



Improving Saffron Irrigation Scheduling Using Field Measurements and Plant Modeling

Amir Akbari¹, Ali Naghi Ziaei^{2*}, Seyed Mohammadreza Naghedifar³, Parviz Rezvani Moghaddam⁴, Mahdi Gholami Sharafkhane⁵

Article type:

Research Article

Article history:

Submitted: 20 February 2023

Revised: 15 April 2023

Accepted: 13 May 2023

Available Online: 13 May 2023

How to cite this article:

Akbari, A., Naghi Ziaei, A., Naghedifar, S.M., Rezvani Moghaddam, P., and Gholami Sharafkhane, M. 2023. Improving Saffron Irrigation Scheduling Using Field Measurements and Plant Modeling. *Saffron Agronomy & Technology*, 11(1): 53-69.

DOI: 10.22048/jsat.2023.386578.1481

Abstract

Saffron is one of the most valuable spices in the world and due to its high economic value and low water requirement, it is widely cultivated in eastern Iran. In this research, which took place in the research farm of the Ferdowsi University of Mashhad, Iran, in 2021-2022, the AquaCrop model was used to simulate the yield of the saffron plant and was calibrated and validated using field measurements. Soil moisture, biomass, and plant canopy cover area were measured with a relatively high time resolution during the growing season. Pearson's correlation coefficient, root mean square, error, index of agreement, and Nash–Sutcliffe index for moisture simulation were 0.87, 7.8 mm, 0.92, and 0.62 respectively, plant biomass was 0.99, 0.3 t.ha⁻¹, 0.99, 0.98 and also 0.98, 5%, 0.98 and 0.93 were obtained for canopy cover. The sensitive stages of the saffron plant were determined by examining the changes in daughter corms' weight, biomass, and water productivity during different growth stages in response to water stress, and a revised scenario was proposed to improve field irrigation. By applying this scenario and running the model, the amount of daughter corms' weight production increased from 5.550 to 7.693 t.ha⁻¹ and biomass from 7.204 to 9.395 t.ha⁻¹. The water productivity also increased from 3.50 to 3.69 kg.m⁻³ and 85 mm of water consumption was saved.

Keywords: Aqua crop, Moisture, Biomass, Canopy cover.

- 1- MSc. Student of Water Engineering – Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran.
- 2- Associate Professor ., Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran.
- 3- Postdoctoral researcher, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran.
- 4- Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran.
- 5- M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran.



Corresponding author: an-ziaei@um.ac.ir

مقاله پژوهشی

بهبود برنامه ریزی آبیاری زعفران با استفاده از اندازه گیری های میدانی و مدل سازی گیاهی

امیر اکبری^۱، علی نقی ضیائی^{۲*}، سید محمدرضا ناقدی^۳ فر^۳، پرویز رضوانی مقدم^۴ و مهدی غلامی شرفخانه^۵

تاریخ دریافت: ۱ اسفند ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۶ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۲

اکبری، ا.، ضیائی، ع. ن.، ناقدی، فر، س. م. ر.، رضوانی مقدم، پ.، و غلامی شرفخانه، م. ۱۴۰۲. بهبود برنامه ریزی آبیاری زعفران با استفاده از اندازه گیری های میدانی و مدل سازی گیاهی. زراعت و فناوری زعفران، ۱۱(۱): ۶۹-۵۳.

چکیده

زعفران یکی از ارزشمندترین ادویه های جهان به شمار می آید و باتوجه به ارزش اقتصادی بالا و نیاز آبی پایین، کشت آن در شرق ایران از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این پژوهش که در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفت، مدل اکواکراپ جهت شبیه سازی عملکرد گیاه زعفران با استفاده از اندازه گیری های میدانی واسنجی و صحت سنجی شد. بدین منظور رطوبت خاک، زیست توده و سطح سایه انداز گیاه با تفکیک زمانی نسبتاً بالا در طول فصل رشد اندازه گیری گردید. مقدار ضریب همبستگی پیرسون، میانگین ریشه مربعات خطا، شاخص توافق ویلموت و ضریب کارایی نش - ساتکلیف برای شبیه سازی رطوبت به ترتیب 0.87 ، 0.78 میلی متر، 0.92 و 0.62 ، برای زیست توده گیاه 0.99 ، 0.3 تن بر هکتار، 0.99 و 0.98 و همچنین برای سطح سایه انداز گیاه 0.98 ، 0.5 در صد، 0.98 و 0.93 به دست آمد. بازه های حساس گیاه زعفران از طریق بررسی تغییرات وزن بنه دختری، زیست توده و بهره وری آب در طول مراحل مختلف رشد نسبت به تنش آبی تعیین و یک سناریوی اصلاح شده جهت بهبود وضعیت آبیاری مزرعه پیشنهاد گردید. با اعمال این سناریو و اجرای مدل، مقدار وزن بنه دختری از $5/550$ به $7/693$ تن بر هکتار و زیست توده از $7/204$ به $9/395$ تن بر هکتار افزایش یافت. مقدار بهره وری آب نیز از $3/50$ به $3/69$ کیلوگرم بر مترمکعب رسید و 85 میلی متر آب صرفه جویی شد.

کلمات کلیدی: اکواکراپ، رطوبت، سطح سایه انداز، زیست توده گیاهی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب-آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۳- پژوهشگر پسادکتری علوم و مهندسی آب-آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۴- استاد، گروه آگروتکنولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب-آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

*- نویسنده مسئول: an-ziaei@um.ac.ir

مقدمه

در دنیای امروز کمبود آب به یک معضل فراگیر تبدیل شده است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ جمعیت کره زمین به ۹ تا ۱۰ میلیارد نفر برسد که متقابلاً این افزایش جمعیت نیاز به آب را بیشتر می‌کند (Wang et al., 2022). به طور متوسط در دنیا حدود ۹۰ درصد از مصرف آب مربوط به بخش کشاورزی است (Hosseinzadeh et al., 2022). افزایش روزافزون تقاضا برای آب باعث شده بخش کشاورزی تحت‌الشعاع این مسئله قرار بگیرد و بازدهی اقتصادی آن کاهش یابد (Laureti et al., 2020). از این رو مدیریت آب در کشاورزی به یک نیاز اساسی بدل شده است. ابزارهای مختلفی برای مدیریت آب وجود دارند که یکی از ارزان‌ترین و بهترین روش‌ها استفاده از مدل‌های گیاهی است. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی عملکرد محصول با توجه به شرایط آب و هوایی محیط هستند (Mansour et al., 2020). یکی از این مدل‌ها، مدل گیاهی اکواکراپ است که می‌تواند در بهبود مدیریت آبیاری به عنوان ابزاری مؤثر مورد استفاده قرار گیرد (Nassiri-Mahallati & Jahan, 2020).

زعفران (*Crocus sativus* L.) یک گیاه چندساله از خانواده زنبقیان است که در آب و هوای نیمه گرمسیری رشد نموده و با توجه به نیاز آبی پایین و ارزش اقتصادی بالا، این گیاه برای تولید پایدار در مناطق مختلفی از کشور مناسب می‌باشد (Dastranj & Sepaskhah, 2019). همچنین، زعفران گران‌ترین ادویه جهان است که می‌تواند به رشد اقتصادی یک کشور کمک شایانی بنماید (Kour et al., 2022). درباره گیاه زعفران پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر صورت گرفته است. اقحوانی شجری و همکاران (Aghhavani Shajari et al., 2020) اثر مدیریت آبیاری و بافت خاک در بهبود گل و عملکرد بنه زعفران را مورد بررسی قرار داده و انتخاب یک بافت

