafteh, A. (2019). Determining the most suitable depth of irrigation water of wheat plant using the AquaCrop model in order to increase water use efficiency, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), pp. 417-425. (In Persian)
- Emdad, M., Tafteh, A., & Ghalebi, S. (2018). Validation of Aquacrop Model for Simulating Wheat Yield in Different Irrigation Events, *Water and Soil*, 32(3), pp. 463-473. (In Persian) doi: 10.22067/jsw.v32i3.70189
- Esmaili Khoshmardan, A. 2016. Investigation of water productivity and pathology of its management in the agricultural sector of the country. Bureau of research and policies of production sectors.
- Farahani, H. J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for

- full and deficit irrigated cotton. *Agronomy journal*, 101(3), 469-476.
- Goosheh, M., Pazira, E., Gholami, A., Andarzian, B., & Panahpour, E. (2019). Irrigation Scheduling to Increase Water Productivity Using AquaCrop Model, *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(4), pp. 91-105. (In Persian) doi: 10.22055/jise.2018.23252.1650
- H, T., KH, M., Z, M., GH, A. (2016). Evaluation of Soybean Yield by AquaCrop Model under Salinity and Deficit Irrigation Management, *Journal of Water Research in Agriculture*, 30.3(3), pp. 361-372. doi: 10.22092/jwra.2016.107156
- 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(2), 277-292.
- Hessari, B. 2013, Investigating the upstream and downstream hydrological effects of supplementary irrigation development in the dry areas in the Karkheh basin. PhD thesis, Ahvaz University, Faculty of Water Engineering, Department of Hydrology, 222 p.
- Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543-555.
- Jalil, A., Akhtar, F., & Awan, U. K. (2020). Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan. *Agricultural Water Management*, 240, 106321.
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), 337-350.
- Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., & Salemi, H. (2018). Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. *Paddy and water environment*, 16(1), 125-141.
- Jorenush, M. H., Boroomand Nasab, S., Naseri, A. A., Pakparvar, M., & Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and planting date in Fars province. *Water and Irrigation Management*, 9(1), 95-107.
- Karimi, M., & Jolaini, M. (2017). Evaluation of Agricultural Water Productivity Indices in Major Field Crops in Mashhad Plain (Technical Note), *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), pp. 133-138. doi: 10.22067/jwsd.v4i1.52783. (In Persian)
- Khorsand, A., Verdinejad, V. R., & Shahidi, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. *Water and Irrigation Management*, 4(1), 89-104.
- Li, F., Yu, D. & Zhao, Y., 2019. Irrigation Scheduling Optimization for Cotton Based on the AquaCrop Model. *Water Resources Management*, 33(1), pp.39-55.
- Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Warren, J., & Marek, G. (2019). Simulating soil water content, evapotranspiration, and yield of variably irrigated grain sorghum using AquaCrop. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55(4), 976-993.
- Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., ... & Souza, P. J. O. P. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. *Agricultural Water Management*, 252, 106880.
- Patel, N., Kumar, P., & Singh, N. (2008). Performance evaluation of AquaCrop in simulating potato yield under varying water availability conditions. *Indian Agricultural Research Institute*.
- Perry, C., Steduto, P., & Karajeh, F. (2017). Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Cairo*, 42.
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A. N., & Khoshraresh, M. (2021). The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with a saline and shallow water table. *Journal of Hydrology*, 598, 126259.
- Rezavardinjad, V. 2017, Monitoring and investigating the effectiveness of crop-specific and breed-specific techniques to reduce the withdrawal of water resources in the Lake Urmia in the cities of Urmia, Naqdeh, Mahabad and Miandoab: 2th to 4th phases report. Lake Restoration Headquarters Urmia, 155 pages.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. , & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.*101:438-447.
- Salemi, H., Soom, M. A. M., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., & Yusoff, M. K. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 6(10), 2204-2215.
- Seyed Raoufi, R., Soufizadeh, S., Amiri Larijani, B., AghaAlikhani, M., & Kambouzia, J. (2018). Simulation of growth and yield of various irrigated rice (*Oryza sativa* L.) genotypes by AquaCrop under different seedling ages. *Natural Resource Modeling*, 31(2), e12162.



- Singh, R., van Dam, J. C., & Feddes, R. A. (2006). Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*, 82(3), 253-278.
- Singh, A. K., Tripathy, R., & Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural water management*, 95(7), 776-786.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101:426-437.
- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219-235.
- Verdinejad, V. R., Sohrabi, T., Heydari, N., Araghinejad, S. H., & Mamanpoush, A. R. (2009). Assessing irrigation water supply and demand and estimation of crop water productivity in the Zayandehrud Basin (case study: Abshar right irrigation network).
- Zhao, Y., Li, F., & Jiang, R. (2021). Irrigation schedule optimization based on the combination of an economic irrigation quota and the AquaCrop model. *Irrigation and Drainage*, 70(4), 773-785.