Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Determining the best volume of potato irrigation water in the tape drip irrigation system using WOFOST model

Hamid Neysi[1], Aslan Egdernezhad[2]*, Saloome Sepehri Sadeghiyan[3]

[1] M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2] Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[3] Assistant professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Determining the appropriate amount of water for potato cultivation has been studied by numerous researchers worldwide, and based on various factors such as irrigation methods, available technology, local climate, and other management practices, different qualifies have been proposed. Based on these studies, the optimal amount of irrigation water for each region should be determined by field experiments, but doing so requires significant time and money. On the other hand, Iran is facing drought conditions in the coming decades, and the need to optimize water consumption in the agricultural sector underscores the optimal amount of irrigation water for potato production. To address this issue and accelerate decision-making, crop simulation models have been developed. The WOFOST model is one such simulation model, introduced by Wageningen University in the Netherlands to simulate the growth and yield of agricultural crops. Although the WOFOST model has been widely used by researchers to simulate crop growth, its application to potatoes has been less common. On the other hand, the optimal amount of potato irrigation water has been suggested by researchers around the world in a wide range, and it is necessary to determine and optimize these amounts in each region. Given this importance, the present study was conducted to determine the optimal thresholds for potato cultivation to achieve maximum yield and high-water productivity. The WOFOST model was employed to simulate various irrigation scenarios.

Materials and Methods

This study was conducted over two cropping seasons on a research farm in Kermanshah City using a completely randomized block design. The evaluated treatments included irrigation water applications of 100% (T1), 75% (T2), and 50% (T3) of the potato plant's water requirement using a T-Tape drip irrigation system. Irrigation treatments were uniform until the 5-leaf stage, after which they were implemented. To measure the irrigation water amount for each treatment, volumetric meters were used. Readily available water and residual soil moisture (W_2) as well as the percentage of usable water depletion (Re) in the root zone, were calculated. The WOFOST model is a comprehensive crop growth simulation model based on the carbon cycle. It simulates growth under three scenarios: no limiting factor, water limitation, and nutrient limitation. The WOFOST model simulates crop development based on eco-physiological processes. Before recalibration and validation, a sensitivity analysis was performed. In this analysis, S_c represents the dimensionless sensitivity coefficient, P_m is the estimated value of the target parameter using adjusted input data, and P_b is the estimated value using the baseline input data. Following the sensitivity analysis, the model was recalibrated using the first-year data and validated using data from the second cropping season.

Results and Discussion

The WOFOST model demonstrated strong agreement between observed and simulated values during calibration. For yield, MBE was -0.5 ton/ha, RMSE 1.6 ton/ha, NRMSE 6%, EF 0.93, and D 0.99. For water productivity, MBE was -0.06 kg/m³, RMSE 0.17 kg/m³, and NRMSE 4%, with EF and D values of 0.96 and 0.99, respectively, confirming the model's high accuracy. According to these results, in the calibration phase, the WOFOST model exhibited a minor underestimation error. According to NRMSE, model accuracy fell within the excellent range. The error rates of the WOFOST model for determining yield and water productivity were 1.6 tons per hectare and 0.17 kg/m³, respectively. Based on the EF and D statistics, model performance for simulating yield was slightly better than for water productivity. During validation, the WOFOST model again showed strong agreement between observed and simulated data. For yield, the model slightly overestimated results (MBE = 0.1 ton/ha) with high accuracy (RMSE = 0.93, NRMSE = 3%) and strong performance (EF = 0.97, D = 0.99). For water productivity, it showed a minor underestimation (MBE = –0.04 kg/m³) with low error (RMSE = 0.14, NRMSE = 3%). Despite

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

the low EF (–0.40) for water productivity, the high D value (0.99) indicated good overall agreement. According to MBE, the model overestimated yield and underestimated water productivity. According to NRMSE, the model's accuracy was excellent for both variables. Similar to calibration, the model's efficiency was slightly higher for yield than for water productivity. To determine the optimal irrigation level, it is important to note that the difference in potato yield between 634 mm and 487 mm irrigation depths was more significant than between other depths, while the difference in water productivity between these two depths was only 5%. Therefore, 634 mm irrigation depth was selected as the optimal irrigation depth. These results are consistent with recommendations by Doorenbos and Kassam (1979) in FAO Publication No. 33.

Conclusion

The results showed that the WOFOST model achieved satisfactory accuracy (NRMSE < 0.1) and efficiency (d > 0.99) in simulating potato yield and water productivity under Kermanshah conditions. Based on these findings, multiple irrigation scenarios were evaluated for their impacts on yield and water productivity. The yield difference between irrigation depths of 634 mm and 487 mm was greater than for other ranges, justifying a focused analysis on this range. Considering all results, 634 mm was identified as the optimal irrigation depth for potato cultivation. At this level, yield reached approximately 25 tons/ha, and water productivity was 2.4 kg/m³. Compared to full irrigation (975 mm), yield decreased by 7.3 tons/ha, but water productivity improved by 0.8 kg/m³.

Keywords: Water productivity, Irrigation scenario, Optimal depth of irrigation, Deficit irrigation.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We are grateful for the cooperation and spiritual support of the Agricultural Engineering Research Institute (AERI) and Islamic Azad University (Ahvaz Branch).

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Hamid Neysi: Conceptualization, Formal analysis and investigation, Writing-original draft preparation; **Aslan Egdernezhad:** Supervision, Resources, Software, Manuscript editing; **Saloome Sepehri Sadeghiyan:** Conceptualization, Manuscript editing, Formal analysis and investigation

*Corresponding Author, E-mail: a_eigder@ymail.com

Citation: Neysi, H., Egdernezhad, A., & Sepehri Sadeghiyan, S. (2025). Determining the best volume of potato irrigation water in the tape drip irrigation system using by WOFOST model. *Water and Soil Management and Modeling, 5*(2), 1-15. doi: 10.22098/mmws.2024.14880.1446

Received: 08 April 2024, received in revised form: 23 May 2024, accepted: 30 May 2024, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No.2, pp. 1-15.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵٤٦

تعیین بهترین مقدار آب آبیاری سیب‌زمینی در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری با استفاده از مدل WOFOST

حمید نیسی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲*]، سالومه سپهری صادقیان[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز ، اهواز، ایران

[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز ، اهواز، ایران

[۳] استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

سیب‌زمینی یکی از گیاهان زراعی راهبردی به شمار می‌رود که نسبت به مقدار آب آبیاری حساسیت زیادی دارد. به همین دلیل تعیین مقدار بهینهٔ آب آبیاری در این گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو، پژوهش حاضر به‌منظور دستیابی به این هدف در شهرستان کرمانشاه و با استفاده از مدل WOFOST انجام شد. تیمارهای مورد استفاده شامل تأمین آب آبیاری در سطوح ۱۰۰ (T1)، ۷۵ (T2) و ۵۰ (T3) درصد نیاز آبی گیاه سیب‌زمینی به‌صورت قطره‌ای تیپ بود. نتایج ارزیابی مدل WOFOST در هر دو مرحلهٔ واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که این مدل دارای دقت (NRMSE<0.1) و کارایی لازم (d>0.99) برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی بود. از این رو، در گام بعد سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری توسط مدل WOFOST شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که تغییرات عملکرد در محدودهٔ تأمین ۶۵ و ۴۵ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی (معادل دو عمق آبیاری ۶۳۴ و ۴۸۷ میلی‌متر به‌ترتیب) تغییرات شدیدتری نسبت به سایر اعماق آبیاری داشتند. به همین دلیل بهره‌وری آب نیز در این محدوده دستخوش تغییرات زیادی شد. با در نظر گرفتن عملکرد قابل قبول و بهره‌وری آب بالا، تأمین ۶۵٪ نیاز آبی (معادل عمق ۶۳۴ میلی‌متر) برای زراعت سیب‌زمینی به‌عنوان مقدار بهینه تعیین شد. عملکرد سیب‌زمینی در این عمق نسبت به عمق ۹۷۵ میلی‌متر (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی) حدود ۷/۳ تن در هکتار کاهش و بهره‌وری آب ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش داشت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، سناریوی آبیاری، عمق بهینه آبیاری، کم‌آبیاری

