

Research Article

Evaluation of Water Use, Evapotranspiration and Water Productivity of Lentil Plant Using NIAZAB System under Conditions of Water Deficit Stress and Iron Fertilizer Application

Ali Abdzad Gohari^{1✉}, Seyed Mostafa Sadeghi², Niazali Ebrahimipak³,
Arash Tafteh⁴

1-Corresponding Author, Department of Irrigation and Soil Physics Research, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: abdzadgohari_a@yahoo.com

2-Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.
E-mail: sm.sadeghi@iau.ac.ir

3-Department of Irrigation and Soil Physics Research, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: nebrahimipak@yahoo.com

4-Department of Irrigation and Soil Physics Research, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: arash_tafteh@yahoo.com

Received: May 13, 2025
Accepted: August 17, 2025

Revised: August 9, 2025
Published: August 26, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

The NIAZAB system estimates water consumption at different levels of cultivation based on the latest scientific methods and provides macro information to regional managers. The use of the NIAZAB system in determining the actual amount of water for lentil irrigation was based on the inverse solution of the yield production function. Irrigation is essential when lentil plant is growing. Water deficit stress is one of the most important environmental stresses that can adversely affect soil properties, plant growth, and productivity of agricultural crops, including lentil. The aim of this study is to evaluate water consumption, evapotranspiration, and water productivity of lentil plant using the NIAZAB system under conditions of water deficit stress and iron fertilizer application.

Methodology

This research was conducted in Daylaman district, Siyahkal city, Guilan province of Iran in 2018 and 2019 as a split plot experiment on the basis of randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main plots were comprised of four levels of no irrigation (rainfed, I₁), irrigation until flowering stage (I₂), irrigation until pod formation stage (I₃), irrigation during flowering, and pod formation stage (I₄). The sub-plots consisted of 4% of iron nano-chelate fertilizer applied at flowering stage (F₁), pod formation stage (F₂), flowering and pod formation stages (F₃) and pre-ripening stage (F₄).

Results

For water consumption values, the root mean square error (RMSE) of the Tafteh, Pasquale, and Raes methods in 2018 was 24.76, 77.27 and 24.35 mm, respectively, and in 2019 it was 33.06, 62.90 and 32.23 mm, respectively. The root mean square normal error (RMSE_n) in the Tafteh, Pasquale, and Raes methods was 0.11, 0.35, and 0.11 percent in 2018, respectively, and 0.17, 0.32, and 0.16 percent in 2019, respectively. In 2018, the agreement or consistency index (d) of the Tafteh, Pasquale, and Raes methods was 0.95, -0.13, and 0.95 percent, respectively, and the efficiency coefficient (EF) was 0.82, -0.78, and 0.83 percent, respectively. In 2019, the agreement or consistency index (d) of the Tafteh, Pasquale, and Raes methods was 0.88, 0.26, and 0.88 percent, respectively, and EF was 0.59, -0.47, and 0.61 percent, respectively. The coefficient of determination (r²) values for water consumption in the Tafteh, Pasquale and Raes

methods varied between 0.74 and 0.85 over the two years. The RMSE for daily evapotranspiration of the Tafteh, Pasquale, and Raes methods was 24.9, 86.7 and 24.7 mm/day in the first year, respectively, and 34.4, 67.9 and 33.7 mm/day in the second year, respectively. In daily evapotranspiration, the RMSE_n in 2018 and 2019 was 0.10 and 0.16 percent in the Tafteh method, 0.36 and 0.31 percent in the Pasquale method and 0.10 and 0.16 percent in the Raes method, respectively. The agreement or consistency index (d) for daily evapotranspiration of the Tafteh, Pasquale, and Raes methods was 0.95, -0.22, and 0.96 percent in the first year, respectively, and 0.88, 0.24, and 0.88 percent in the second year, respectively. The EF was obtained for the Tafteh, Pasquale, and Raes methods in the first year was 0.85, -0.88 and 0.85 percent, respectively and in the second year it was 0.63, -0.44 and 0.65 percent, respectively. The RMSE for water productivity and water use efficiency in 2018 was 0.08 and 0.07 mm/day in the Tafteh method, 0.27 and 0.25 mm/day in the Pasquale method, and 0.08 and 0.07 mm/day in the Raes method, respectively, while these values in 2019 were 0.15 and 0.12 mm/day in the Tafteh method, 0.25 and 0.23 mm/day in the Pasquale method, and 0.14 and 0.11 mm/day in the Raes method, respectively. In water productivity, the agreement index (d) and the EF of the Tafteh method were 0.38 and 0.92 percent, respectively, in 2018, and 1.56 and 2.43 percent, respectively, in 2019. These indicators in the Pasquale method showed 1.32 and 10.82 percent in the first year and 1.60 and 9.39 percent in the second year, respectively. These two indices were 0.41 and 0.03 percent in 2018 using the Raes method, respectively, and 1.34 and 1.99 percent, respectively, in 2019. In water use efficiency, the agreement index (d) and EF in the Tafteh method were 0.34 and 0.15 percent, respectively, in 2018, and 1.276 and 1.849 percent, respectively, in 2019. These indicators in the Pasquale method showed 1.41 and 11.39 percent in the first year and 1.46 and 9.41 percent in the second year, respectively. These two indices were 0.32 and 0.14 percent in 2018 using the Raes method, respectively, and 0.98 and 1.55 percent in 2019, respectively.

Conclusion

In general, the results of the NIAZAB system showed that the Tafteh and Raes methods had numbers closer to the measured data, and these two methods in the system can be recommended as a suitable method for decision-making and estimating the water consumption of lentil plant for the study area.

Keywords: Applied Water, Grain yield, Growth stages, Numerical inverse solution, Water use efficiency.

Author Contributions

Conceptualization, A.A.G and A.T; methodology, A.A.G and A.T; Performing experiments and measurements, S.M.S; software, A.A.G; N.E.P; and A.T; validation, A.A.G; N.E.P; and A.T; formal analysis, A.A.G and A.T; data curation, S.M.S; writing-original draft preparation, A.A.G; writing-review and editing, A.A.G and A.T; visualization, A.A.G; supervision, S.M.S.; project administration, A.A.G; funding acquisition, All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgements

This paper is as part of MSc thesis in Islamic Azad University of Lahijan that done in collaboration with researchers from the Soil and Water Research Institute (SWRI). The authors are thankful to the Islamic Azad University of Lahijan.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Abdzaad Gohari, A., Sadeghi, S.M., Ebrahimipak, N. & Tafteh, A. (2025). Evaluation of water use, evapotranspiration and water productivity of lentil plant using NIAZAB system under conditions of water deficit stress and iron fertilizer application. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 73–91.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67285.1009>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS
JOURNALS



ارزیابی آب مصرفی، تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب گیاه عدس با استفاده از سامانه نیاز آب در شرایط تنش کمبود آب و مصرف کود آهن

علی عبدالادگوهری^۱ , سیدمصطفی صادقی^۲ , نیازعلی ابراهیمی پاک^۳ , آرش تافته^۴ 

۱- نویسنده مسئول، بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: abdazadgohari_a@yahoo.com

۲- دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران. رایانامه: sm.sadeghi@iau.ac.ir