خاک متوسط و دور آبیاری کم را عاملی مؤثر جهت تحقق این امر قلمداد کردند. دسترنج و سپاسخواه (Dastranj & Sepaskhah, 2019) ضمن بررسی واکنش زعفران به رژیم آبیاری، شوری و شکل کاشت، نشان دادند عملکرد زعفران حساسیت بیشتری نسبت به تنش آبی دارد تا تنش شوری و کاهش عملکردی که با تنش آبی یا شوری حاصل می‌شود در صورت استفاده از آبیاری شیاری قابل جبران است. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2016) اثر دفعات آبیاری و اندازه بنه مادری را بر عملکرد و کیفیت زعفران، رفتار بنه دختری و جذب فسفر مورد بررسی قرار دادند. اثر بنه مادری بر مولفه‌های ذکر شده چشمگیر بود و نشان داده شد که علیرغم ایده‌آل بودن چهار مرتبه آبیاری در صورت کمبود آب، حداقل اعمال دو مرتبه آبیاری اجتناب‌ناپذیر است. سپاسخواه و همکاران (Sepaskhah et al., 2013) یک مدل دینامیکی برای پیش‌بینی عملکرد و رشد زعفران توسعه دادند و مشخص شد این مدل قادر است با دقت خوبی عملکرد زعفران و بنه را برآورد کند. یرمی و همکاران (Yarami et al., 2011) تبخیر-تعرق پتانسیل و ضریب گیاهی زعفران در منطقه نیمه‌خشک ایران را با استفاده از لایسیمتر به دست آوردند. سپاسخواه و کامکار حقیقی (Sepaskhah & Kamgar-Haghighi, 2009) نشان دادند کاهش عملکرد و کیفیت زعفران ناشی از کاهش یا تاخیر باران پاییزی با اجرای یک سیستم مناسب آبیاری جبران‌پذیر است.

بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی گیاه زعفران با مدل اکواکراپ نشان داد تا کنون پژوهش‌های اندکی در زمینه مدل‌سازی گیاه زعفران با این نرم‌افزار انجام شده است. میرصافی و همکاران (Mirsaifi et al., 2016) ثابت کردند که مدل اکواکراپ می‌تواند برای شبیه‌سازی زیست‌توده زعفران دقت خوبی داشته باشد. ذکر این نکته ضروری است که در این

آبیاری مزرعه تحقیقاتی زعفران دانشگاه فردوسی مشهد با شناخت بازه‌های حساس رشد گیاه به تنش خشکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

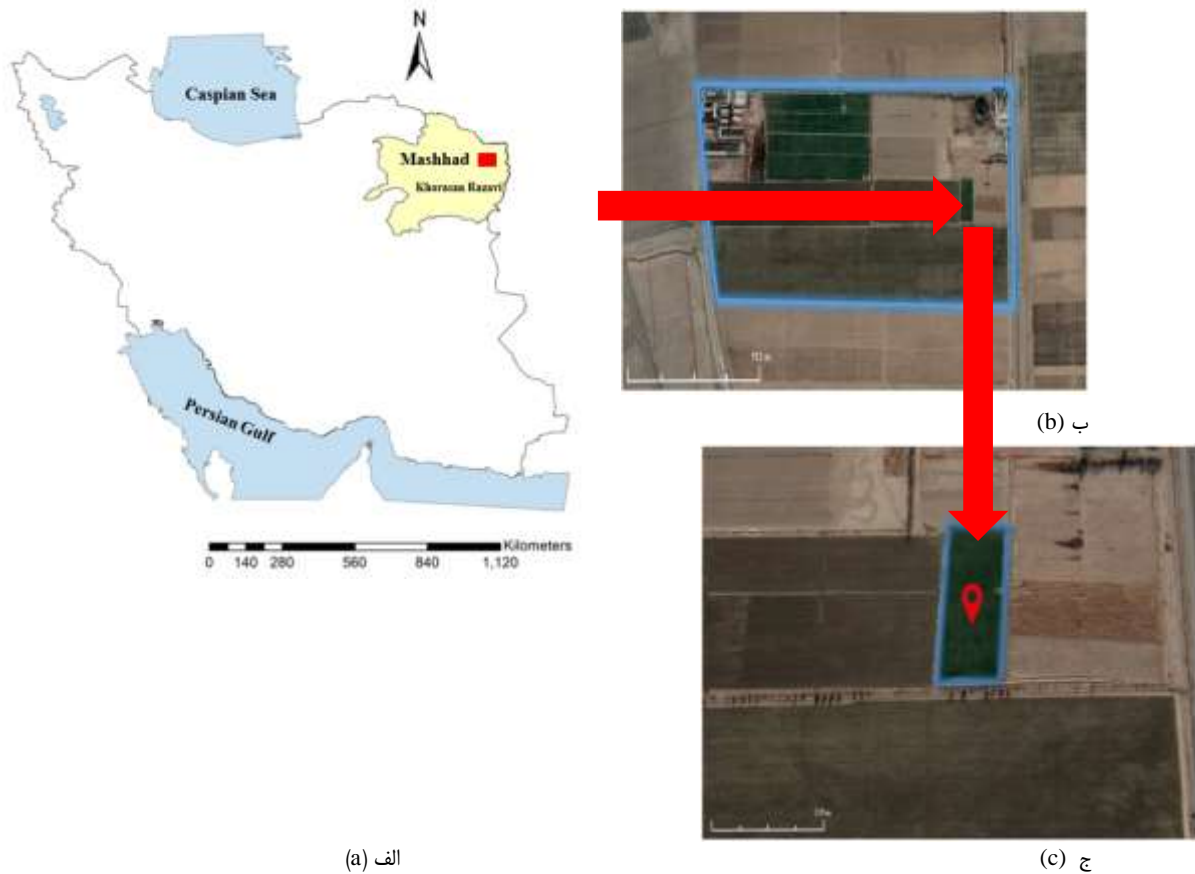
مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا در ۱۰ کیلومتری شهر مشهد قرار گرفته و در شکل ۱ موقعیت آن نمایش داده شده است. شهر مشهد آب و هوایی نیمه خشک دارد؛ زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک از مشخصه‌های این نوع آب و هواست. میانگین بارندگی سالانه در شهر مشهد حدود ۲۵۰ میلی‌متر است (Tehrani et al., 2023). گیاه زعفران در سال ۱۳۹۹ در مزرعه‌ای به مساحت ۵۰۰۰ مترمربع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد کشت شد. آزمایش در سال ۱۴۰۰ در این بخش که گیاه آن، زعفران ۲ ساله محسوب می‌شد، صورت گرفت. آبیاری در ۲ نوبت با استفاده از لوله‌های آبیاری بارانی پی‌فلکس با دبی متوسط ۳۱ لیتر بر ثانیه در آبیاری اول و دبی متوسط ۳۵ لیتر بر ثانیه در آبیاری دوم صورت گرفت. مقدار آب ورودی به مزرعه و مقادیر بارندگی در فصل رشد (از ۱۰ مهر ۱۴۰۰ تا ۲۸ فروردین ۱۴۰۱) در شکل ۲-الف ارائه شده‌اند. همچنین میانگین دمای روزانه، دمای بیشینه و کمینه در طول فصل رشد گیاه زعفران در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. مقدار تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع در شکل ۳ نمایش داده شده است.

جهت محاسبه سطح سایه‌انداز گیاه، از ابتدای دوره رشد تا انتهای آن با فاصله زمانی یک هفته از ۳ نقطه مشخص شده که مساحت هر کدام یک مترمربع بود، با دوربین عکس برداشته شد و همانطور که در شکل ۴ نمایش داده شده است با استفاده از

پژوهش تعداد داده‌های رطوبتی برای بررسی دقت مدل در تخمین رطوبت کافی نبود و هیچ اندازه‌گیری از سطح سایه‌انداز گیاه جهت ارزیابی مدل در تخمین این شاخص صورت نگرفته بود. ابراهیمی پاک و همکاران (Ebrahimipak et al., 2018) در پژوهشی دوساله مدل اکواکراپ را در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای کم آبیاری و مصرف ژئولیت ارزیابی کردند. در این پژوهش نشان داده شد مدل اکواکراپ دقت خوبی در برآورد عملکرد و زیست‌توده زعفران در شرایط کم آبیاری و مصرف ژئولیت دارد و به طور کلی اکواکراپ یک مدل مطلوب گیاهی برای شبیه‌سازی زعفران است اما برخی پارامترهای گیاهی از قبیل عمق مؤثر ریشه، پوشش تاج اولیه و بیشینه سطح سایه‌انداز گیاه اندازه‌گیری نشده بود و از طریق واسنجی به دست آمده بود.