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a_eigder@ymail.com

استناد: نیسی، حمید، اگدرنژاد، اصلان، و سپهری صادقیان، سالومه (۱۴۰۴). تعیین بهترین مقدار آب آبیاری سیب‌زمینی در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری با استفاده از مدل WOFOST. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۱-۱۵.

doi: 10.22098/mmws.2024.14880.1446

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱ تا ۱۵.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

براساس آمار منتشر شده، تولید جهانی سیب‌زمینی ۳۷۶/۱ میلیون تن در سطحی حدود ۱۷/۷۹ میلیون هکتار برآورد شده است. سهم آسیا در تولید سیب‌زمینی ۱۹۷/۵ میلیون تن (در سطح ۱۰/۳۴ میلیون هکتار) بوده است که نسبت به سایر قاره‌ها قابل توجه است (FAOSTAT, 2023). سیب‌زمینی گیاهی با بهره‌وری آب پایین محسوب می‌شود و بیش‌ترین کالری در واحد آب دریافتی را نسبت به سایر گیاهان زراعی تولید می‌کند (FAO, 2020; CIP, 2013). با این وجود، به‌دلیل سیستم ریشه‌ای کم‌عمق و حساسیت شاخ و برگ آن به کمبود آب، نسبت به تنش آبی ضعیف است (Romero, 2017; Zarzyńska, 2017).

تعیین مقدار آب مناسب برای زراعت سیب‌زمینی توسط محققان مختلفی در سراسر جهان مورد بررسی قرار گرفته است و براساس عوامل مختلفی از جمله روش‌های آبیاری، فناوری در دسترس، اقلیم محلی و سایر عوامل مدیریتی مقادیر مختلفی ارائه شده است. اولین پژوهش در این خصوص به مطالعات Doorenbos and Kassam (1979) برمی‌گردد. این محققان مقادیر بین ۷۰۰–۵۰۰ میلی‌متر را پیشنهاد کردند. Haverkort (1982) مقدار ۴۵۰–۳۸۰ میلی‌متر را برای دستیابی به عملکرد مطلوب توصیه کرد. Hane and Pumphrey (1984) نیاز آبی بهینهٔ سیب‌زمینی را ۶۵۰ میلی‌متر گزارش کردند در حالی که Sood and Singh (2003) مقادیر بین ۶۵۰–۳۵۰ میلی‌متر را پیشنهاد نمودند. تحت شرایط آب و هوایی ترکیه، Onder et al. (2005) چهار رژیم آبیاری صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ درصد آبیاری کامل را اعمال کرده و دریافتند که مقادیر آبیاری فصلی سیب‌زمینی از ۱۰۲ تا ۳۰۲ میلی‌متر متغیر است. Karam et al. (2014) میزان آبیاری فصلی سیب‌زمینی را بین ۵۰۰ تا ۵۶۰ میلی‌متر برای رسیدن به عملکرد مطلوب تحت کم‌آبی گزارش کردند. در حالی که مصرف آب سیب‌زمینی در عربستان سعودی ۱۵۰۵ میلی‌متر محاسبه شد (El-Abedin et al., 2017). Paredes et al. (2018) میزان آبیاری فصلی سیب‌زمینی در شرایط مدیترآن‌های در جنوب ایتالیا با بارش فصلی بین ۲۷۸–۱۸۱ میلی‌متر را بین ۳۳۰–۲۳۷ میلی‌متر تحت تیمار آبیاری کامل گزارش کردند در حالی که برای تیمار ۵۰ درصد تنش آبی این مقادیر بین ۱۶۵–۱۱۸ میلی‌متر بود.

براساس این مطالعات، برای هر منطقه باید مقدار مطلوب آب آبیاری توسط آزمایش‌های مزرعه‌ای تعیین شود. لیکن انجام آن مستلزم صرف وقت و هزینهٔ بسیار است (Ahmadee et al., 2021). از طرف دیگر، مواجه شدن کشور ایران با شرایط خشکسالی در دهه‌های آینده و نیاز به بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی (Ebrahimipak et al., 2019)، اهمیت تعیین مقدار بهینهٔ آب آبیاری برای تولید سیب‌زمینی را افزایش می‌دهد. برای رفع این معضل و افزایش سرعت در تصمیم‌گیری، مدل‌های گیاهی بسط داده شده‌اند (Eigdernezad et al., 2019). مدل WOFOST یکی از مدل‌های گیاهی است که توسط دانشگاه واخنینگن هلند برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی معرفی شده است (Boogaard et al., 1998). مدل WOFOST یکی از اجزای کلیدی برای نظارت بر محصول و پیش‌بینی عملکرد در اروپا به شمار می‌رود. در اصل WOFOST برای تخمین پتانسیل تولید و تأثیر شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی بر محصولات سالانه در مناطق استوایی توسعه داده شد (Van Diepen et al., 1989). با این وجود، هسته بیوفیزیکی مدل به طور کلی قابل اجرا است و بنابراین این مدل می‌تواند به راحتی برای محصولات یکساله در سایر کشورها نیز مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به قابلیت‌های مدل WOFOST، از آن برای شبیه‌سازی رشد گیاهان متنوعی در شرایط مختلف استفاده شده است. Kulig et al. (2020) با استفاده از این مدل گیاهی به شبیه‌سازی عملکرد دو رقم سیب‌زمینی (لورد و دنار) تحت شرایط مختلف تأمین آب آبیاری پرداختند. مشاهدات این محققان نشان داد که گرچه عملکرد شبیه‌سازی شده نزدیک به عملکرد واقعی بود ولی مدل WOFOST نسبت به شرایط تنش آبی حساسیت نشان داد. ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دآن‌های تحت مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن نشان داد که دقت مدل نسبت به تغییرات آب آبیاری از حساسیت کمی برخوردار بود ولی افزایش تنش کودی سبب کاهش دقت این مدل شد. تقسیط کود نیتروژن به افزایش دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد کمک کرد (Neysi et al., 2024).

Ten Den et al. (2022) با ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی در کشور هلند گزارش کردند که این مدل در سال اول دچار خطای کم برآوردی (۵/۴ درصد) و در سال دوم دچار خطای بیش‌برآوردی (۴/۴ درصد) شد. در واقع خطای عملکرد در سال نخست بین ۱۸/۵–۱۶/۴ تن در هکتار و در سال دوم بین ۱۷/۵–۱۵/۵ تن در هکتار به‌دست آمد. Torkaman et al. (2023) به بررسی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی پرداختند. این محققان از داده‌های برداشت شده از شهرهای اردبیل، اصفهان، شیراز، جیرفت، گرگان، شاهرود و دزفول استفاده کردند. این محققان گزارش کردند که مدل WOFOST نتایج نزدیک به شرایط مزرعه‌ای را شبیه‌سازی کرد به طوری که خطای شبیه‌سازی عملکرد کم‌تر از سه تن در

هکتار برآورد شد. دقت شبیه‌سازی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد نیز ۵/۸ درصد بود که مقدار مطلوب است. با این وجود، این محققان پیشنهاد کردند این مدل گیاهی برای ارقام مختلف تحت شرایط زراعی متفاوت نیز ارزیابی شود.