۳- بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: nebrahimipak@yahoo.com

۴- بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: arash_tafteh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

چکیده

تنش کمبود آب یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که بر رشد و عملکرد گیاه عدس (*Lens culinaris* L.) تأثیر نامطلوب دارد. سامانه نیاز آب، سامانه‌ای است که میزان آب مصرفی گیاه را تخمین زده و اطلاعات لازم را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در این پژوهش، آب مصرفی، تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب گیاه عدس در شرایط تنش کمبود آب و مصرف کود آهن با استفاده از سامانه نیاز آب بر اساس حل معکوس تابع تولید در بخش دیلمان از توابع شهرستان سیاهکل در استان گیلان در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ انجام شد. عامل اصلی شامل چهار سطح بدون آبیاری (دیم، I₁)، آبیاری تا مرحله گل‌دهی (I₂)، آبیاری تا مرحله غلاف‌دهی (I₃)، آبیاری در مرحله گل‌دهی و غلاف‌دهی (I₄) و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی کود نانوکلیت آهن با غلظت ۴ در هزار بود که در مرحله‌های گل‌دهی (F₁)، غلاف‌دهی (F₂)، گل‌دهی و غلاف‌دهی (F₃) و قبل از رسیدگی (F₄) انجام شد. در مقادیر آب مصرفی، شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در روش‌های تافته، پاسکوئله و رانس در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۲۴/۷، ۷۷/۳ و ۲۴/۳ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۳۳/۱، ۶۲/۹ و ۳۲/۲ میلی‌متر بود. این شاخص برای تبخیر-تعرق روزانه در روش‌های تافته، پاسکوئله و رانس در سال اول به‌ترتیب ۲۴/۹، ۸۶/۷ و ۲۴/۷ میلی‌متر در روز و در سال دوم به‌ترتیب ۳۴/۴، ۶۷/۹ و ۳۳/۷ میلی‌متر در روز بودند. به‌طور کلی، نتایج سامانه نیاز آب نشان داد که روش‌های تافته و رانس اعداد نزدیک‌تری به داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند و این دو روش در سامانه می‌توانند به‌عنوان یک روش مناسب در تصمیم‌گیری و تخمین آب مصرفی گیاه عدس برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شوند.

واژه‌های کلیدی: آب کاربردی، حل معکوس عددی، محصول دانه، کارایی مصرف آب، مراحل رشد.

استناد به این مقاله: عبدالادگوهری، ع.، صادقی، س.م.، ابراهیمی پاک، ن. و تافته، آ. (۱۴۰۴). ارزیابی آب مصرفی، تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب گیاه عدس با استفاده از سامانه نیاز آب در شرایط تنش کمبود آب و مصرف کود آهن. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۲)، ۷۳-۹۱.

مقدمه

امنیت غذایی مردم جهان، چالشی است که مستلزم سرمایه‌گذاری عظیم در تمام زمینه‌های مرتبط با پژوهش‌های کشاورزی از جمله توسعه فناوری و سامانه‌های بر خط است. انجام سیاست‌های کشاورزی جدید با چشم‌انداز تأمین مواد غذایی برای آینده و افزایش بهره‌وری محصول بسیار حیاتی است. حبوبات یک منبع سرشار از پروتئین، مواد معدنی، کربوهیدرات‌ها و ترکیبات فعال زیستی برای ارتقای سلامت انسان هستند. عدس (*Lens culinaris* (L.) Medik) یکی از حبوبات مهمی می‌باشد که به‌امنیت غذایی مردم جهان کمک کرده و در ایران غالباً به‌صورت دیم کشت می‌شود (Ahmadi et al, 2020). معمولاً عدس در پاییز یا اوایل زمستان در کشورهای جنوب آسیا، محیط‌های مدیترانه‌ای و مناطقی که با خشکی متناوب در مرحله رویشی و زایشی مواجه هستند، کاشته می‌شود.

دستیابی به حداکثر عملکرد و جبران تبخیر-تعرق گیاه عدس، با افزایش میزان آب و تأمین کامل آبیاری در مراحل مختلف رشد، به‌ویژه در زمان گل‌دهی حاصل می‌شود (Sadeghi & Abdzad Gohari, 2023; Amiri et al., 2021). در یک مطالعه، اثر تنش خشکی در مرحله زایشی بر روی ۱۵ ژنوتیپ عدس بومی ایران بررسی و گزارش شد که در بسیاری از صفات اندازه‌گیری شده، تنوع قابل‌توجهی بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه وجود داشت و عملکرد و تعداد دانه در بوته بیشترین تأثیرپذیری را از شرایط تنش خشکی داشتند (Vafaei et al., 2018). در آزمایشی دیگر، (Saremi et al., 2015) نشان دادند که مقدار آب مصرفی، بر تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته، محصول زیست‌توده، محصول دانه و بهره‌وری آب گیاه عدس، اثر معناداری (در سطح احتمال ۱ درصد) داشت و دو تیمار ۲۵ و ۷۵ درصد نیاز آبی به‌ترتیب کمترین و بیشترین محصول دانه عدس را با میانگین ۱۰۲۲ و ۱۳۸۱ کیلوگرم بر هکتار داشتند. بهره‌وری آب در تیمار ۲۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی دارای بیشترین میزان و در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی کمترین مقدار را داشت. نتایج پژوهشی که شامل بدون آبیاری (دیم) و آبیاری در کل دوره رشد و یکبار آبیاری در مراحل شاخه‌دهی، گل‌دهی، غلاف‌دهی و پرشدن دانه‌ها در عدس بود، نشان داد که بیشترین محصول در تیمار آبیاری کامل رخ داد و انجام یکبار آبیاری در مرحله گل‌دهی باعث افزایش محصول دانه به‌میزان ۵۲ درصد نسبت به شرایط بدون آبیاری شد (Hosseini et al., 2011).

آهن یکی از عناصر دارای اهمیت در تغذیه گیاه می‌باشد که در خاک وجود دارد، ولی زیست‌فراهمی آن به‌دلایل متعددی بسیار محدود و کم می‌باشد (Mehraban, 2018). کود آهن باعث تقویت رشد رویشی در گیاه شده و از طریق افزایش تعداد و سطح برگ، در افزایش فتوسنتز نقش به‌سزایی دارد و زمینه افزایش عملکرد دانه و اجزای عملکرد را در گیاه فراهم می‌آورد. آهن در ساختمان کلروفیل شرکت ندارد، ولی کمبود آن موجب کاهش غلظت کلروفیل و در نهایت زردی برگ‌های گیاهان می‌شود (Salkhouri Ghiathund et al., 2018). Ghaderi et al. (2025) گزارش کردند که کمبود آهن در خاک‌های منطقه شاهرود در میان عنصرهای غذایی کم‌مصرف محدود‌کننده‌ترین عامل در تولید چغندر قند بود.