از این رو با توجه به تحقیقات اندکی که در زمینه مدل‌سازی گیاه زعفران با نرم‌افزار اکواکراپ صورت گرفته و نیز با توجه اهمیت این موضوع، مطالعه در این خصوص ضروری بنظر می‌رسد. بنابراین، در پژوهش حاضر مدل اکواکراپ با اندازه‌گیری رطوبت خاک، سطح سایه‌انداز و زیست‌توده گیاه با تفکیک زمانی نسبتاً بالا در طول فصل رشد واسنجی و بازه‌های حساس گیاه نسبت به تنش آبی تعیین شده است که از نوآوری‌های این مطالعه بشمار می‌آیند. همچنین، یک سناریوی اصلاح‌شده جهت بهبود وضعیت بهره‌وری آب مزرعه مورد نظر پیشنهاد شده است. از جمله محدودیت‌های این پژوهش‌های حاضر در نظرنگرفتن تنش‌های شوری، خشکی و دمایی در شبیه‌سازی رشد گیاه زعفران می‌باشد. همچنین پژوهش حاضر می‌تواند بر روی گیاه زعفران در سال‌های متوالی تکرار شود. اهداف اصلی این پژوهش ارائه یک فایل گیاهی برای گیاه زعفران در نرم‌افزار اکواکراپ است به علاوه ارائه یک برنامه بهبود یافته برای برنامه‌ریزی

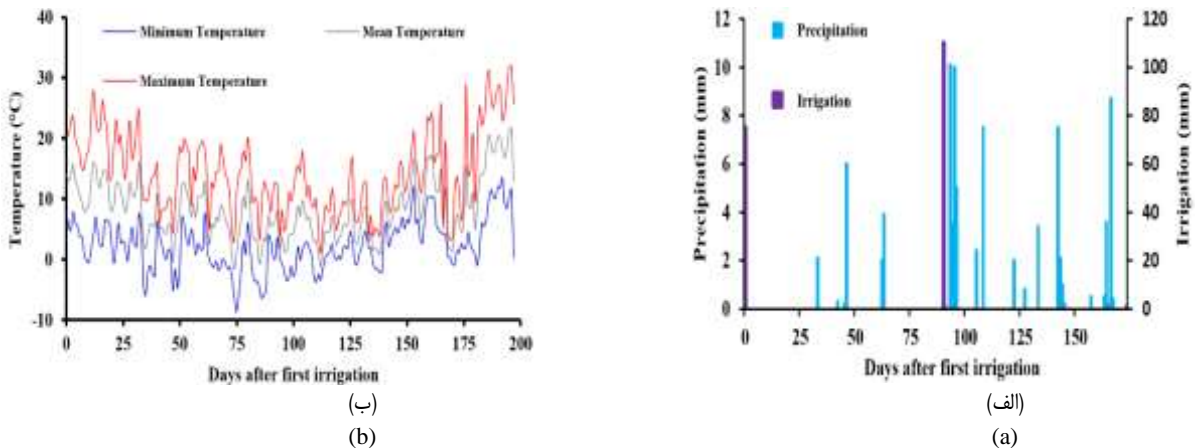
نرم افزار ImageJ مساحت سطح سایه انداز محاسبه شد.



شکل ۱- (الف) موقعیت شهر مشهد در نقشه ایران، (ب) مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد و (ج) مزرعه زعفران
 Figure 1- (a) Location of the Mashhad city in Iran, (b) research farm of Ferdowsi University of Mashhad, (c) saffron field.

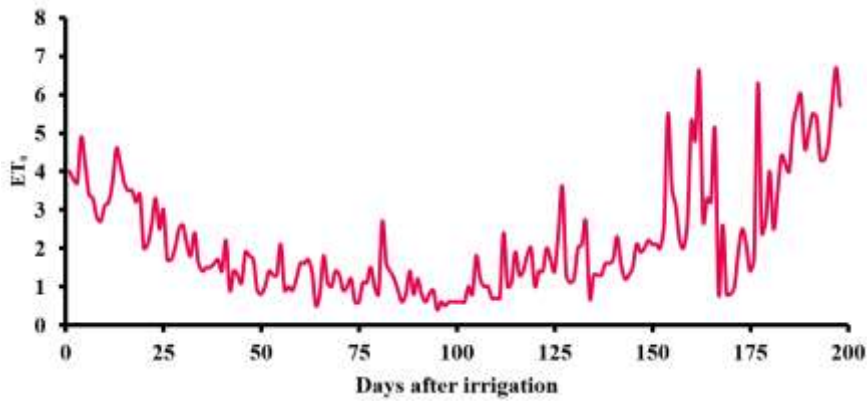
یکبار اندازه گیری گردید. دقت داده های دستگاه TDR در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد مورد بررسی قرار گرفت و از صحت داده های رطوبتی این دستگاه اطمینان حاصل گردید.

بعد از اولین آبیاری که در ۱۰ مهر ماه صورت گرفت، مقدار رطوبت خاک تا عمق ۲۰ سانتی متری با استفاده از دستگاه رطوبت سنج ۱ TDR مدل Spectrum FieldScout از دستگاه رطوبت سنج 350 Soil Moisture حداقل یکبار در هفته (با توجه به شرایط آب و هوایی و تغییرات رطوبت خاک) تا پایان دوره رشد گیاه و همچنین وزن خشک زیست توده و بنه های دختره هر دو هفته



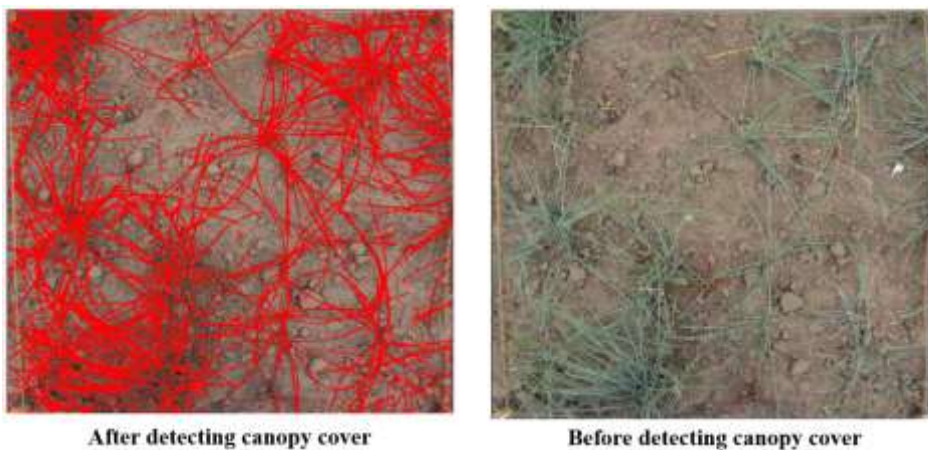
شکل ۲- (الف) تغییرات دما و (ب) مقادیر بارش و آبیاری، در فصل رشد گیاه زعفران

Figure 2 – Trend of temperature and amounts of precipitation and irrigation during the saffron growing season.



شکل ۳- تغییرات تبخیر و تعرق مرجع (ET0) در فصل رشد گیاه زعفران

Figure 3 – Reference evapotranspiration (ET o) during the saffron growing season.

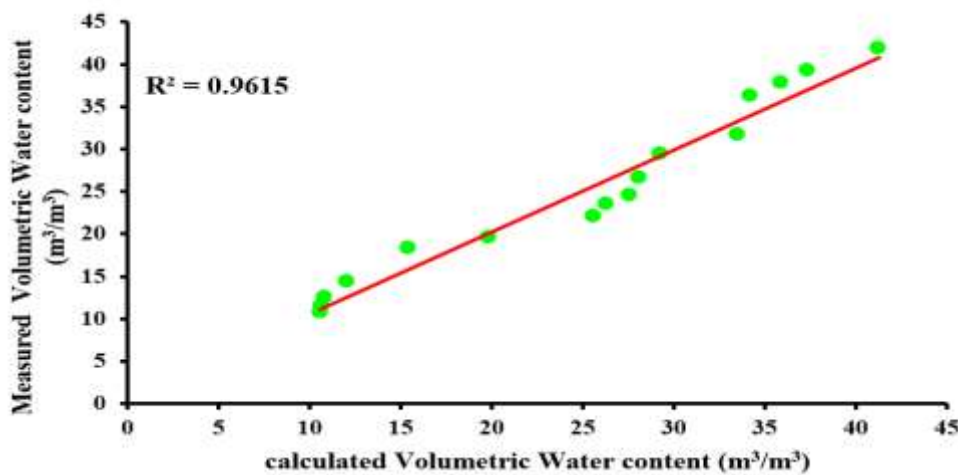


شکل ۴- نحوه تمایز برگ با خاک در نرم افزار

Figure 4 – Distinguishing leaves from the soil in the software.