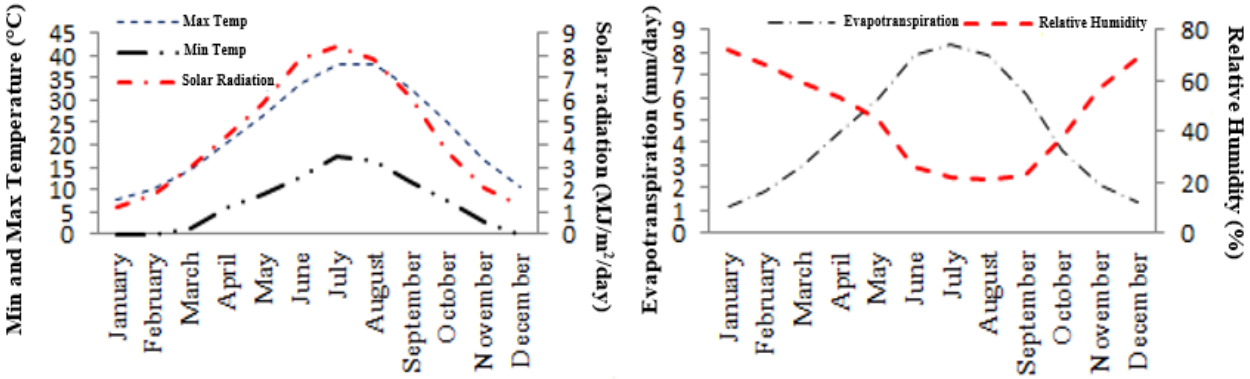
گرچه کاربرد مدل WOFOST برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌صورت گسترده توسط محققان انجام شده است؛ لیکن استفاده از آن برای سیب‌زمینی کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. از طرف دیگر، مقدار بهینهٔ آب آبیاری سیب‌زمینی در بازهٔ گسترده‌ای توسط محققان در سراسر جهان پیشنهاد شده است که لازم است در هر منطقه این مقادیر تعیین و بهینه شوند. بر اساس این مهم، پژوهش حاضر برای تعیین حدود بهینهٔ آب آبیاری سیب‌زمینی با هدف دستیابی به عملکرد مطلوب و بهره‌وری آب بالا انجام شد. برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری از مدل WOFOST استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش برگرفته از کشت گیاه سیب‌زمینی در دو سال زراعی در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان کرمانشاه به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی است. اطلاعات هواشناسی این منطقه در شکل (۱) نشان داده شده است. تیمارهای مورد بررسی شامل تأمین آب آبیاری در سطوح ۱۰۰ (T1)، ۷۵ (T2) و ۵۰ (T3) درصد نیاز آبی گیاه سیب‌زمینی به‌صورت قطره‌ای تیپ بود. رقم سیب‌زمینی مورد مطالعه آگریا بود که به مقدار ۴ تن در هکتار به‌صورت ردیفی، با فواصل ۷۵×۳۰ سانتی‌متر به‌صورت دستی در تاریخ‌های ۱۵ و ۲۱ اردیبهشت ماه به‌ترتیب در سال‌های اول و دوم مورد مطالعه کاشته شد. پیش از کاشت با نمونه‌گیری‌های خاک منطقهٔ مورد مطالعه، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). هم‌چنین خصوصیات آب آبیاری نیز در جدول (۲) ارایه شده است. شخم زمین در پاییز انجام شد ولی کاشت بذرها در نیمه اردیبهشت انجام شد. کودهای سوپرفسفات تریپل و اسید بوریک هر کدام به مقدار ۱۰۰ و ۴۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت به زمین اضافه شدند. کود اوره در طول دوره رشد و به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به زمین داده شد. مقادیر کودی بر اساس توصیهٔ آزمایش خاک انجام شد. در پایان فصل زراعی، برداشت محصول به‌صورت دستی انجام شده و به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای برداشت از ۶ متر وسط دو خط کاشت میانی هر کرت انجام گرفت.

تیمارهای آبیاری پس از مرحلهٔ ۵ برگی شدن سیب‌زمینی، اعمال شدند. با احتساب مساحت تحت کشت، حجم آب مورد نیاز برای تیمارهای T1، T2 و T3، نیاز آبی برحسب میلی‌متر و راندمان کاربرد آب آبیاری ۹۰ درصد محاسبه شد. به‌منظور تعیین میزان آب آبیاری در هر تیمار، از کنتورهای حجمی استفاده شد. به‌منظور تعیین مقدار آب آبیاری در هر تیمار، مقادیر آب آبیاری هر کرت محاسبه شده و آب آبیاری تا ابتدای کرت توسط لوله منتقل می‌شد. سپس با استفاده از کنتور آب با دقت بالا به روش حجمی اندازه‌گیری شده و در اختیار هر کرت قرار داده می‌شد. برداشت محصول به‌صورت دستی انجام شد. به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای برداشت از ۶ متر وسط دوخط کاشت میانی هر کرت انجام گرفت. در محصول برداشتی، غده‌ها بر اساس اندازه در گروه‌هایی با اندازه کوچکتر از ۳۵، ۳۵– ۵۵ و بزرگتر از ۵۵ میلی‌متر تقسیم‌بندی شدند. سایر اندازه‌گیری‌هایی که صورت گرفت عبارت بودند از: تعداد ساقه اصلی و تعداد غده در بوته، وزن مخصوص غده، مادهٔ خشک تولیدی و میزان کلروفیل برگ.



شکل ۱- مشخصات هواشناسی منطقهٔ مورد مطالعه

Figure 1- Meteorological characteristics of the studied area

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and Chemical Properties of Soil

Soil Texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Organic Matter (%)	FC (%V)	PWP (%V)	Bulk density (g/cm³)	EC (µmho/cm)
Silty Clay	45	42.3	3.7	1.38	42.5	25.9	1.29	1.2

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

Table 2- Chemical properties of water

SAR (%)	Total Cations	Na^+	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	Total Anions	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	TDS (mg/L)	EC (µmho/cm)
	meq/L									
9.23	1.08	8.15	9.23	1.18	1.9	6.15	0	7.1	640	1000

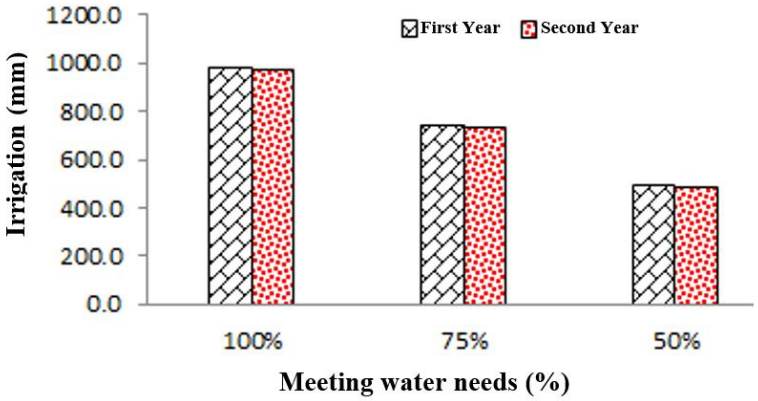
مقدار رطوبت قابل استفاده (A_w) در لایهٔ خاک (D) در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه از رابطه (۱) به‌دست آمد.