روشی‌های صحیح مدیریت آبیاری و تعیین نیاز آبی، آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری می‌توانند حداکثر تولید و سود خالص را به‌همراه بیاورند و به‌عنوان یک فناوری مهم، هدفمند، هوشمند و اقتصادی در مهندسی آبیاری مطرح هستند (Taftah et al., 2014). در حال حاضر دانش فنی جامعی که بتواند از بانک‌های اطلاعات کلان کشور برای برآورد و تعیین نیاز آبی، آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری در منطقه، دهستان، شهرستان، دشت، حوضه آبریز، الگوی کشت گیاهان و شبکه‌های آبیاری استفاده کند، وجود ندارد و تنها تعداد محدودی نرم‌افزار و مدل وجود دارند که کاربرد نقطه‌ای داشته و بخشی از آن‌ها خیلی قدیمی می‌باشند و قابلیت برآورد و تعیین نیاز آبی در سطح کلان کشور را ندارند. از این‌رو، لازم بود سامانه جامعی طراحی و ایجاد شود تا این شکاف را پر نماید و بتواند با پشتیبانی بانک‌های اطلاعاتی و مجموعه الگوریتم‌های محاسباتی مقادیر نیاز آبی، آب مصرفی گیاهان را در سطح کشور برآورد و تعیین کند و به‌صورت مستقیم در اختیار ذی‌نفعان بخش آب قرار دهد تا موجب بهره‌برداری بهینه از آب در کشاورزی کشور شود (Ebrahimipak et al., 2022b). سامانه نیاز آب ایران که به‌وسیله مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در سال ۱۴۰۰

ارائه شد، با ایجاد بانک‌های اطلاعاتی منحصر به فرد در سطح کشور توانایی آن را دارد که تغییرات نیاز آبیاری محصولات زراعی و باغی را در شرایط اقلیمی مختلف تعیین نماید که در سطح مدیریت آب در بخش کشاورزی کشور دارای اهمیت بسیاری است. این سامانه بر اساس آخرین روش‌های علمی روز، آب مصرفی را در سطوح مختلف کشت تخمین زده و اطلاعات لازم را در اختیار مدیران منطقه‌ای قرار می‌دهد (Ebrahimipak et al., 2022b). هدف از این پژوهش، ارزیابی آب مصرفی، تبخیر-تعرق، بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب گیاه عدس با استفاده از سامانه نیاز آب در شرایط تنش کمبود آب و مصرف کود آهن در منطقه دیلمان بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) در سه تکرار در منطقه دیلمان استان گیلان در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ انجام شد. عامل کرت‌های اصلی شامل چهار سطح بدون آبیاری (دیم)، آبیاری در مرحله گل‌دهی، آبیاری در مرحله غلاف‌دهی و آبیاری در مرحله گل‌دهی و غلاف‌دهی (آبیاری کامل) و عامل کرت‌های فرعی شامل محلول‌پاشی کود آهن به میزان ۴ در هزار در زمان‌های گل‌دهی، غلاف‌دهی، گل‌دهی و غلاف‌دهی و مرحله قبل از رسیدگی بودند. آب مصرفی، تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب گیاه عدس در شرایط تنش کمبود آب و مصرف کود آهن در شرایط مزرعه با روش‌های موجود در سامانه نیاز آب (شامل روش‌های تافته، پاسکوئله و رائس) مقایسه و ارزیابی شدند.

داده‌های هواشناسی از ایستگاه بخش دیلمان دریافت شد (جدول ۱).

جدول ۱. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد آزمایش در طول دوره رشد.

ماه	کمینه دما (°C)	بیشینه دما (°C)	مجموع ساعات آفتابی (h)	بارندگی (mm)	میانگین رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (m/s)	تبخیر از تشتک (mm/day)							
	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۷						
فروردین	۴/۰	۴/۳	۱۶/۴	۱۳/۰	۱۸۹/۹	۱۹۶/۰	۱۳/۴	۱۰۳/۵	۶۳/۱	۶۹/۳	۱/۴۷	۱/۰۱	۳/۰۸	۲/۵۳
اردیبهشت	۷/۶	۵/۹	۱۸/۳	۱۶/۱	۲۲۶/۳	۲۱۸/۸	۴۱/۸	۲۶/۷	۶۷/۹	۶۴/۴	۱/۱۲	۰/۸۹	۳/۴۱	۳/۱۱
خرداد	۱۰/۴	۹/۵	۲۲/۳	۲۰/۳	۲۳۶/۴	۲۰۲/۵	۳۳/۹	۱۲	۷۱/۶	۶۷/۱	۱/۰۶	۰/۹۴	۳/۸۶	۲/۵۸
تیر	۱۶/۶	۱۳/۹	۲۸/۹	۲۳/۷	۲۱۹/۵	۲۲۶/۳	۵/۸	۲/۹	۶۴/۲	۷۱/۲	۱/۱۹	۰/۹۷	۴/۵۹	۳/۹۸

قبل از آماده‌سازی زمین و مصرف کود شیمیایی، از خاک محل آزمایش از عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر نمونه برداری گردید (جدول ۲). بذر مورد استفاده گیاه عدس (*Lens culinaris* L.) از رقم محلی مرجو، زمان کاشت آن در نیمه دوم اسفند ماه و زمان برداشت آن اواخر تیر ماه بود. ابعاد هر کرت ۴×۲/۵ متر مربع و فاصله بین تکرارها، ۲ متر بود. برای تعیین زمان آبیاری در تیمارهای پایش رطوبتی از تانسیموتر استفاده شد. تانسیموترها از نوع فلزی ثابت بودند که در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری و در وسط هر کرت و در بین دو خط کشت و بین دو بوته گیاه نصب شدند. باتوجه به توسعه ریشه گیاه عدس در مراحل مختلف رشد از تانسیموتری که در عمق ۱۵ سانتی‌متری نصب شده بود، برای قرائت در مراحل اولیه رشد و از تانسیموتری که در عمق ۳۰ سانتی‌متری نصب شده بود، برای قرائت در مراحل میانی و پایانی رشد استفاده شد. برای اجرای صحیح نمونه برداری و حذف اثرات حاشیه‌ای، بوته‌ها در ردیف‌های کناری و نیز بوته‌های واقع شده در ابتدا و انتهای کرت‌ها در نظر گرفته نشدند و برای اندازه‌گیری محصول دانه، ۱۰ بوته برداشت و غلاف‌های رسیده انتخاب و به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون خشک شدند. سپس با استفاده از ترازوی دیجیتالی و با دقت یک صدم گرم توزین و به واحد کیلوگرم بر هکتار تبدیل شد.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه.