توسط دستگاه را نشان می‌دهد. داده‌های هواشناسی در مدت زمان دوره رشد گیاه یعنی ۱۰ مهر تا ۲۸ فروردین ماه از قبیل سرعت باد در دومتري، میانگین بارش ماهانه، دمای بیشینه و کمینه از ایستگاه هواشناسی مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد که در فاصله ۴۰۰ متری با زمین مورد مطالعه بود، به دست آمد.

برای این منظور یک گلدان خاک به قطر ۱۵ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر اشباع و رطوبت آن به دوسورت وزنی با ترازویی به دقت ۰/۰۱ گرم و با استفاده از دستگاه به مدت ۴۵ روز تا زمانی که به صورت طبیعی در معرض هوا خشک گردید، در ۱۶ نوبت اندازه‌گیری شد. شکل ۵ رابطه بین داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی در مقابل رطوبت اندازه‌گیری شده



شکل ۵- مقایسه مقادیر رطوبت حجمی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

Figure 5 – Comparison of calculated and measured volumetric water content.

نمونه‌گیری تعیین گردید. آزمایش هدایت هیدرولیکی با روش بار افتان و تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری صورت گرفت. نتایج این آزمایشات در جدول ۱ گزارش شده است. در هر نوبت آبیاری، نمونه‌ای از آب آبیاری تهیه گردید و هدایت الکتریکی آن در آزمایشگاه کیفیت آب گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری گردید. میانگین هدایت الکتریکی آب آبیاری $0.1 \pm \frac{ds}{m}$ به دست آمد.

۳۰ نمونه از خاک مزرعه زعفران تا عمق ۶۰ سانتی‌متری (از هر عمق ۳ نمونه) به صورت تصادفی جهت انجام آزمایشات بافت خاک، و مشخصات هیدرولیکی خاک تهیه شد و به آزمایشگاه آب و خاک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد منتقل گردید. برای تعیین وزن مخصوص ظاهری نیز به صورت جداگانه با استفاده از ظرف‌های نمونه‌گیر استوانه‌ای، از محل آزمایش از هر عمق ۳ نمونه خاک تهیه گردید و وزن مخصوص ظاهری با تقسیم وزن خشک به حجم استوانه

جدول ۱ - مشخصات خاک مزرعه مورد مطالعه
Table 1 - Soil characteristics of the studied field

| درصد رطوبت حجمی Soil water content | | | | | درصد ذرات خاک Percentage of soil particles | | | | |
|---|--|--|--|---|---|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| نقطه بزمردگی θ_r ($m^3.m^{-3}$) | ظرفیت زراعی θ_{Fc} ($m^3.m^{-3}$) | نقطه اشباع θ_s ($m^3.m^{-3}$) | هدایت هیدرولیکی K_s ($mm.day^{-1}$) | وزن مخصوص ظاهری ρ_b ($g.cm^{-3}$) | بافت Texture | سیلت Silt (%) | رس Clay (%) | شن Sand (%) | عمق Depth (cm) |
| 8.5 | 28 | 43 | 49.97 | 1.47 | Loam | 28.92 | 19.44 | 51.64 | 0-10 |
| 9.3 | 25.5 | 44.6 | 56.18 | 1.35 | Sandy Loam | 26.2 | 19.44 | 54.36 | 10-20 |
| 11 | 26 | 43.3 | 26.20 | 1.57 | Sandy clay Loam | 25.56 | 20.44 | 54 | 20-30 |
| 9 | 24.5 | 45 | 94.10 | 1.55 | Sandy Loam | 26.56 | 15.44 | 58 | 30-40 |
| 10.9 | 26.8 | 42 | 81.54 | 1.44 | Loamy Sand | 22.2 | 11.44 | 66.36 | 40-60 |

مدل اکوآکراپ^۱

نرم‌افزار اکوآکراپ توسط سازمان خواربار جهانی^۲ جهت شبیه‌سازی رشد گیاهان ارائه شده است. از ویژگی‌های اساسی این مدل می‌توان به استفاده از مفاهیم ساده و حتی‌المقدور فیزیکی برای توسعه الگوریتم محاسباتی اشاره نمود. این مدل با برآورد بیلان آب در منطقه ریشه گیاه از طریق در نظر گرفتن اختلاف ورودی‌ها (شامل بارش، آبیاری و صعود مویینه) و مقدار آب خروجی (شامل نفوذ عمقی، رواناب و تبخیر-تعرق) که برابر با مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه خواهد بود، رشد گیاه را با توجه به تنش‌های محیطی و مدیریتی شبیه‌سازی می‌نماید. ضرایب تنش آبی، شوری، دمایی، حاصلخیزی و وجود علف‌های هرز در این مدل با توابع آستانه‌ای توصیف شده‌اند. از جمله مهم‌ترین عوامل تنش‌زای موجود در این مدل تنش خشکی است که خود با مقدار آب موجود در ناحیه ریشه ارتباط مستقیم دارد و بر گسترش سطح سابه‌انداز، بسته‌شدن روزنه‌ها، شاخص برداشت و پیری زودرس گیاه تأثیر گذار است (Raes et al., 2009). تعرق پتانسیل گیاه در مدل اکوآکراپ با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$T_p = K_{cb} \times ET_0 \quad (1)$$

در رابطه فوق، K_{cb} جزء تعرق از ضریب گیاهی، T_p تعرق پتانسیل روزانه [L] و ET_0 تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع [L] می‌باشد. در مدل اکوآکراپ چنانچه فرض نماییم که تنها عامل تنش‌زا تنش خشکی است، بعد از محاسبه تعرق پتانسیل با استفاده از رابطه (۳) می‌توان تعرق واقعی گیاه (T_r) را با استفاده از رابطه ۳ محاسبه نمود.

$$T_r = K_s \times K_{cb} \times ET_0 \quad (2)$$

که در این معادله، K_s ضریب تنش خشکی (که حد آستانه و شیب کاهش تعرق برای این ضریب وابسته به نوع گیاه است) می‌باشد. پس از محاسبه تعرق واقعی، زیست‌توده^۳ گیاه با استفاده از معادله ۴ به دست می‌آید.

$$B = WP^* \times \sum \frac{T_r}{ET_0} \quad (3)$$

که در آن B زیست‌توده تجمعی روزانه گیاه [M] و WP^* بهره‌وری آب نرمال شده گیاه [ML^{-3}] می‌باشد. از آنجایی که بهره‌وری آب (WP)، پارامتری متأثر از شرایط آب و هوایی محل کشت است، به منظور محاسبه زیست‌توده، نرم‌افزار اکوآکراپ پارامتر WP^* که مستقل از شرایط آب و هوایی محل کشت می‌باشد را در نظر می‌گیرد. در نهایت جهت محاسبه عملکرد گیاه،

از رابطه ۵ استفاده می‌شود.