$$Aw = (D \times (Fc - PWP) \times \rho_b) / 100 \qquad (۱)$$

جرم مخصوص ظاهری خاک (ρ_b, gr/cm^3) به روش استوآن‌های و رطوبت ظرفیت زراعی مزرعه (FC) و رطوبت در حد نقطهٔ پژمردگی دائم (PWP) به وسیلهٔ صفحات فشاری در اعماق مختلف اندازه‌گیری شدند. مقدار آب قابل استفاده و باقیماندهٔ خاک (W_2) و درصد تخلیهٔ آب قابل استفاده یا Re در ناحیهٔ ریشهٔ گیاه با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) محاسبه شد. مقدار آب آبیاری برای تیمارهای مورد مطالعه در دو سال زراعی در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$W_2 = (D \times (w - PWP) \times \rho_b) / 100 \qquad (۲)$$

$$\mathrm{Re} = ((w_2 - w_1) / Aw) \times 100 \qquad (۳)$$



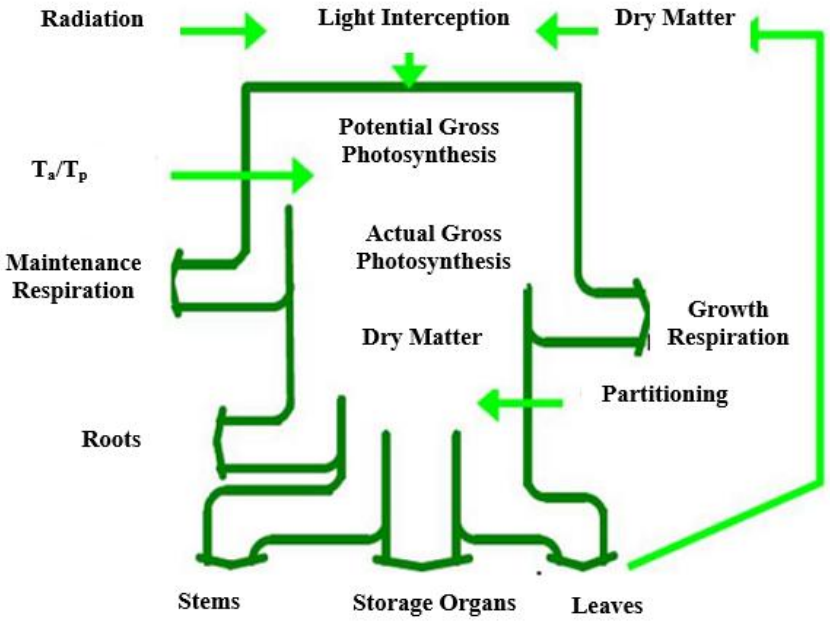
شکل ۲- مقدار آب آبیاری برای تیمارهای مختلف در دو سال زراعی

Figure 2- Amount of irrigation water for different treatments in two crop years

۲-۲- مدل WOFOST

مدل WOFOST یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه بر مبنای چرخهٔ کربن و دارای ساختار پیچیده است. این مدل رشد گیاه را در سه وضعیت عدم وجود عامل محدودکننده، محدودیت آب و محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی می‌کند. در واقع، در مدل WOFOST رشد محصولات براساس فرآیندهای اکوفیزیولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود. فرآیندهای اصلی شامل توسعه فنولوژیکی، جذب دی‌اکسید کربن، تعرق، تنفس، تجزیه و توزیع میزان مادهٔ خشک بین اندام‌های مختلف براساس مرحلهٔ نمو صورت می‌گیرد. رشد در حالت پتانسیل و محدودیت آبی به‌صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود (Boogaard et al., 1998). مدل WOFOST توسعهٔ فنولوژیکی، شکل‌گیری و رشد گیاه را از آغاز جوانه‌زنی تا زمان رسیدن براساس خواص ژنتیکی محصول و شرایط محیطی شرح می‌دهد. این برنامه مادهٔ خشک گیاه را به‌عنوان تابعی از تشعشع، دما و خصوصیت‌های گیاه در مراحل زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌کند. اصول محاسبه تولید مادهٔ خشک، میزان سرعت ناخالص جذب دی‌اکسید کربن توسط پوشش گیاهی است، که به انرژی تابشی جذب شده بستگی دارد که تابعی از تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب خاموشی نور در پوشش گیاهی است. این مدل، میزان جذب دی‌اکسید کربن ناخالص از یک گیاه را بر پایه‌ی

تشعشع فعال فتوسنتزی (۵۰ درصد از کل تشعشع خورشیدی با طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) جذب شده توسط گیاه شبیه‌سازی می‌کند. دی‌اکسید کربن با استفاده از انرژی تأمین شده به‌وسیله نور به کربوهیدرات (CH_2O) تبدیل می‌شود (Todorovic et al., 2009). قسمتی از کربوهیدارت تولید شده در تنفس نگهداری مصرف شده و کربوهیدارت‌های باقی‌مانده در مسیر تنفس رشد به مادهٔ خشک تبدیل می‌شوند. فرآیندهای ذکر شده ساختار مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. در WOFOST، محدودهٔ رطوبت خاک برای رشد گیاهان مشخص شده‌است. در این محدوده گیاه دچار کمبود آبی نمی‌شود و نیاز آبی گیاه تأمین می‌شود. خارج از این محدوده، خاک خیلی خشک یا خیلی مرطوب است. در هر دو شرایط، میزان جذب آب کاهش می‌یابد.



شکل ۳- ساختار مدل WOFOST

Figure 3- The WOFOST model structure

تنش آبی با بستن روزنه‌ها، منجر به کاهش جذب دی‌اکسید کربن و مبادله دی‌اکسید کربن و اکسیژن میان گیاه اتمسفر می‌شود. در این مدل برای مشخص کردن این تأثیر از رابطه زیر استفاده می‌شود (Todorovic et al., 2009):

$$A = \frac{Ta}{Tp} Ap \qquad (۴)$$

در این معادله A میزان جذب واقعی، A_p میزان جذب پتانسیل، T_a میزان تعرق واقعی و T_p میزان تعرق پتانسیل است. در محدودهٔ رطوبت بحرانی (θ_{cr}) و ظرفیت زراعی (θ_{fr})، نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل ($\frac{Ta}{Tp}$) یک است. خارج از این محدوده کوچکتر از یک می‌شود، در نتیجه منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود. البته رطوبت بحرانی (θ_{cr}) به نوع گیاه و آب و هوا بستگی دارد. براساس این شرایط، میزان رشد گیاهان در این مدل از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود (Todorovic et al., 2009):

$$\Delta W = Ce \times (A - Rm) \qquad (۵)$$

در این رابطه Δw نرخ رشد، C_e بازده تبدیل مواد فتوسنتزی، R_m شدت تنفس و A نرخ جذب ناخالص هستند.

۲-۳- ارزیابی مدل

پیش از واسنجی و صحت‌سنجی مدل WOFOST، تحلیل حساسیت براساس رابطه (۶) انجام شد (Geerts and Raes, 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \qquad (۶)$$

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه است. برای تحلیل حساسیت این مدل گیاهی، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده شد و بقیه عوامل ثابت نگه داشته شدند. در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، Sc>۱۵ حساسیت بالا، ۱۵>Sc>۲ حساسیت متوسط و Sc<۲ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts and Raes,

2009). پس از تحلیل حساسیت، با استفاده از داده‌های سال اول، مدل WOFOST واسنجی شد و با استفاده از داده‌های سال دوم کشت تحت صحت‌سنجی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی دقت مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌های به‌ترتیب در رابطه‌های (۷) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۷)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O_i}} \quad (۸)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۹)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۱۱)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۲)$$

در رابطه‌های فوق P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر برآورد شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است. مقدار RMSE و NRMSE به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ این است که خطا و دقت مدل WOFOST چقدر است. هر چه آمارهٔ RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل WOFOST کم‌تر است. مقادیر آمارهٔ NRMSE اگر کم‌تر از ۰/۱ باشد نشان دهنده دقت عالی مدل WOFOST است. مقادیر بین ۰/۲-۰/۱ و ۰/۳-۰/۲ به‌ترتیب نشان دهندهٔ دقت خوب و متوسط این مدل است. مقادیر بزرگتر از ۰/۳ نشان دهندهٔ دقت کم این مدل است.