سال	عمق خاک (cm)	سیلت (%)	شن (%)	رس (%)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)
۱۳۹۷	۳۰-۶۰	۵۱	۲۴	۲۵	لومی‌سیلتی	۱/۳۸	۲/۷۸	۰/۰۵۰
۱۳۹۸	۳۰-۶۰	۵۱	۲۵	۲۴	لومی‌سیلتی	۱/۳۸	۲/۹۰	۰/۱۳
۱۳۹۸	۳۰-۶۰	۵۳	۲۴	۲۳	لومی‌سیلتی	۱/۳۸	۲/۸۰	۰/۱۱

ادامه جدول ۲-

سال	pH	ECe (dS/m)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	آهن قابل جذب (mg/kg)	رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دایم (%)	رطوبت وزنی در ظرفیت مزرعه‌ای (%)
۱۳۹۷	۶/۵۹	۰/۳۳	۱۳۶	۱۳/۲	۱/۹۰	۱۶/۳	۳۳/۰
۱۳۹۸	۶/۹۳	۰/۴۰	۱۳۰	۷/۱	۱/۸۹	۱۶/۳	۳۳/۷
۱۳۹۸	۶/۹۱	۰/۴۵	۱۵۲	۱۶/۴	۱/۹۶	۱۵/۸	۳۲/۴
۱۳۹۸	۶/۸۸	۰/۴۲	۱۳۶	۹/۲	۱/۰۶	۱۵/۳	۳۲/۳

اندازه‌گیری مقدار آب تحویلی به هر واحد آزمایشی یا کرت با کنتور انجام شد. میزان آب مصرفی (آب کاربردی) در طول دوره رشد گیاه از مجموع آب آبیاری و مقدار بارندگی مؤثر (روش بارش قابل اطمینان) تأمین شد. بهره‌وری آب (Franca et al., 2021) و کارایی مصرف آب (Nie et al., 2022) با استفاده از روابط ۱ تا ۶ محاسبه شدند.

$$WP_{Bio} (kg/m^3) = \frac{Y_{Bio}}{WU} \times 100 \quad [۱]$$

$$WP_{Pod} (kg/m^3) = \frac{Y_{Pod}}{WU} \times 100 \quad [۲]$$

$$WP_{Seed} (kg/m^3) = \frac{Y_{Seed}}{WU} \times 100 \quad [۳]$$

$$WUE_{Bio} (kg/m^3) = \frac{Y_{Bio}}{ET_a} \times 100 \quad [۴]$$

$$WUE_{Pod} (kg/m^3) = \frac{Y_{Pod}}{ET_a} \times 100 \quad [۵]$$

$$WUE_{Seed} (kg/m^3) = \frac{Y_{Seed}}{ET_a} \times 100 \quad [۶]$$

که در آن، WP: بهره‌وری آب یا بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، WUE: کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y_{Bio} : عملکرد زیست توده (کیلوگرم)، Y_{Bio} : عملکرد غلاف (کیلوگرم)، Y_{Bio} : محصول دانه (کیلوگرم) و WU: آب مصرفی یا کاربردی (متر مکعب) بود. در سامانه نیاز آب، میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع و تبخیر-تعرق واقعی از روش‌های (Raes, 2004)، (Taftah, 2014a) و پاسکوئه بر مبنای فائو ۶۶ از پژوهش Raes (2017) محاسبه شد که به‌ترتیب در روابط ۷ تا ۹ ارائه شده است. هر سه روش ارزیابی، حساسیت محصول را بر روی بازدها و توان‌های مختلف بررسی می‌کنند.

$$\frac{y_a}{y_m} = \prod_{j=1}^n \left[1 - k_{yi} \left(1 - \frac{ET_{a,j}}{ET_{m,j}} \right) \right]^{\frac{\Delta t_j}{L_i}} \quad [۷]$$

$$\frac{y_a}{y_m} = \prod_{j=1}^n \left[1 - k_{yi} \left(1 - \frac{ET_{a,j}}{ET_{m,j}} \right) \right]^{\sum_{i=1}^n k_{yi}} \quad [۸]$$

$$y_a = \sum_i^n B_i \times HI, \quad B_i = \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right) \times \sum_1^n ET_{ai} \quad [۹]$$

که در آن y_a و y_m به ترتیب عملکرد واقعی و حداکثر عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، k_{yi} ضریب واکنش عملکرد محصول به آب، $ET_{a,j}$ و $ET_{m,j}$ به ترتیب تبخیر-تعرق واقعی و تبخیر-تعرق استاندارد در زمان j ، بازه زمانی مورد نظر (روز) و L_i طول کل دوره رشد می‌باشند. در معادله پاسکواله، n شماره روز پس از کشت، (B_i) مقدار زیست‌توده در هر بازه و (HI) شاخص برداشت محصول (نسبت محصول دانه به عملکرد زیست توده) هستند. در انتهای فصل زراعی، از نرم‌افزار MSTATC برای تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده و انجام مقایسه میانگین داده‌ها و از نرم‌افزار Excel برای رسم شکل‌ها استفاده شد. در تکنیک حل معکوس تابع تولید، مقادیر عملکرد برای هر تیمار به سامانه وارد شد و متناسب با آن، مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمد. سپس با مقادیر به دست آمده از مزرعه مقایسه گردید. برای ارزیابی نتایج سامانه با داده‌های مزرعه‌ای، از روابط ۱۰ تا ۱۵ استفاده شد.

$$MRE = \frac{O_i - P_i}{O_i} \times 100 \quad [۱۰]$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)} \quad [۱۱]$$

$$RMSE_n = \left[\left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} / \bar{O} \right] \times 100 \quad [۱۲]$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [۱۳]$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [۱۴]$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [۱۵]$$

که در آن، MRE ، میانگین خطای نسبی، $RMSE$ ، ریشه میانگین مربعات خطا، $RMSE_n$ ، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، EF ، ضریب کارایی مدل، d ، شاخص توافق یا سازگاری و r^2 ضریب تبیین هستند. پارامترهای O ، P ، $\bar{O}$ و n به ترتیب داده مشاهده شده، برآورد شده و میانگین داده‌های مشاهده‌ای و تعداد مشاهدات می‌باشند. در ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، اگر مقادیر MRE و $RMSE$ به صفر و مقادیر d ، EF و r^2 به ۱ نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده این مطلب است که مدل شبیه‌سازی را بهتر انجام داده است. اگر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف برآورد شده است (Jamieson et al., 1991). میزان ضریب کارایی و میزان شاخص توافق یا سازگاری بین منفی بی‌نهایت تا مثبت یک متغیر است و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، مدل دارای کارایی بهتر و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر می‌باشد (Willmott, 1982).

نتایج و بحث

نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که آبیاری کامل (آبیاری در تمام مراحل رشد) بیشترین عملکرد دانه را داشت و در صورت محدودیت آب، انجام آبیاری در هر یک از مراحل رشدی گیاه، به‌ویژه آبیاری تا مرحله غلاف‌دهی، سبب افزایش عملکرد دانه در عدس می‌شود. مقدار آب مصرفی در تیمارهای آبیاری تا مرحله گل‌دهی (I₂)، تا مرحله غلاف‌دهی (I₃)، مرحله گل‌دهی و غلاف‌دهی (I₄) در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۲۸۰، ۳۰۰ و ۳۰۳ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۲۵۱، ۲۶۸ و ۲۷۱ میلی‌متر بودند (جدول ۳). میانگین مقدار آب مصرفی در شرایط مزرعه‌ای و برآورد شده با روش‌های تافته، پاسکوله و رانس در سال اول به‌ترتیب مقادیر ۲۲۳، ۲۱۳، ۲۸۶ و ۲۱۴ میلی‌متر را نشان داد (جدول ۳) و خطای نسبی آن نسبت به شرایط مزرعه‌ای به‌ترتیب ۳/۹، ۳۵/۱ و ۳/۴ درصد بود (جدول ۴). در سال دوم این مقادیر به‌ترتیب ۱۹۹، ۱۷۶، ۲۵۳ و ۱۷۷ میلی‌متر بودند (جدول ۳) و خطای نسبی آن نسبت به شرایط مزرعه‌ای به‌ترتیب ۱۱/۳، ۳۲/۶ و ۱۰/۲ درصد بود (جدول ۴). میانگین تبخیر-تعرق در شرایط مزرعه‌ای و روش‌های تافته، پاسکوله و رانس در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب مقادیر ۲۴۳، ۲۴۱، ۳۱۴ و ۲۴۲ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب مقادیر ۲۱۷، ۱۹۴، ۲۷۴ و ۱۹۵ میلی‌متر بود (جدول ۳) که خطای نسبی آن در سال اول به‌ترتیب ۰/۳، ۳۶/۴ و ۰/۷ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۹/۹، ۳۲/۱ و ۸/۹ درصد بود (جدول ۴).