$$Y = HI \times B \quad (۴)$$

که HI شاخص برداشت و Y عملکرد گیاه [M] است (Steduto et al., 2009). فایل‌های ورودی به مدل اکواکراپ شامل ۴ بخش اصلی اطلاعات اقلیمی، مشخصات گیاه، ویژگی‌های خاک و مدیریت هستند. در بخش داده‌های اقلیمی با الگوریتمی مشابه با مدل ETO Claculator و با استفاده از روش فائو-پنمن مونتیث، تبخیر و تعرق گیاه مرجع محاسبه می‌شود. بعلاوه، سایر داده‌های ورودی مانند دمای کمینه و بیشینه روزانه، بارش روزانه، سرعت باد روزانه در ارتفاع ۲ متر، غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در جو، تابش خورشیدی و رطوبت نسبی هستند که در این پژوهش از اطلاعات ایستگاه هواشناسی مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد. عمق ریشه، شاخص برداشت، تاریخ کاشت گیاه، تعیین مبنای زمانی رشد گیاه (تقویم درجه-روز یا تقویم تاریخی)، پارامترهای رشد گیاه (فنولوژی)، شاخص بهره‌وری آب نرمال شده، تنش‌های آبی، شوری و کودی (در صورت وجود)، داده‌هایی هستند که در قسمت مشخصات گیاه نرم‌افزار وارد می‌شوند. در قسمت خاک نرم‌افزار بایستی هدایت هیدرولیکی اشیاع، در صد رطوبت خاک (اشیاع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم) و بافت خاک در حداکثر ۵ عمق وارد شوند. در بخش مدیریت نیز اطلاعات مورد نیاز شامل تعداد دفعات و عمق آبیاری، هدایت الکتریکی آب و نحوه مدیریت مزرعه وارد می‌شود (Raes et al., 2009).

باید توجه شود در این پژوهش مقدار Dry yield که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود، وزن بنه دختری در نظر گرفته می‌شود. مسافری ضیالدینی و همکاران (Mosafery Zyaaldiny et al., 2020) نیز عملکرد بنه دختری را در نرم‌افزار اکواکراپ

شبیه‌سازی کردند.

تعیین مراحل حساس به تنش آبی در گیاه

در نرم‌افزار اکواکراپ، مراحل رشد گیاه به چهار بخش اصلی تقسیم می‌شود. این مراحل به ترتیب شامل بخش جوانه‌زنی^۱، رویشی^۲، گلدهی^۳ و تولید محصول^۴ می‌شوند. البته در این پژوهش تولید محصول به منزله تولید بنه زعفران و نه کلانه آن در نظر گرفته شد و مرحله چهارم رشد، مرحله تولید بنه اطلاق می‌گردد. به منظور تعیین مراحل حساس تنش آبی در گیاه زعفران، ابتدا مدل با حالت "آبیاری با تامین نیاز خالص" اجرا شد. سپس ۱۲ مرتبه به صورت مجزا به هر مرحله از رشد گیاه بدون اعمال تنش به مراحل دیگر، تنش آبی وارد شد تا میزان حساسیت هر مرحله مشخص شود. در نهایت نمودار کاهش مقادیر زیست‌توده، وزن بنه دختری و بهره‌وری آب در مقابل تنش‌های اعمال شده نسبت به حالت آبیاری خالص (که منجر به رشد گیاه به صورت پتانسیل خواهد شد) برای هر مرحله ترسیم شد.

ارزیابی مدل

در این پژوهش جهت سنجش نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده از شاخص‌های آماری میانگین ریشه مربعات خطا^۵ (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون^۶ (r)، شاخص توافق ویلموت^۷ و ضریب کارایی نش - ساتکلیف^۸ استفاده شده است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad (۵)$$

5- Root-Mean-Square Error (RMSE)

6- Pearson correlation coefficient

7- Index of agreement

8- Nash - Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE)

1- Germination or transplant recovery

2- Vegetative stage

3- Flowering

4- Yield formation and ripening

خیس شده و عمق آبیاری در هر آبیاری به صورت میدانی (با کنتور حجمی) اندازه‌گیری شده و در فایل آبیاری (با پسوند IRR) ذخیره شدند. فایل خاک نرم‌افزار اکواکراپ نیز با استفاده از اندازه‌گیری‌های ارائه شده در جدول ۱ تولید شدند.

پارامترهای فایل گیاهی در جدول ۲ ارائه شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ به طور مستقیم در فایل گیاهی نرم‌افزار اکواکراپ وارد شده‌اند. از این پارامترها جهت واسنجی پارامترهای دیگر در فایل گیاهی نرم‌افزار اکواکراپ و محاسبه خطای شبیه‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی در مزرعه زعفران که شامل رطوبت خاک، سطح سایه‌انداز گیاه و زیست‌توده بود، استفاده شد. برای ارزیابی خطا از معادلات ۶ و ۷ استفاده گردید. بعد از مشاهده نتایج برای ورودی‌های مختلف، بهترین ترکیب از داده‌های واسنجی شده به عنوان ورودی‌های نهایی انتخاب شدند.

شکل ۶ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده مدل را برحسب مقدار آب موجود در خاک (mm) در طی روزهای بعد از اولین آبیاری نشان می‌دهد.

همچنین شکل ۷ مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و برآورد شده توسط نرم‌افزار در طی روزهای بعد از آبیاری را نمایش می‌دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\bar{P}_i| + |\bar{O}_i|)^2} \right] \quad (۸)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۹)$$

که در آن، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{O}_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر برآورد شده، \bar{P}_i میانگین مقادیر برآورد شده، و n تعداد داده‌ها هستند. چنانچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود و هرچه مقدار آن بیشتر از صفر باشد شبیه‌سازی ضعیف‌تری وجود داشته است. مقادیر r بین ۱ و -۱ قرار دارد و همبستگی بین دو متغیر مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. هرچه مقدار r به ۱ نزدیک‌تر می‌باشد، مدل قوی‌تر خواهد بود. مقدار d از منفی بی نهایت تا ۱ متغیر بوده و مقدار ۱ به معنای توافق کامل مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورده شده است. همچنین مقدار NSE نیز از منفی بی نهایت تا ۱ متغیر بوده و مقدار ۱ نشان می‌دهد مدل کارایی بیشتری دارد.

نتایج و بحث

با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده در مراحل میدانی این مقاله فایل‌های ورودی نرم‌افزار اکواکراپ تولید شدند. این فایل‌ها شامل داده‌های هواشناسی، فایل خاک، آبیاری و مدیریت مزرعه، داده‌های گیاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی (Field Data) است. پارامترهای ورودی فایل هواشناسی با توجه به داده‌های نشان داده شده در شکل -ب و نیز سایر پارامترهای هواشناسی دریافت شده از ایستگاه هواشناسی مزرعه تولید شده و مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع محاسبه شد. مقدار بارندگی نیز مطابق با اندازه‌گیری‌های ارائه شده در شکل -الف در نظر گرفته شدند. برای تهیه فایل آبیاری نیز نوع سیستم آبیاری به همراه سطح

جدول ۲- پارامترهای گیاهی ورودی به نرم افزار
Table 2 - Crop parameters input to the software

| توضیحات Description | مقدار Value | پارامتر Parameter |
|------------------------|--|---|
| Measured | 5 cm ² .plant ⁻¹ | پوشش گیاهی بنه هنگام جوانه زنی Canopy size transplanted seedling |
| Measured | 153 plant.m ⁻² | تراکم کاشت Plant density |
| - | (Transplanting) | نوع کاشت Type of planting method |
| Measured | 7.66 % | پوشش تاج اولیه CC ₀ |
| Measured | 36 day | مدت زمان کاشت تا جوانه زنی Recovered |
| Measured | 133 day | مدت زمان کاشت تا رسیدن به رشد بیشینه سطح سایه انداز Max canopy cover |
| Measured | 193 day | مدت زمان کاشت تا رسیدن به پیری Senescence |
| Measured | 198 day | مدت زمان کاشت تا بلوغ گیاه Maturity |
| Measured | 0.76 | بیشینه رشد سطح سایه انداز Maximum canopy cover |
| Measured | 0.65 | جز تفرق از ضریب گیاهی K _{cb} |
| Calibrated | 20 g.m ⁻³ | بهره‌وری آب نرمال شده Crop water productivity- normalized climate and [CO ₂] |
| Measured | 80 | شاخص برداشت مرجع Reference harvest index |
| Measured | 0.3 m | عمق مؤثر ریشه Maximum effective rooting depth |
| Measured | 180 day | مدت زمان رسیدن به عمق بیشینه ریشه From day 1 after transplanting to max depth |
| Calibrated | 0.25 | ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه‌ها Stomatal closure-pupper |
| Calibrated | 0.85 | ضریب تخلیه آب خاک برای پیری سطح سایه انداز Early canopy senescence-pupper |
| Default | 2°C | آستانه پایین دما برای رشد Base temperature |
| Default | 30°C | آستانه بالای دما برای رشد Upper temperature |
| Default | 91 day | طول دوره گلدهی Flowering |
| Calibrated | 8 | ضریب کاهش پوشش CDC |