مقدار مثبت آمارهٔ MBE نشان‌دهندهٔ این است که مدل WOFOST مقدار پارامتر مورد نظر را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل در برآورد پارامتر مورد نظر عدد کوچکتری به‌دست داده است. آمارهٔ EF، مقادیر برآورد شده را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند و مقدار آن از ۱ تا مقادیر منفی متغیر است. مقدار این آماره اگر بیش‌تر از صفر باشد نشان دهندهٔ کارایی مطلوب مدل WOFOST است. آمارهٔ d نیز کارایی مدل WOFOST را نشان می‌دهد و مقدار آن از صفر تا ۱ متغیر است. مقدار این آماره هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی مدل WOFOST بهتر است. مقدار R^2 از صفر تا یک متغیر بوده و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهندهٔ برازش بهتر داده‌ها در مدل WOFOST است.

۳- نتایج و بحث

تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای مختلف بر خروجی مدل WOFOST پیش از واسنجی انجام شد و نتایج آن نشان داد که تغییرات اکثر پارامترها بر شبیه‌سازی این مدل حساسیت متوسط داشت. نتایج این مرحله در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه هیچ‌کدام از پارامترهای ورودی این مدل حساسیت کم‌تر از دو نداشتند؛ کلیه پارامترهای ورودی این مدل مورد واسنجی قرار گرفتند. نتایج واسنجی نیز در جدول ۴ نشان داده شده است. البته برخی پارامترهای ورودی این مدل که به نوع گیاه وابسته بود به‌صورت پیش‌فرض در نظر گرفته شد و مورد واسنجی قرار نگرفتند.

نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، در مرحله واسنجی، مدل WOFOST دچار خطای کم‌برآوردی شد. دقت این مدل براساس آمارهٔ NRMSE در دستهٔ عالی قرار داشت. میزان خطای مدل WOFOST برای تعیین عملکرد و بهره‌وری آب به‌ترتیب برابر با ۱/۶ تن در هکتار و ۰/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود. براساس دو آمارهٔ EF و d، کارایی این مدل برای تعیین عملکرد بهتر از بهره‌وری آب بود.

نتایج عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، عملکرد شبیه‌سازی شده در تیمار T1 کم‌تر از عملکرد مشاهداتی و در سایر تیمارها بیش‌تر از عملکرد مشاهداتی بود. متوسط اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برابر با ۰/۸ درصد بود. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط WOFOST به‌ترتیب برابر با ۷/۸ (T1) و ۲/۳ (T2) درصد بود. نتایج بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST در شکل ۵ نشان داده شده است. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب برابر با ۲ درصد بود. میزان همبستگی بین عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در شکل ۶ نشان داده شده است. ضریب تبیین به‌دست آمده برای هر دو پارامتر مقادیر بالایی داشت. به همین دلیل مدل WOFOST توانایی مطلوبی در تعیین تغییرات پارامترهای مورد بررسی داشت.

جدول ۳- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی

Table 3- Sensitivity coefficient of some input factors of WOFOST plant growth model for simulating potato yield

Parameter	Sc = -٪25	Sc = +٪25	Sensitivity coefficient
Temperature from Tuber Initiation to Maturity	2.3	3.5	Average
Leaf Area Index (LAI) at Early Germination	0.4	0.9	Average
Light Use Efficiency (LUE) of a Single Leaf	3.1	6.4	Average
Maximum Carbon Dioxide Assimilation Rate	4.5	8.2	Average
Assimilate Partitioning Efficiency to Leaves	3.1	3.9	Average
Assimilate Partitioning Efficiency to Storage Organs	5.5	2.7	Average
Assimilate Partitioning Efficiency to Stems	1.1	0.7	Average
Maximum Rooting Depth	3.4	9.5	Average

جدول ٤- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل WOFOST

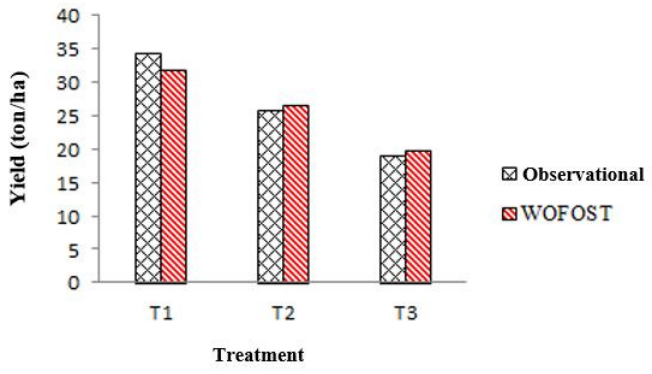
Table 4- Values of plant factors used in the WOFOST model

Factor explanation	Value	Unit	Explanation
Minimum temperature threshold for germination	3	°C	Default
Maximum temperature threshold for germination	18	°C	Default
Growing degree days (GDD) from planting to emergence	170	°C/day	Default
GDD from emergence to tuber initiation	150	°C/day	Default
GDD from tuber initiation to maturity	1700	°C/day	Calibration
Growth Parameters			
Leaf area index (LAI) at emergence	0.065	ha/ha	Calibration
Single-leaf light use efficiency	0-0,0-48	ka/ha.h.day	Calibration
Maximum leaf area expansion rate	0.0150	ha/ha.day	Calibration
	0,30		Calibration
Leaf CO_2 assimilation rate	1.57,32 2/0,0	kg/ha.h	Calibration
			Calibration
Assimilate partitioning coefficient to leaves	0.70	kg/kg	Calibration
Assimilate partitioning coefficient to storage organs	0.88	kg/kg	Calibration
Assimilate partitioning coefficient to roots	0.72	kg/kg	Default
Assimilate partitioning coefficient to stems	0.70	kg/kg	Calibration
Transpiration correction factor	1.0	-	Default
Root biomass at early growth stage	10	cm	Default
Primary root system	10	cm	Default
Maximum root depth	150	cm	Calibration

جدول ٥- نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ واسنجی

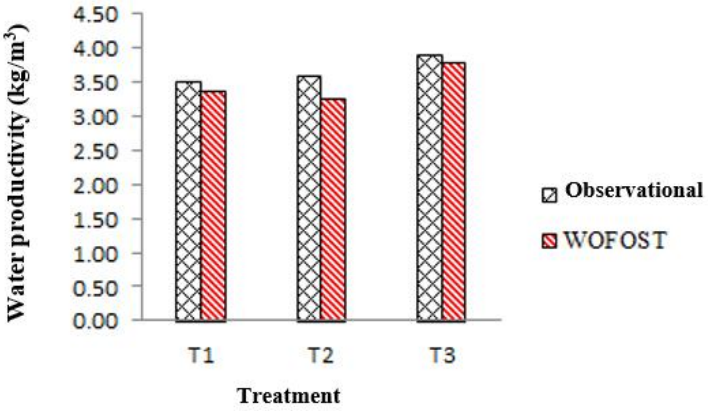
Table 5- Statistical results of observed and simulated yield and water productivity by the WOFOST model in the calibration stage

Parameter	Unit	d	EF	NRMSE	RMSE	MBE
Yield	ton/ha	0.99	0.93	0.06	1.6	−0.5
Water productivity	kg/m^3	0.99	−0.04	0.04	0.17	−0.06