جدول ۳- مقادیر عملکرد، آب مصرفی و تبخیر-تعرق در شرایط اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه نیاز آب.

سال	سطح هر فاکتور	محصول دانه (kg ha ⁻¹)	آب مصرفی (mm)				تبخیر-تعرق (mm/day)			
			اندازه‌گیری	تافته	پاسکوله	رانس	اندازه‌گیری	تافته	پاسکوله	رانس
۱۳۹۷	I ₁	۲۱۱۶c	۲۲۰	۲۲۴	۳۰۰	۲۲۴	۲۴۰	۲۵۲	۳۲۹	۲۵۲
	I ₂	۲۱۹۴c	۲۸۰	۲۹۰	۳۰۱	۲۹۰	۳۰۵	۳۱۸	۳۳۰	۳۱۸
	I ₃	۲۶۹۰b	۳۰۰	۳۰۱	۳۰۲	۳۰۵	۳۲۸	۳۲۸	۳۳۲	۳۳۰
	I ₄	۲۸۹۴a	۳۰۳	۲۳۵	۳۰۰	۲۳۶	۳۳۰	۲۶۳	۳۲۹	۲۶۴
	F ₁	۱۵۹۴a	۱۶۶	۱۵۸	۲۶۸	۱۵۹	۱۸۱	۱۸۶	۲۹۶	۱۸۷
	F ₂	۱۵۸۶a	۱۶۵	۱۵۸	۲۵۷	۱۶۰	۱۸۰	۱۸۵	۲۸۴	۱۸۸
	F ₃	۱۶۶۸a	۱۷۴	۱۶۹	۲۷۹	۱۶۹	۱۸۹	۱۹۷	۳۰۷	۱۹۷
	F ₄	۱۶۸۴a	۱۷۵	۱۷۰	۲۸۰	۱۷۱	۱۹۱	۱۹۸	۳۰۸	۱۹۸
میانگین		۲۰۵۳	۲۲۳	۲۱۳	۲۸۶	۲۱۴	۲۴۳	۲۴۱	۳۱۴	۲۴۲
۱۳۹۸	I ₁	۱۸۸۷c	۱۹۵	۱۷۷	۲۷۳	۱۷۹	۲۱۴	۱۹۵	۲۹۴	۱۹۷
	I ₂	۱۹۶۱b	۲۵۱	۲۴۰	۲۷۵	۲۴۰	۲۷۳	۲۶۱	۲۹۶	۲۶۱
	I ₃	۲۴۰۸a	۲۶۸	۲۵۱	۲۷۷	۲۵۱	۲۹۳	۲۷۲	۲۹۸	۲۷۲
	I ₄	۲۵۸۵a	۲۷۱	۱۸۷	۲۷۴	۱۸۷	۲۹۵	۲۰۶	۲۹۵	۲۰۶
	F ₁	۱۴۲۷a	۱۴۹	۱۳۵	۲۲۹	۱۳۵	۱۶۲	۱۵۱	۲۵۰	۱۵۱
	F ₂	۱۴۱۹a	۱۴۸	۱۳۴	۲۲۷	۱۳۵	۱۶۱	۱۵۰	۲۴۸	۱۵۱
	F ₃	۱۴۹۱a	۱۵۶	۱۳۵	۲۲۸	۱۴۵	۱۶۹	۱۵۱	۲۴۹	۱۶۲
	F ₄	۱۴۹۹a	۱۵۶	۱۴۵	۲۴۰	۱۴۶	۱۷۰	۱۶۲	۲۶۱	۱۶۳
میانگین		۱۸۳۵	۱۹۹	۱۷۶	۲۵۳	۱۷۷	۲۱۷	۱۹۴	۲۷۴	۱۹۵

جدول ۴- مقادیر درصد خطای نسبی آب مصرفی و تبخیر-تعرق در شرایط اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه نیاز آب.

سال	سطح هر فاکتور	خطای نسبی آب مصرفی (%)			خطای نسبی تبخیر-تعرق (%)		
		تافته	پاسکوله	رئس	تافته	پاسکوله	رئس
۱۳۹۷	I ₁	۱/۸	۳۶/۴	۱/۸	۵/۰	۳۷/۱	۵/۰
	I ₂	۳/۶	۷/۵	۳/۶	۴/۳	۸/۲	۴/۳
	I ₃	۰/۳	۰/۷	۱/۷	۰/۶	۱/۲	۰/۶
	I ₄	-۲۲/۴	-۱/۰	-۲۲/۱	-۲۰	-۰/۳	-۲۰
	F ₁	-۴/۸	۶۱/۴	-۴/۲	۲/۳	۶۳/۵	۲/۳
	F ₂	-۴/۲	۵۵/۸	-۳/۰	۴/۴	۵۷/۸	۴/۴
	F ₃	-۲/۹	۶۰/۳	-۲/۹	۴/۲	۶۲/۴	۴/۲
	F ₄	-۲/۹	۶۰/۰	-۲/۳	۳/۷	۶۱/۳	۳/۷
میانگین		-۳/۹	۳۵/۱	-۳/۴	۰/۷	۳۶/۴	۰/۷
۱۳۹۸	I ₁	-۹/۲	۴۰	-۸/۲	-۷/۹	۳۷/۴	-۷/۹
	I ₂	-۴/۴	۹/۶	-۴/۴	-۴/۴	۸/۴	-۴/۴
	I ₃	-۶/۳	۳/۴	-۶/۳	-۷/۲	۱/۷	-۷/۲
	I ₄	-۳۱	۱/۱	-۳۱	-۳۰/۲	۰	-۳۰/۲
	F ₁	-۹/۴	۵۳/۷	-۹/۴	-۶/۸	۵۴/۳	-۶/۸
	F ₂	-۹/۵	۵۳/۴	-۸/۸	-۶/۲	۵۴	-۶/۲
	F ₃	-۱۳/۵	۴۶/۲	-۷/۱	-۴/۱	۴۷/۳	-۴/۱
	F ₄	-۷/۱	۵۳/۸	-۶/۴	-۴/۱	۵۳/۵	-۴/۱
میانگین		-۱۱/۳	۳۲/۶	-۱۰/۲	-۸/۹	۳۲/۱	-۸/۹