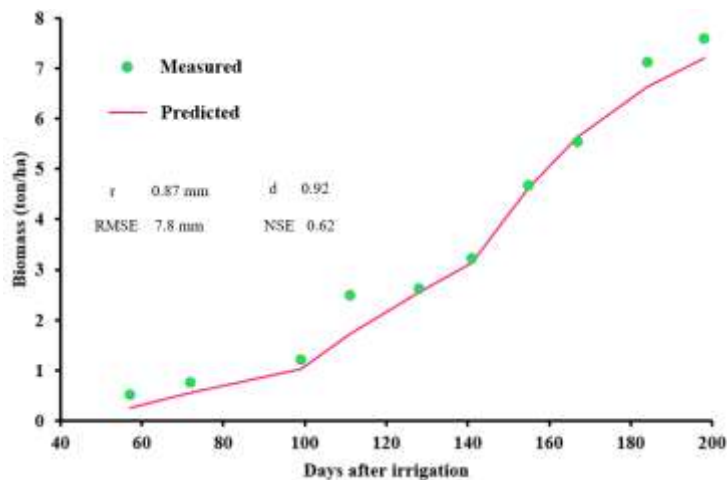
اکواکراپ و رطوبت اندازه‌گیری شده در مزرعه زعفران به ترتیب ۷/۸ میلی‌متر، ۰/۸۷، ۰/۰۹۲ و ۰/۶۲ بود. همچنین میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r)،

میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون (r)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) برای رطوبت شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار

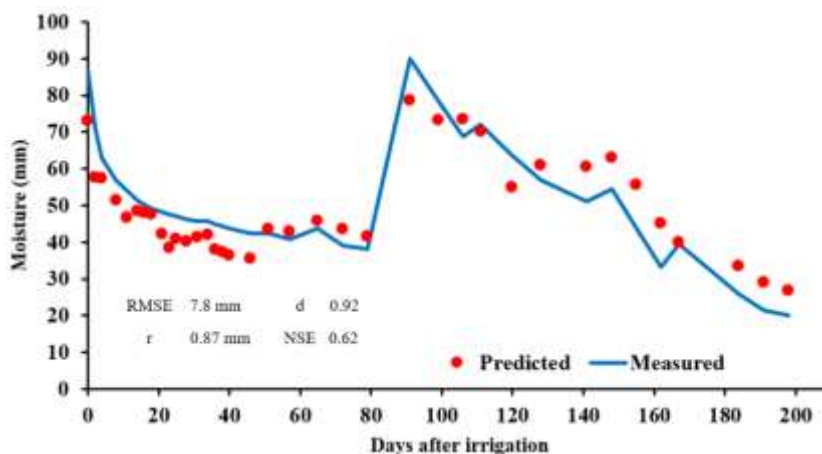
و نیز حرکت آب در درون خاک است.

تعیین مراحل حساس گیاه نسبت به تنش آبی

نتایج تعیین مراحل حساس گیاه نسبت به تنش آبی نشان داد، وزن بنه دختری در مرحله جوانه‌زنی بعد از اولین تنش، در نقطه رطوبتی ۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی اتفاق می‌افتد به بیشترین مقدار خود یعنی ۸/۷۹۵ تن بر هکتار که بیشتر از حالت آبیاری با نیاز خالص است، رسید.



شکل ۷- مقایسه زیست‌توده اندازه‌گیری شده و زیست‌توده شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار
Figure 7 – Comparison of measured and predicted biomass with software.



شکل ۶- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار
Figure 6 – Comparison of measured and predicted moisture with software.

مرحله رویشی نیز در نقطه رطوبتی ۲۲ درصد کمتر از ظرفیت زراعی بیشترین بهره‌وری آب به دست آمد و بعد از شروع روندی نزولی در نقطه رطوبتی ۲۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی متوقف شد. دلیل افزایش بهره‌وری آب در تنش‌های شدید به ویژه در مراحل جوانه‌زنی و تولید محصول علیرغم کاهش مقادیر زیست‌توده و وزن بنه دختری تولیدی، کاهش مقادیر آب آبیاری است که سبب افزایش بهره‌وری آب می‌گردد و لازم است در محاسبات مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری به آن توجه شود.

باید توجه شود در محاسبه مقدار رطوبت ظرفیت زراعی بعد از قرار دادن مقدار اندازه‌گیری شده در مدل نتایج خوبی به دست نیامد و پس از تغییر پارامترهای خاک نتایج مطلوبی حاصل گردید. لذا این نتایج بر اساس رطوبت ظرفیت زراعی جدید که مقدار آن تا عمق ریشه ۳۵ درصد به دست آمد، تحلیل شد.

اصلاح برنامه‌ریزی آبیاری مزرعه

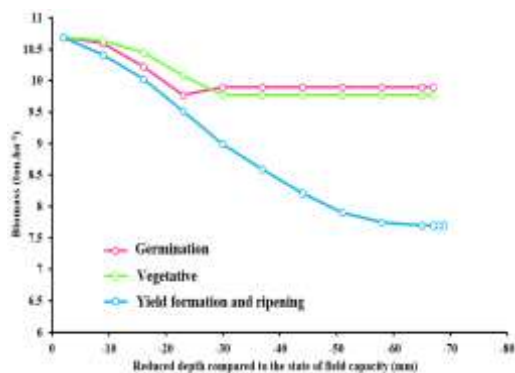
پس از واسنجی شدن مدل، وضعیت فعلی مزرعه به لحاظ بهره‌وری مصرف آب مشخص گردید. در شکل الف- تغییرات رطوبت در پروفیل خاک مزرعه به همراه حدود آستانه‌ای رطوبت نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در شرایط کنونی مزرعه در هر دو نوبت، بیش‌آبیاری شده است. به منظور بهبود وضعیت تولید بنه دختری و زیست‌توده در مزرعه زعفران، عمق آبیاری در هر دو نوبت کاهش و تعداد دفعات آبیاری افزایش یافت.

شکل الف - نشان می‌دهد بین آبیاری اول و دوم در شرایط واقعی مزرعه، موجودی رطوبت خاک کاهش چشمگیری داشته و مقدار آن از حد آستانه‌ای مربوط به گسترش سطح سایه‌انداز کمتر شده است. این کاهش رطوبت در این محدوده سبب کاهش تولید بنه دختری و زیست‌توده گردید. بعد از آبیاری دوم (۱۱۰ میلی‌متر) که مقدار آن بیشتر از آبیاری اول (۷۵ میلی‌متر) بود و بدلیل بارندگی‌هایی که در آن دوره صورت گرفت، علیرغم