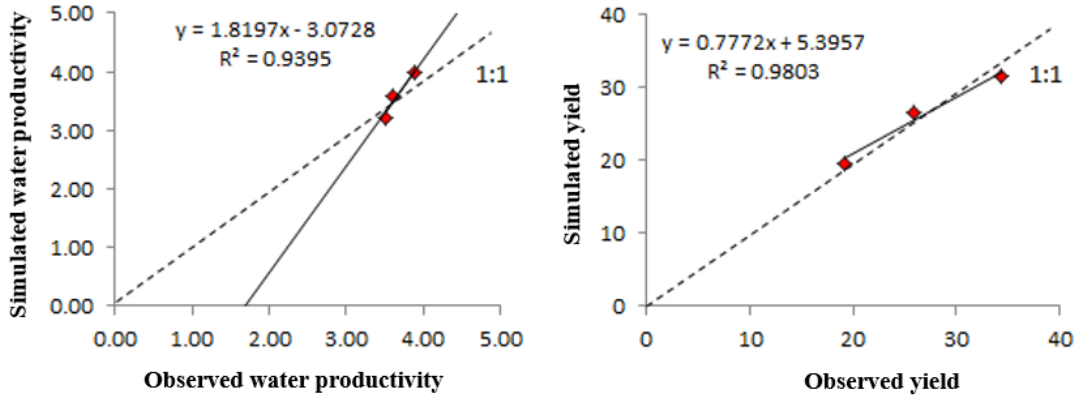
شکل ٤-نتایج عملکرد مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ واسنجی

Figure 4- The results of the observed yield of potatoes compared to the simulated values by the WOFOST model in the calibration phase



شکل ۵- نتایج کارایی مصرف آب مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ واسنجی

Figure 5- The results of observed potato water productivity compared to the simulated values by the WOFOST model in the calibration stage



شکل ٦- همبستگی عملکرد و کارایی مصرف آب مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ واسنجی

Figure 6- Correlation of yield and water productivity of potato observations compared to the values simulated by the WOFOST model in the calibration stage

براساس این آماره و نتایج به‌دست آمده در جدول ۵، مدل WOFOST در مرحلهٔ واسنجی نتایج قابل قبولی ارائه داد. به همین دلیل با استفاده از مقادیر جدول ۴ برای پارامترهای ورودی، مرحلهٔ صحت‌سنجی انجام شد.

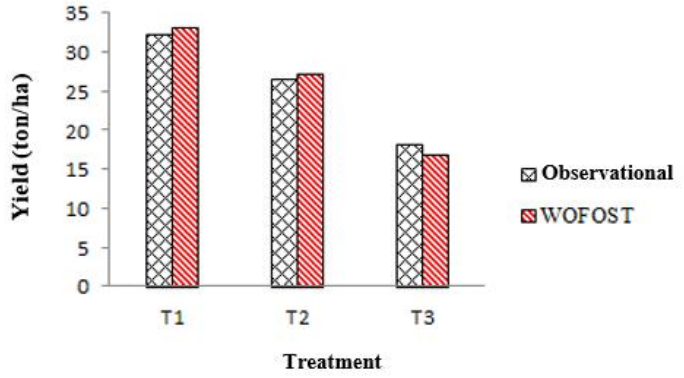
نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب در مرحلهٔ صحت‌سنجی در جدول ۶ نشان داده شده است. براساس آمارهٔ MBE، مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دچار خطای بیش‌برآوردی و در شبیه‌سازی بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج در شکل‌های ۷ و ۸ نیز قابل مشاهده است. خطای مدل WOFOST در تعیین عملکرد برابر با ۰/۹۳ تن در هکتار و در تعیین بهره‌وری آب برابر با ۰/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بر اساس جدول ۶، مشاهده می‌شود که مقدار آمارهٔ NRMSE در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب حدود ۰/۰۳ بدست آمد. همچنین مقدار آمارهٔ RMSE نیز در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۱۴ بدست آمد که بر این اساس این مدل برای تعیین هر دو پارامتر دارای دقت بالایی بود. همانند مرحلهٔ واسنجی، کارایی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد بهتر از بهره‌وری آب بود.

اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در تیمارهای T1، T2 و T3 به‌ترتیب برابر با ۲/۸، ۲/۳ و ۶/۶ درصد (شکل ۷) و اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در تیمارهای اشاره شده به‌ترتیب برابر با ۰/۲، ۲/۹ و ۶/۳ درصد بود (شکل ۸). همبستگی بین عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی در شکل ۹ نشان داده شده است. ضریب تبیین عملکرد بیش‌تر از بهره‌وری آب بود. به همین دلیل مدل WOFOST توانایی بالاتری در شبیه‌سازی عملکرد داشت.

جدول ٦- نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ صحت‌سنجی

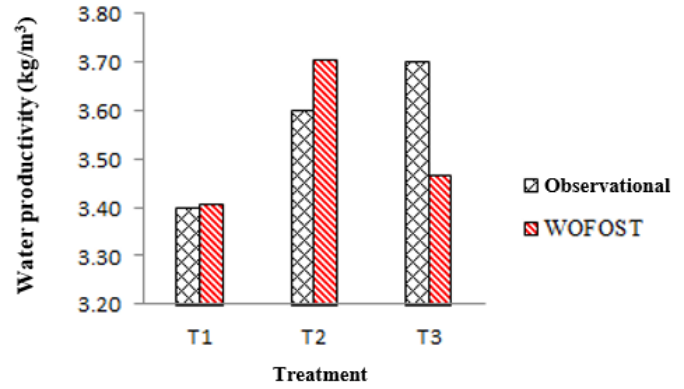
Table 6- Statistical results of observed and simulated yield and water productivity by the WOFOST model in the validation stage

Parameter	Unit	d	EF	NRMSE	RMSE	MBE
Yield	ton/ha	0.99	0.97	0.03	0.93	0.1
Water productivity	kg/m^3	0.99	−0.40	0.03	0.14	−0.04



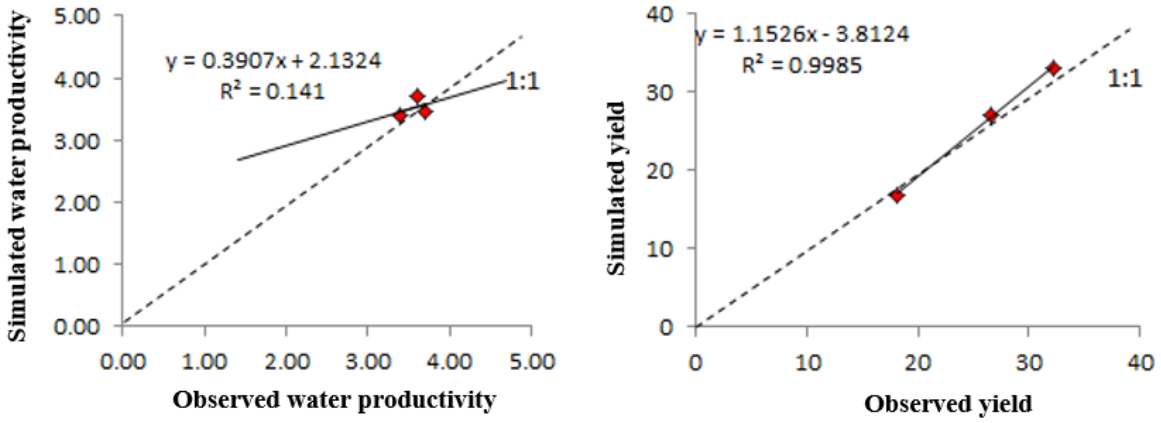
شکل ۷- نتایج عملکرد مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ صحت‌سنجی

Figure 7- The results of observed yields of potatoes compared to the simulated values by the WOFOST model in the validation stage



شکل ۸- نتایج کارایی مصرف آب مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ صحت‌سنجی