نتایج ارزیابی مقدار آب مصرفی و میزان تبخیر-تعرق در طی هر دو سال، بهترین درصد خطای نسبی را در روش‌های تافته و رئیس نشان داد (جدول ۳). میانگین بهره‌وری آب در سال اول در شرایط اندازه‌گیری شده، ۰/۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب و در روش‌های تافته، پاسکوله و رئیس به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۷۱ و ۰/۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب شدند که به ترتیب دارای خطای نسبی ۴/۸، ۲۲/۸ و ۴/۳ درصد بودند، در حالی که در سال دوم این مقادیر به ترتیب ۰/۹۳، ۱/۰۶، ۰/۷۲ و ۱/۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب بودند و خطای نسبی آن‌ها به ترتیب ۱۳/۸، ۲۲/۲ و ۱۲/۵ درصد را نشان داد (جدول‌های ۵ و ۶). میانگین کارایی مصرف آب در سال ۱۳۹۷ در شرایط اندازه‌گیری شده و در روش‌های تافته، پاسکوله و رئیس به ترتیب با میانگین ۰/۸۵، ۰/۸۶ و ۰/۶۵ و ۰/۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب و در سال ۱۳۹۸ به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۹۶، ۰/۶۶ و ۰/۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب بودند. در این میان، درصد خطای نسبی در سال اول به ترتیب ۰/۵، ۲۳/۴ و ۰/۱ درصد و در سال دوم به ترتیب ۱۲/۱، ۲۱/۷ و ۱۰/۸ درصد بودند (جدول‌های ۵ و ۶).

نتایج یک پژوهش نشان داد که سطوح آبیاری بر محصول دانه عدس مؤثر بود و تیمار آبیاری کامل نسبت به تیمار بدون آبیاری، سبب افزایش چشم‌گیر محصول دانه عدس شد. بنابراین، اعمال آبیاری در زمان مناسب و بر اساس نیاز آبی گیاه می‌تواند عملکرد محصول را تا حدود دو برابر نسبت به شرایط بدون آبیاری (دیم) افزایش دهد (Hosseini et al., 2011). در یک پژوهش دیگر گزارش شد که آبیاری زودهنگام و یا تاخیر در آبیاری، به دلیل عدم تأمین آب مورد نیاز در زمان حساس رشد، موجب کاهش عملکرد عدس می‌شود (Kamali et al., 2016). نتایج سایر پژوهشگران نشان داد که در طول دوره رشد گیاه، میزان تبخیر-تعرق مقدار ثابتی نمی‌باشد. علاوه بر این، شرایط محیطی نیز بر میزان تبخیر-تعرق مؤثر می‌باشد (Tafteh et al., 2014b; Abdzad Gohari et al., 2022).

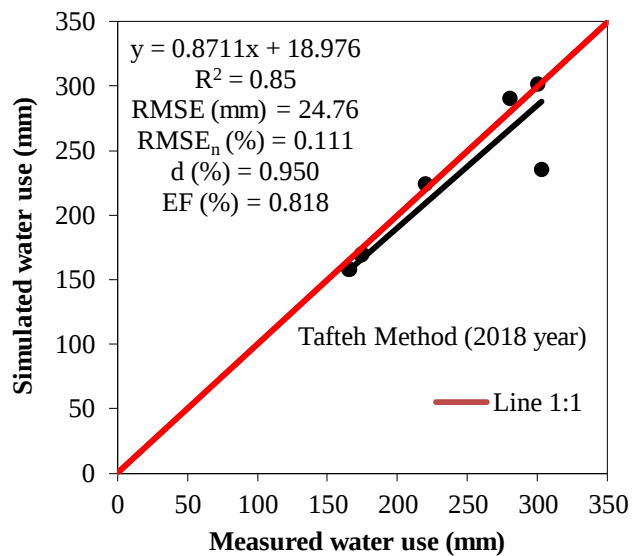
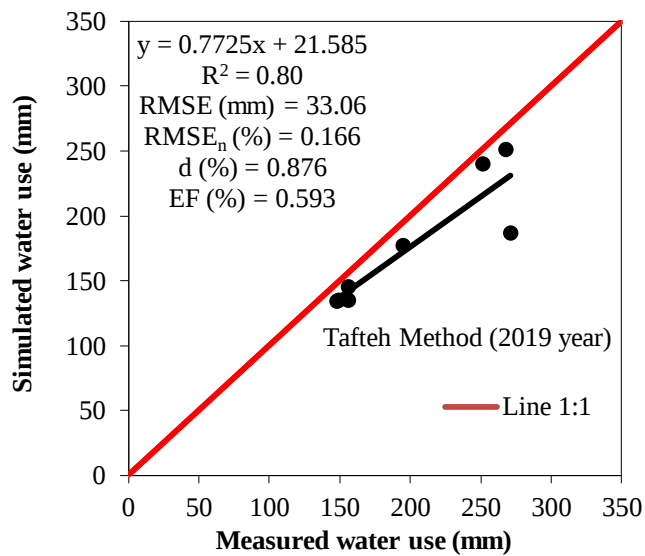
جدول ۵- مقادیر بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب در شرایط اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه نیاز آب.

سال	سطح هر فاکتور	بهره‌وری آب (kg/m^3)				کارایی مصرف آب (kg/m^3)			
		اندازه‌گیری	تافتة	پاسکوئله	رأس	اندازه‌گیری	تافتة	پاسکوئله	رأس
۱۳۹۷	I ₁	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۶۴	۰/۸۴
	I ₂	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۶۹
	I ₃	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۲
	I ₄	۰/۹۶	۱/۲۳	۰/۹۶	۱/۲۳	۰/۸۸	۱/۱۰	۰/۸۸	۱/۱۰
	F ₁	۰/۹۶	۱/۰۱	۰/۵۹	۱/۰۰	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۵۴	۰/۸۵
	F ₂	۰/۹۶	۱/۰۰	۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۵۶	۰/۸۴
	F ₃	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۶۰	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۵۴	۰/۸۵
	F ₄	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۶۰	۰/۹۸	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۵۵	۰/۸۵
	میانگین	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۷۱	۰/۹۷	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۸۵
	I ₁	۰/۹۷	۱/۰۷	۰/۶۹	۱/۰۵	۰/۸۸	۰/۹۷	۰/۶۴	۰/۹۶
	I ₂	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۶۶	۰/۷۵
	I ₃	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۸۷	۰/۹۶	۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۸۹
۱۳۹۸	I ₄	۰/۹۵	۱/۳۶	۰/۹۴	۱/۳۸	۰/۸۸	۱/۲۵	۰/۸۸	۱/۲۵
	F ₁	۰/۹۶	۱/۰۶	۰/۶۲	۱/۰۶	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۵۷	۰/۹۵
	F ₂	۰/۹۶	۱/۰۶	۰/۶۳	۱/۰۵	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۵۷	۰/۹۴
	F ₃	۰/۹۶	۱/۱۰	۰/۶۵	۱/۰۳	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۶۰	۰/۹۲
	F ₄	۰/۹۶	۱/۰۳	۰/۶۲	۱/۰۳	۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۵۷	۰/۹۲
	میانگین	۰/۹۳	۱/۰۶	۰/۷۲	۱/۰۵	۰/۸۵	۰/۹۶	۰/۶۶	۰/۹۵