سپس تا نقطه رطوبتی ۲۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی روند کاهش داشت و بعد از این نقطه، روند نزولی متوقف شد. وزن بنه دختری در مرحله رویشی نیز مانند مرحله جوانه‌زنی در رطوبت ۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی به بیشترین مقدار خود که ۸/۷۴۹ تن بر هکتار است، رسیده و روند کاهش که بعد از آن آغاز شده و در نقطه رطوبتی ۳۵ درصد کمتر از ظرفیت زراعی متوقف گردید. این در حالی است که در آخرین مرحله که تولید محصول است، گیاه زعفران بیشترین حاصل‌خیز را نسبت به مراحل دیگر به تنش آبی نشان داد و در نقطه رطوبتی ۶۶ درصد پایین‌تر از ظرفیت زراعی به مقدار ۵/۷۴ تن بر هکتار رسید (شکل ۸- الف). زیست‌توده زعفران در مرحله تولید بنه بیشترین حاصل‌خیز را نسبت به تنش آبی اعمال شده داشت و کمترین مقدار آن به ۷/۶۹۲ تن بر هکتار رسید. در مرحله جوانه‌زنی مقدار زیست‌توده تا نقطه رطوبتی ۲۲ درصد کمتر از ظرفیت زراعی روند نزولی دارد و در نقطه رطوبتی ۲۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی افزایش یافته و مقدار آن در نقاط بعدی ثابت می‌شود. علت این امر افزایش جزئی شاخص برداشت در این نقطه است. در مرحله رویشی مقادیر زیست‌توده تا نقطه رطوبتی ۲۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی روندی نزولی داشته و در این نقطه متوقف می‌شود (شکل ۸- ب). همچنین شکل ۸- ج نشان می‌دهد مقدار بهره‌وری آب نیز در مرحله تولید محصول در مقایسه با مراحل دیگر، حساسیت بیشتری نسبت به تنش آبی دارد. کمترین مقدار بهره‌وری آب در مرحله تولید محصول در نقاط ۳۷ و ۴۴ میلی‌متری ۳/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. در مرحله جوانه‌زنی پس از اعمال تنش در نقطه رطوبتی ۸ درصد کمتر از ظرفیت زراعی بهره‌وری افزایش یافت، سپس روند نزولی تا نقطه رطوبتی ۲۲ درصد کمتر از ظرفیت زراعی را در پیش گرفت و بعد از این عمق دوباره به بیشترین مقدار بهره‌وری آب رسید. در

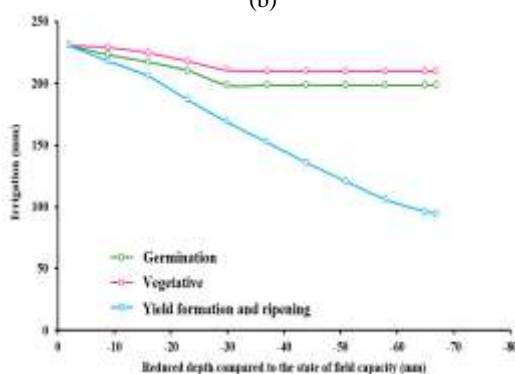
افزایش عملکرد، تعداد دفعات آبیاری از ۲ به ۵ مرتبه افزایش یافت.

اینکه گیاه در مرحله حساس به تنش آبی قرار داشت، اما (تولید محصول بنه) دچار تنش آبی نشد. بنابراین علت کاهش عملکرد محصول زعفران تنش آبی بین آبیاری اول و دوم بود. جهت



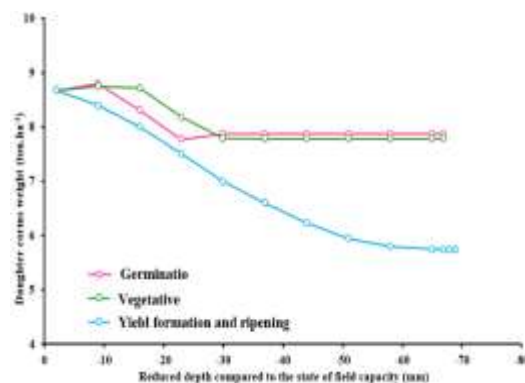
ب

(b)



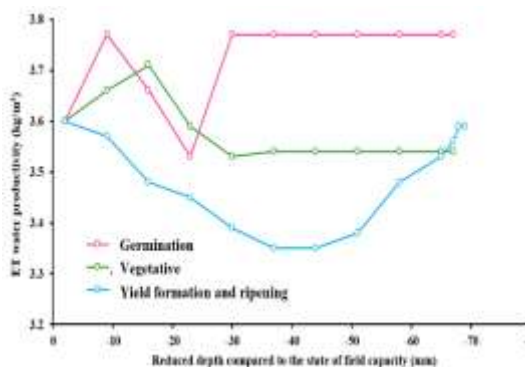
د

(d)



الف

(a)



ج

(c)

شکل ۸ - (الف) تغییرات وزن بنه‌های دختری در مراحل رشد گیاه نسبت به تنش ایجاد شده، (ب) تغییرات زیست توده در مراحل رشد گیاه نسبت به تنش ایجاد شده، (ج) تغییرات بهره‌وری آب در مراحل رشد گیاه نسبت به تنش ایجاد شده و (د) تغییرات آبیاری با توجه به تنش ایجاد شده

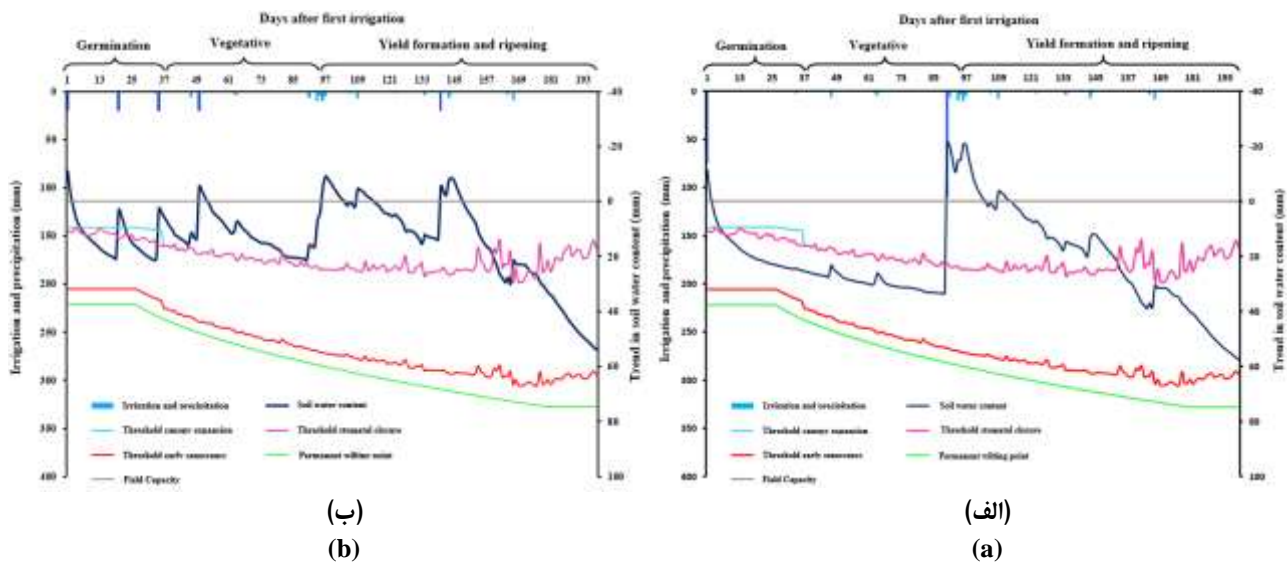
Figure 8 – (a) Trend in the production of daughter corms weight in the growth stages of the plant compared to the created water stress, (b) Biomass trend in plant growth stages compared to the created water stress, (c) Trend in ET water productivity in the stages of plant growth compared to the created water stress, (d) Irrigation trend according to the created water stress.

۵/۵۵۰ تن برهکتار به ۷/۶۹۳ تن برهکتار و زیست توده از ۷/۲۰۴ تن برهکتار به ۹/۳۹۵ تن برهکتار افزایش یافت. همچنین مقدار بهره‌وری آب نیز از ۳/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۳/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. با انجام این اصلاحات ۸۵ میلی‌متر آب صرفه‌جویی شد و عملکرد محصول افزایش یافت. عزیزی زوهان و همکاران ۲۰۰۹ نیز با بررسی روش آبیاری بر

عمق آبیاری اعمال شده در شرایط واقعی ۱۸۵ میلی‌متر ثبت شده بود که در شرایط اصلاح شده مقدار آن به ۱۰۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. بین مرتبه اول تا دوم آبیاری، ۳ مرتبه آبیاری با عمق ۲۰ میلی‌متر انجام شد و تاریخ آبیاری دوم در شرایط واقعی به دلیل وقوع بارندگی و عدم نیاز گیاه به آب، به ۵۰ روز بعد از آن تغییر داده شد. نتایج نشان داد، وزن بنه دختری تولیدی از

منظر اقتصادی به صرفه باشد. در جدول ۳ مقدار آب آبیاری، وزن بنه دختری تولیدی، زیست توده، مقدار آب زهکشی شده و بهره‌وری آب برآورد شده توسط مدل اکواکراپ در شرایط واقعی مزرعه و اصلاحی نشان داده شده است.