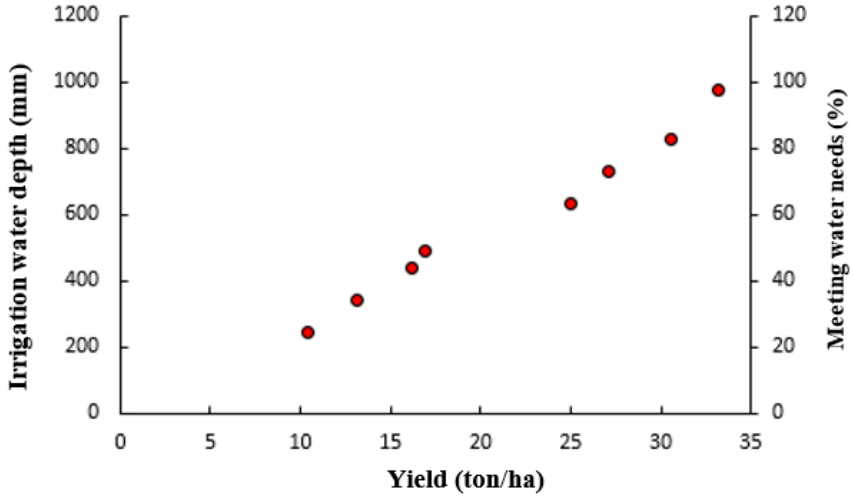
Figure 8- The results of observed water productivity of potatoes compared to the simulated values by the WOFOST model in the validation stage



شکل ۹- همبستگی عملکرد و کارایی مصرف آب مشاهداتی سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST در مرحلهٔ صحت‌سنجی

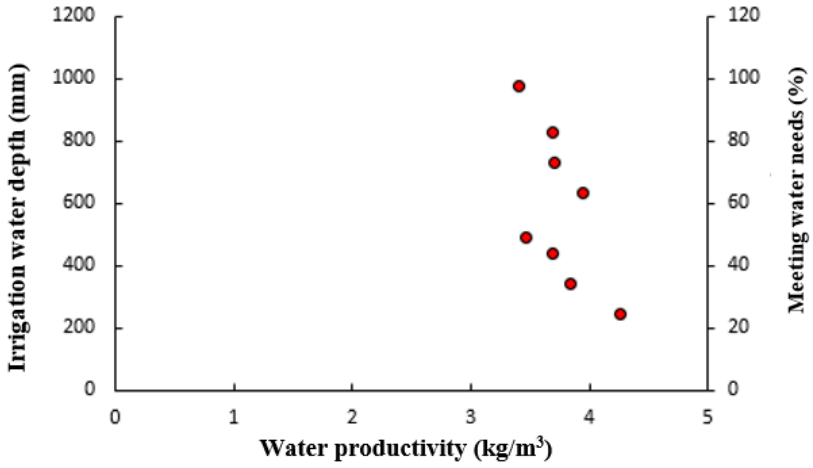
Figure 9- Correlation of observed yield and water productivity of potatoes compared to the simulated values by the WOFOST model in the validation stage

مقایسهٔ این نتایج با جدول ۶ نشان داد که کارایی پایین مدل WOFOST در شبیه‌سازی بهره‌وری آب به‌دلیل عدم توانایی این مدل در پیروی از تغییرات بهره‌وری آب بوده است. لیکن براساس کلیهٔ نتایج می‌توان به دقت و کارایی این مدل برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر اعتماد کرد. این نتایج توسط سایر محققان از جمله Ten Den et al. (2022) ، Torkaman et al. (2023) ، Ravensbergen et al. (2024) و Kulig et al. (2020) نیز گزارش شده است. با استفاده از مدل ارزیابی شدهٔ WOFOST، عملکرد سیب‌زمینی برای عمق‌ها و درصدهای مختلف تأمین آب آبیاری شبیه‌سازی شد (شکل ۱۰). مقدار آب آبیاری برای تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی نزدیک به ۹۷۵ میلی‌متر بود که این مقادیر بین مقادیر گزارش شده توسط El-Abedin et al. (2017) در عربستان و Paredes et al. (2018) در ایتالیا است. در واقع، بالا بودن تبخیر–تعرق در عربستان و کمبود بارش در این کشور نسبت به ایتالیا، سبب اختلاف حدود ۱۲۰۰ میلی‌متری در مقدار آب آبیاری این گیاه شد. همچنین، اقلیم کرمانشاه بین دو اقلیم عربستان و ایتالیا، از نظر بارش و تبخیر–تعرق (شکل ۱)، است و به همین دلیل مقادیر آب آبیاری نیز بین آن‌ها قرار گرفت. با توجه به این نتایج، کاهش مشهود عملکرد سیب‌زمینی با اعمال ۶۵ درصد آب آبیاری شروع شد. عملکرد سیب‌زمینی در ۴۵ درصد تأمین آب آبیاری به حدود پنجاه درصد عملکرد در شرایط تأمین کامل آب آبیاری رسید. با افزایش تنش آبی به ۲۵ درصد، عملکرد به‌صورت متوسط ۷۰ درصد کاهش یافت. با در نظر گرفتن عمق آبیاری، با کاهش عمق آب آبیاری از ۶۳۴ میلی‌متر، مقدار عملکرد سیب‌زمینی کاهش شدیدی پیدا کرد. این مقدار آب آبیاری متناظر با اعمال ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه در این مزرعه بود. این نتایج مشابه مطالعات Onder et al. (2005) در کشور ترکیه بود. تعیین سناریوی بهینهٔ آبیاری، براساس بهره‌وری آب باید تعیین شود (شکل ۱۱). زیرا علاوه بر عملکرد قابل قبول، کاهش مصرف آب نیز مهم است. چون بهره‌وری آب براساس نسبت عملکرد به آب آبیاری به‌دست می‌آید، هرچه آب آبیاری کم‌تری مصرف شود بهره‌وری بالاتری به‌دست خواهد آمد. لیکن مقدار عملکرد در مزرعه نیز در تولید محصول مهم است. به همین دلیل لازم است سناریویی به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شود که عملکرد قابل قبولی نیز داشته باشد. اختلاف بین عملکرد سیب‌زمینی در دو عمق آبیاری ۶۳۴ و ۴۸۷ میلی‌متر از سایر اعماق بیش‌تر بود در حالی که اختلاف بین بهره‌وری آب بین این دو عمق تنها ۵ درصد بود. بنابراین عمق آب آبیاری ۶۳۴ میلی‌متر به‌عنوان عمق بهینه برای آبیاری انتخاب می‌شود. این نتایج نزدیک به مقادیر پیشنهادی توسط Doorenbos and Kassam (1979) در نشریهٔ فائو ۳۳ است. براساس نتایج به‌دست آمده، به‌صورت متوسط، اگر عمق ۶۳۴ میلی‌متر برای زراعت سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گیرد، عملکرد ۲۵ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۴/۲ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست می‌آید. مقایسهٔ این نتایج با شرایطی که ۱۰۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی تأمین شود (اعمال ۹۷۵ میلی‌متر آب آبیاری)، عملکرد به میزان ۷/۳ تن در هکتار کاهش و بهره‌وری آب به میزان ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش خواهد داشت. در صورت عدم محدودیت زمین زراعی، با اعمال ما به تفاوت آب آبیاری (۳۴۱ میلی‌متر) در زمین جدید، می‌توان عملکرد ۱۴/۵ تن در هکتار به‌دست آورد که مقدار بسیار بیش‌تری از کاهش عملکرد در کم‌آبیاری اعمال شده است.