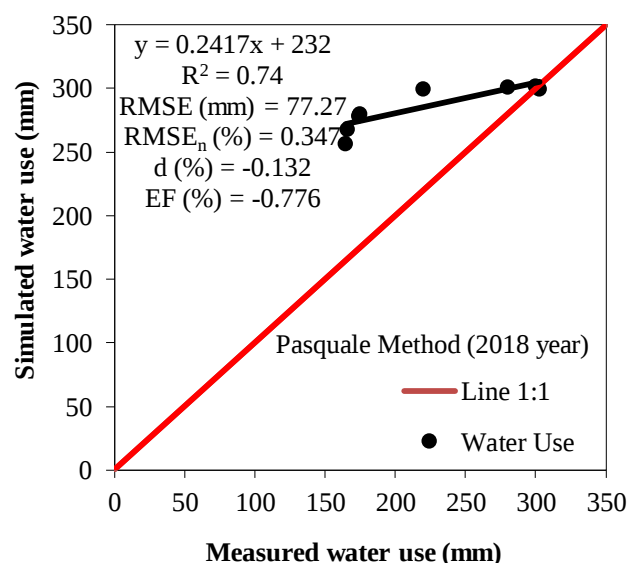
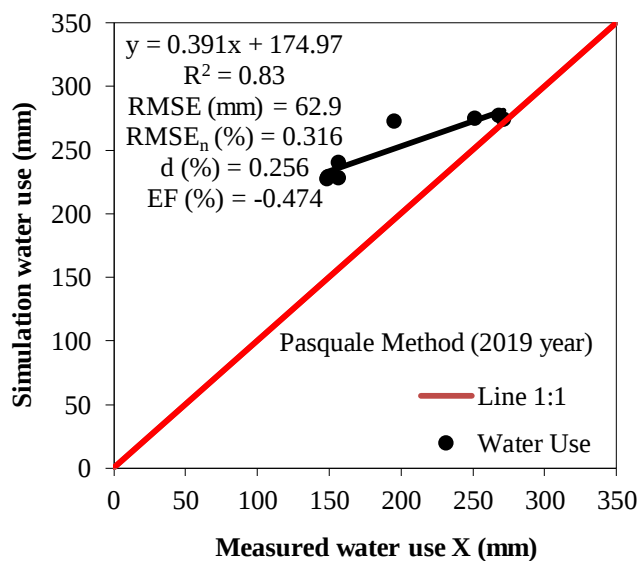
جدول ۶- مقادیر خطای نسبی بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب در شرایط اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه نیاز آب.

سال	سطح هر فاکتور	خطای نسبی بهره‌وری آب (%)			خطای نسبی کارایی مصرف آب (%)		
		تافته	پاسکوئله	رئس	تافته	پاسکوئله	رئس
۱۳۹۷	I ₁	-۱/۸	-۲۶/۷	-۱/۸	-۴/۸	-۲۷/۱	-۴/۸
	I ₂	-۳/۴	-۷/۰	-۳/۴	-۴/۱	-۷/۶	-۴/۱
	I ₃	-۰/۳	-۰/۷	-۱/۶	۰	-۱/۲	-۰/۶
	I ₄	۲۸/۹	۱/۰	۲۸/۴	۲۵/۵	۰/۳	۲۵/۰
	F ₁	۵/۱	-۳۸/۱	۴/۴	-۲/۷	-۳۸/۹	-۳/۲
	F ₂	۴/۴	-۳۵/۸	۳/۱	-۲/۷	-۳۶/۶	-۴/۳
	F ₃	۳/۰	-۳۷/۶	۳/۰	-۴/۱	-۳۸/۴	-۴/۱
	F ₄	۲/۹	-۳۷/۵	۲/۳	-۳/۵	-۳۸/۰	-۳/۵
میانگین		۴/۸	-۲۲/۸	۴/۳	۰/۵	-۲۳/۴	۰/۱
۱۳۹۸	I ₁	۱۰/۲	-۲۸/۶	۸/۹	۹/۷	-۲۷/۲	۸/۶
	I ₂	۴/۶	-۸/۷	۴/۶	۴/۶	-۷/۸	۴/۶
	I ₃	۶/۸	-۳/۲	۶/۸	۷/۷	-۱/۷	۷/۷
	I ₄	۴۴/۹	-۱/۱	۴۴/۹	۴۳/۲	۰	۴۳/۲
	F ₁	۱۰/۴	-۳۴/۹	۱۰/۴	۷/۳	-۳۵/۲	۷/۳
	F ₂	۱۰/۴	-۳۴/۸	۹/۶	۷/۳	-۳۵/۱	۶/۶
	F ₃	۱۵/۶	-۳۱/۶	۷/۶	۱۱/۹	-۳۲/۱	۴/۳
	F ₄	۷/۶	-۳۵/۰	۶/۸	۴/۹	-۳۴/۹	۴/۳
میانگین		۱۳/۸	-۲۲/۲	۱۲/۵	۱۲/۱	-۲۱/۷	۱۰/۸

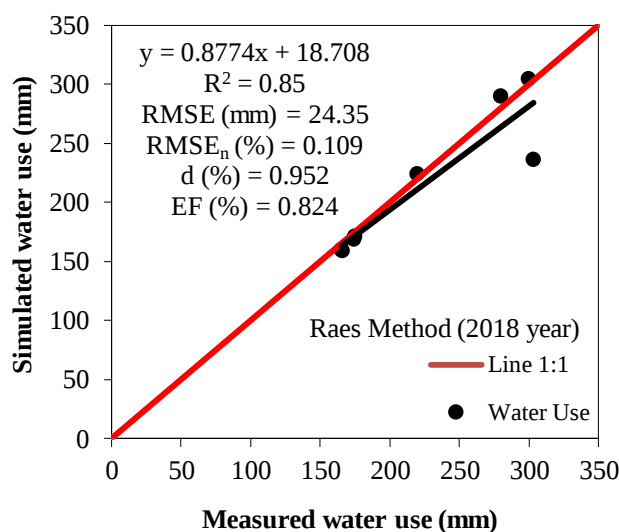
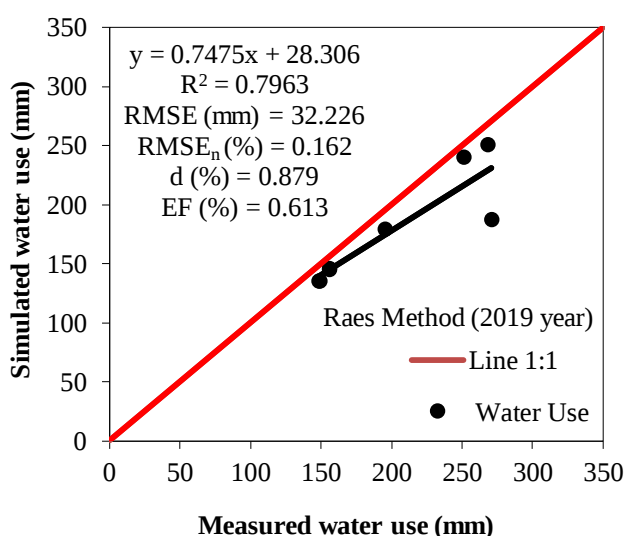
برای مقادیر آب مصرفی، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۲۴/۷۶، ۷۷/۲۷ و ۲۴/۳۵ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۳۳/۰۶، ۶۲/۹ و ۳۲/۲۲۶ میلی‌متر بود (شکل‌های ۱ تا ۳). ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (RMSE_n) در روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۰/۱۱، ۰/۳۵ و ۰/۱۱ درصد و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۰/۱۷، ۰/۳۲ و ۰/۱۶ درصد بود (شکل‌های ۱ تا ۳). در سال ۱۳۹۷، میزان شاخص توافق یا سازگاری (d) در روش تافته، پاسکوئله و رئس به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۱۳- و ۰/۹۵ درصد و ضریب کارایی (EF) به‌ترتیب ۰/۸۲، ۰/۷۸- و ۰/۸۳ درصد بود و در سال ۱۳۹۸، میزان شاخص توافق یا سازگاری (d) در روش تافته، پاسکوئله و رئس به‌ترتیب ۰/۸۸، ۰/۲۶ و ۰/۸۸ درصد و ضریب کارایی (EF) به‌ترتیب ۰/۵۹، ۰/۴۷- و ۰/۶۱ بود (شکل‌های ۱ تا ۳). مقادیر ضریب تبیین برای مقادیر آب مصرفی در روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس در طی دو سال بین ۰/۷۴ تا ۰/۸۵ متغیر بود (شکل‌های ۱ تا ۳).