تولید زعفران نشان دادند آبیاری بیش از حد نمی‌تواند عملکرد را افزایش دهد (Azizi-Zohan et al., 2009). همچنین (Koocheki et al., 2016) ثابت کردند که آبیاری گیاه زعفران با ۷۵ درصد نیاز آبی آن در نواحی خشک و نیمه خشک می‌تواند از



شکل ۹ – (الف) تغییرات رطوبت خاک شبیه‌سازی شده در شرایط واقعی مزرعه و (ب) تغییرات رطوبت خاک شبیه‌سازی شده مزرعه پس از اصلاح مقادیر و دور آبیاری

Figure 9 – (a) Simulated soil moisture trend in real field condition, (b) Simulated field soil moisture trend after modifying irrigation depths and interval.

جدول ۳- مقایسه نتایج آبیاری واقعی مزرعه و شرایط اصلاح شده

| | زیست توده Biomass (t.ha ⁻¹) | وزن بنه دختری Daughter corms weight (t.ha ⁻¹) | بهره‌وری آب (kg.m ⁻³) ET water productivity | آب آبیاری Irrigation (mm) | مقدار آب زهکشی شده Drained (mm) |
|--|---|---|--|---------------------------------|--|
| شرایط واقعی Real condition | 7.204 | 5.550 | 3.5 | 185 | 94.5 |
| شرایط اصلاح شده Modified condition | 9.395 | 7.693 | 3.69 | 100 | 33.4 |

از این پژوهش و سنجی مدل اکواکراپ برای شبیه‌سازی رشد گیاه زعفران بود. بدین منظور رطوبت خاک، زیست توده و سطح سایه‌انداز گیاه در طول فصل رشد اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی نشان داد نرم‌افزار اکواکراپ قادر

نتیجه‌گیری

یکی از ارزان‌ترین و بهترین روش‌ها جهت مدیریت و افزایش بهره‌وری آب استفاده از مدل‌های گیاهی است. اکواکراپ از مدل‌هایی است که می‌تواند در مدیریت آب مؤثر واقع شود. هدف

کیلوگرم بر مترمکعب و همچنین زیست‌توده ۳۰ درصد و وزن بانه دختری ۳۸ درصد افزایش پیدا کرد. بنابراین با تغییر مختصری در زمان و مقدار آبیاری، بهره‌وری به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

پژوهش حاضر صرفاً گامی در راستای افزایش بهره‌وری آبیاری با تاکید بر تنش‌های خشکی با استفاده از مدل‌سازی گیاهی است. سایر عوامل مانند تنش شوری و اثر آن‌ها بر مراحل مختلف رشد گیاه یا وا سنجی مدل با بانه‌های چند ساله از جمله مواردی است که نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

به شبیه‌سازی فرآیندهای رشد و توسعه گیاه و نیز حرکت آب در درون خاک برای گیاه زعفران می‌باشد.

پس از وا سنجی مدل و تعیین بازه‌های حساس به تنش آبی مشخص شد مرحله تولید بانه حساس‌ترین مرحله رشد گیاه در تولید بانه دختری و زیست‌توده است و تنش آبی تا ۶۶ درصد پایین از ظرفیت زراعی این مقادیر را کاهش می‌دهد. پس از تعیین بازه‌های حساس یک سناریو اصلاح‌شده برای بهبود آبیاری وضعیت آبیاری مزرعه پیشنهاد شد که پس از اجرای مدل با این سناریو ۸۵ میلی‌متر آب صرفه‌جویی شد و بهره‌وری آب ۰/۱۹

منابع

- Azizi-Zohan, A.A., Kamgar-Haghighi, A.A., and Sepaskhah, A.R. 2009. Saffron (*Crocus sativus* L.) production as influenced by rainfall, irrigation method, and intervals. *Archives of Agronomy and Soil Science* 55 (5): 547-555. <https://doi.org/10.1080/03650340802585205>.
- Dastranj, M., and Sepaskhah, A.R. 2019. Saffron response to irrigation regime, salinity, and planting method. *Scientia Horticulturae* 251: 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.027>.
- Ebrahimipak, N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., and Khashei Suiki, A. 2018. Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*Crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amounts. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 8 (1): 117-132. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.236158.667708>.
- Hosseinzadeh, M., Samadi Foroushani, M., and Sadraei, R. 2022. Dynamic performance development of entrepreneurial ecosystem in the agricultural sector. *British Food Journal* 124 (7): 2361-2395. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0909>.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and 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. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.
- Koocheki, A., Ebrahimian, E., and Seyyedi, S.M. 2016. How irrigation rounds and mother corm size control saffron yield, quality, daughter corms behavior and phosphorus uptake. *Scientia Horticulturae* 213: 132-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.028>.
- Koocheki, A., Seyyedi, S.M., and Eyni, M.J. 2014. Irrigation levels and dense planting affect flower yield and phosphorus concentration of saffron corms under semi-arid region of Mashhad, Northeast Iran. *Scientia Horticulturae* 180: 147-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.031>.
- Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Dhiman, G., Juneja, S., Viriyasitavat, W., and Islam, M.A. 2022. Smart-hydroponic-based framework for saffron cultivation: a precision smart agriculture perspective. *Sustainability* 14 (3): 1120. <https://doi.org/10.3390/su14031120>.
- Laureti, T., Benedetti, I., and Branca, G. 2021. Water use efficiency and public goods

- conservation: A spatial stochastic frontier model applied to irrigation in Southern Italy. *Socio-Economic Planning Sciences* 73: 100856. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2020.100856>.
- Mansour, H.A., El-Hady, M.A., Eldardiry, E.I., and Saad, S.S. 2020. Using aquacrop model to evaluate the effect of pulse drip irrigation techniques and water stress on maize water productivity. *Plant Archives* 20 (1): 3232-3242.
- Mirsafi, Z.S., Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., and Kamgar-Haghighi, A.A. 2016. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae* 211: 343-351. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.020>.
- Mosafery Zyaaldiny, H., Alizadeh, A., and Rezvani Moghaddam, P. 2020. Effect of irrigation regimes on crop water use efficiency of saffron (Case study Bakharz region of Khorasan Razavi, Iran). M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English Summary).
- Nassiri-Mahallati, M., and Jahan, M. 2020. Using the AquaCrop model to simulate sesame performance in response to superabsorbent polymer and humic acid application under limited irrigation conditions. *International Journal of Biometeorology* 64(12): 2105-2117. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-020-02001-z>.
- Sepaskhah, A.R., Amini-Nejad, M., and Kamgar-Haghighi, A.A. 2013. Developing a dynamic yield and growth model for saffron under different irrigation regimes. *International Journal of Plant Production* 7(3): 437-504. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2013.1115>.
- Sepaskhah, A.R., and Kamgar-Haghighi, A.A. 2009. Saffron irrigation regime. *International Journal of Plant Production* 3 (1): 1-16.
- Aghhavani Shajari, M.A., Moghaddam, P.R., Ghorbani, R., and Koocheki, A. 2020. The possibility of improving saffron (*Crocus sativus* L.) flower and corm yield through the irrigation and soil texture managements. *Scientia Horticulturae* 271: 109485. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109485>.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101 (3): 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
- Tehrani, A., Ziaei, A.N., and Naghedifar, S.M. 2023. Irrigation scheduling of walnut seedlings using HYDRUS-1D and Taguchi optimization approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 149 (1): 04022045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001735).
- Wang, H., Wang, N., Quan, H., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., and Xiang, Y. 2022. Yield and water productivity of crops, vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management* 269: 107645. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107645>.
- Yarami, N., Kamgar-Haghighi, A.A., Sepaskhah, A.R., and Zand-Parsa, S. 2011. Determination of the potential evapotranspiration and crop coefficient for saffron using a water-balance lysimeter. *Archives of Agronomy and Soil Science* 57(7): 727-740. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.485985>.