شکل ۱۰- مقایسهٔ عملکرد سیب‌زمینی برای عمق و درصدهای مختلف آب آبیاری

Figure 10- Comparison of potato yield for different depths and percentages of irrigation water



شکل ۱۱- مقایسهٔ بهره‌وری سیب‌زمینی برای عمق و درصدهای مختلف آب آبیاری

Figure 11- Comparison of potato water productivity for different depths and percentages of irrigation water

٤- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که مدل WOFOST دقت (NRMSE<0.1) و کارایی لازم (d>0.99) برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در منطقهٔ کرمانشاه را داشت. بر این اساس، اثرات سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب این گیاه زراعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش تأمین نیاز آبی سیب‌زمینی در سطح ۶۵ درصد، کاهش عملکرد مشاهده شد. اختلاف بین عملکرد سیب‌زمینی در دو سطح تأمین نیاز آبی این گیاه برابر با ۶۵ و ۴۵ درصد که معادل دو عمق آبیاری ۶۳۴ و ۴۸۷ میلی‌متر بودند، از سایر بازه‌های آبیاری بیش‌تر بود. در حالی که اختلاف بین بهره‌وری آب بین این دو عمق تنها ۵ درصد بود. کاهش بیش‌تر تأمین نیاز آبی سیب‌زمینی، منجر به افزایش بهره‌وری آب خواهد شد، لیکن این موضوع کاهش شدید عملکرد را نیز به دنبال خواهد داشت. با توجه به اینکه انتخاب سناریوی بهینهٔ مدیریت آبیاری محصولات با هدف ارتقای بهره‌وری آب بایستی با در نظر گرفتن تأمین شرایط مطلوب امنیت غذایی باشد، در مجموع عمق ۶۳۴ میلی‌متر برای زراعت سیب‌زمینی به‌عنوان مقدار بهینه تعیین شد. عملکرد سیب‌زمینی در این عمق حدود ۲۵ تن در هکتار و بهره‌وری آب حدود ۴/۲ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست می‌آید. این مقادیر ۷/۳ تن در هکتار و ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۹۷۵ میلی‌متر آب آبیاری) به‌ترتیب کاهش و افزایش داشتند.

سپاسگزاری

از همکاری و حمایت معنوی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

حمید نیسی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله

اصلان اگدرنژاد: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

سالومه سپهری صادقیان: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

منابع

ابراهیمی‌پاک، نیاز علی، 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)، ۷۱۵-۷۲۶.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4

احمدی، محسن، قنبرپوری، مرادعلی، اگدرنژاد، اصلان (۱۴۰۰). مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۸(۱)، ۱۵-۳۰.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0

اگدرنژاد، اصلان، ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، تافته، آرش، و احمدی، محسن (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. *مدیریت آب در کشاورزی*. ۵(۲)، ۵۳-۶۴.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.1397.5.2.7.2

ترکمان، مجتبی، نصیری محلاتی، مهدی، کوچکی، علیرضا. (۱۴۰۱). واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای پیش‌بینی

فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) در ایران. *بوم‌شناسی کشاورزی*. ۱۴ (۴): ۶۰۱-۶۱۵.
https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.47502

نیسی، کریم، اگدرنژاد، اصلان، عباسی، فریبرز. (۱۴۰۳). ارزیابی مدل WOFOSTبرای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دآن‌های تحت مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن. *مهندسی آبیاری و آب ایران*. ۱۴ (۵۵): ۷۶-۵۷.
https://doi.org/10.22125/IWE.2023.396538.1718

References

Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M.A, & Eigdernezad, A. (2021). Applied irrigation water of wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. *Journal of Water Management in Agriculture,* 8(1), 15-30. https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0 [In Persian]

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.

CIP. Agricultural Research for Development: Potato Facts and Figures. 2013. Available online: http://cipotato.org/potato/facts (accessed on 22 December 2020).

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and drainage paper,* 33, 257.

Ebrahimipak, N., Eigdernezad, A., Tafteh, A. & Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to simulate rapeseed yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage.*13(3),715-726. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4 [In Persian]

Eigdernezad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Canola irrigation scheduling using AquaCrop model in Qazvin plain. *Journal of Water Management in Agriculture,*5(2),53-64. https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.1397.5.2.7.2 [In Persian]

El-Abedin, T. K. Z., Mattar, M. A., Alazba, A. A., & Al-Ghobari, H. M. (2017). Comparative effects of two water-saving irrigation techniques on soil water status, yield, and water use efficiency in potato. *Scientia Horticultural,* 225, 525-532. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.044

FAO. (2020). Water Resources; Hidden Treasure: International Year of the Potato. 2008. *Available online Accessed December,* 22.

FAOSTAT. 2023. Available online: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC

Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management,* 96(9), 1275-1284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009

Hane, D. C., & Pumphrey, F. V. (1984). Yield-evapotranspiration relationships and seasonal crop coefficients for frequently irrigated potatoes. *American Potato Journal,* 61, 661-668. https://doi.org/10.1007/BF02852929.

Haverkort, A. J. (1982). *Water management in potato production.* International Potato Center.

Karam, F., Amacha, N., Fahed, S., Asmar, T. E., & Domínguez, A. (2014). Response of potato to full and deficit irrigation under semiarid climate: Agronomic and economic implications. *Agricultural Water Management,* 142, 144-151. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.007

Kulig, B., Skowera, B., Klimek-Kopyra, A., Kołodziej, S., & Grygierzec, W. (2020). The use of the WOFOST model to simulate water-limited yield of early potato cultivars. *Agronomy*, 10(1), 81. https://doi.org/10.3390/agronomy10010081

Neysi, K., Eigdernezad, A., & Abbasi, F. (2024). Evaluation of the WOFOST model for simulation of corn yield and water productivity under different fertilizer and irrigation management. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering,* 14(55),57-76. https://doi.org/10.22125/IWE.2023.396538.1718 [In Persian]

Onder, S., Caliskan, M. E., Onder, D., & Caliskan, S. (2005). Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agricultural Water Management,* 73(1), 73-86. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.023

Paredes, P., D'Agostino, D., Assif, M., Todorovic, M., & Pereira, L. S. (2018). Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 195, 11-24. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.011

Ravensbergen, A. P. P., van Ittersum, M. K., Kempenaar, C., Ramsebner, N., de Wit, D., & Reidsma, P. (2024). Coupling field monitoring with crop growth modelling provides detailed insights on yield gaps at field level: A case study on ware potato production in the Netherlands. *Field Crops Research*, *308*, 109295. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109295

Romero, A. P., Alarcón, A., Valbuena, R. I., & Galeano, C. H. (2017). Physiological assessment of water stress in potato using

spectral information. *Frontiers in Plant Science,* 8, 1608. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01608

Sood, M. C., & Singh, N. (2003). Water management. In the Potato: Production and Utilization in Sub-Tropics; Khurana, SMP, Minhas, JS, Pandey, SK, Eds.

Ten Den, T., van de Wiel, I., De Wit, A., van Evert, F. K., van Ittersum, M. K., & Reidsma, P. (2022). Modelling potential potato yields: Accounting for experimental differences in modern cultivars. *European Journal of Agronomy,* 137, 126510. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126510

Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M. T. A., Stöckle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy journal*, 101(3), 509-521. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s

Torkaman, M., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A. (2023). Calibration and Validation of WOFOST Model for Predicting the Phenology and Yield in Potato *(Solanum tuberosum L.)* growing regions in Iran. *Agroecology.* 14(4), 601-615. https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.47502 [In Persian]

Van Diepen, C. V., Wolf, J. V., Van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and management,* 5(1), 16-24. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989. tb0 0755.x

Zarzyńska, K., Boguszewska-Mańkowska, D., & Nosalewicz, A. (2017). Differences in size and architecture of the potato cultivars root system and their tolerance to drought stress.