شکل ۱- مقایسه مقادیر آب مصرفی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش تافته در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

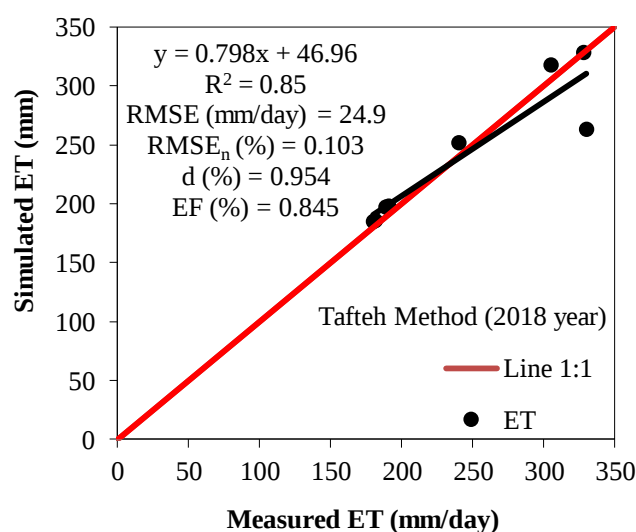
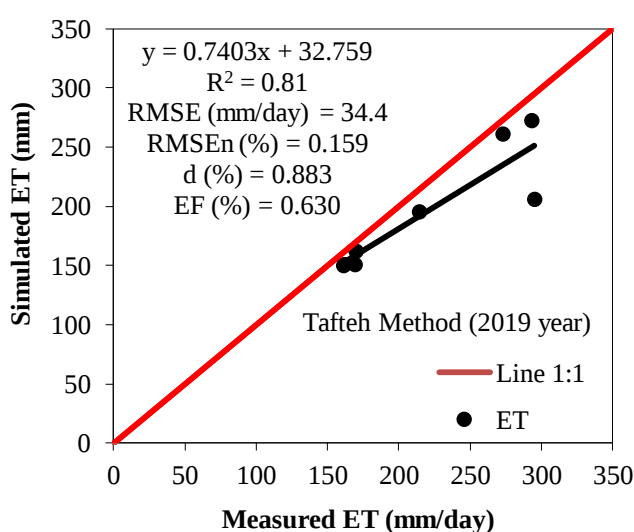


شکل ۲- مقایسه مقادیر آب مصرفی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش پاسکوئله در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

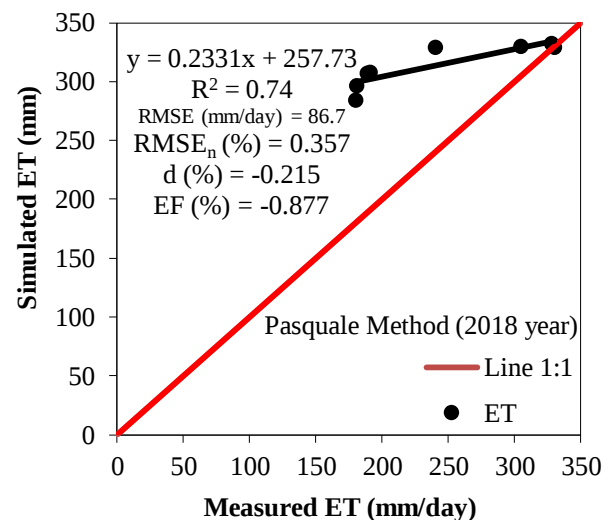
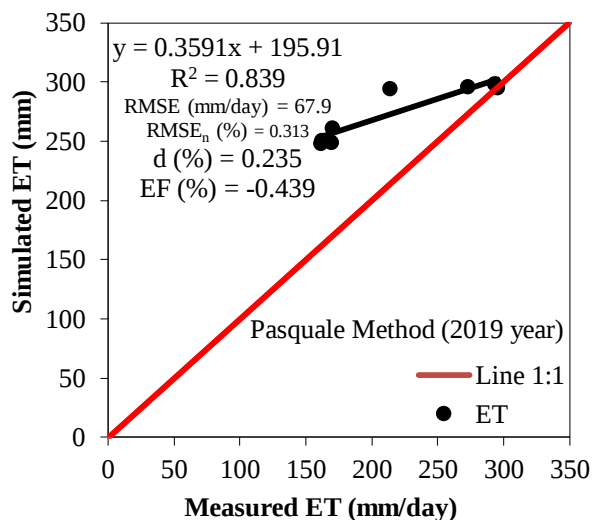


شکل ۳- مقایسه مقادیر آب مصرفی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش رانس در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

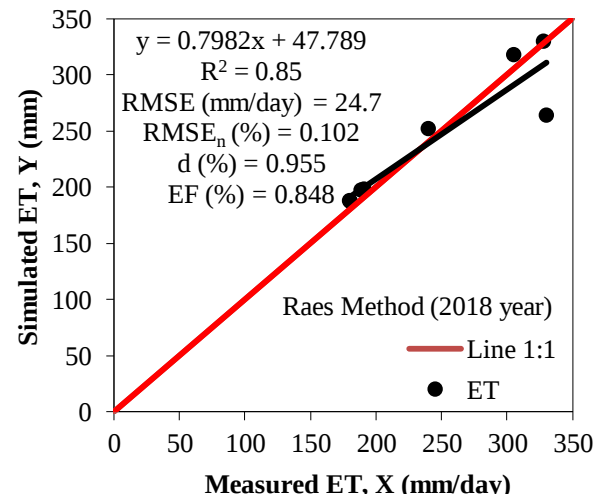
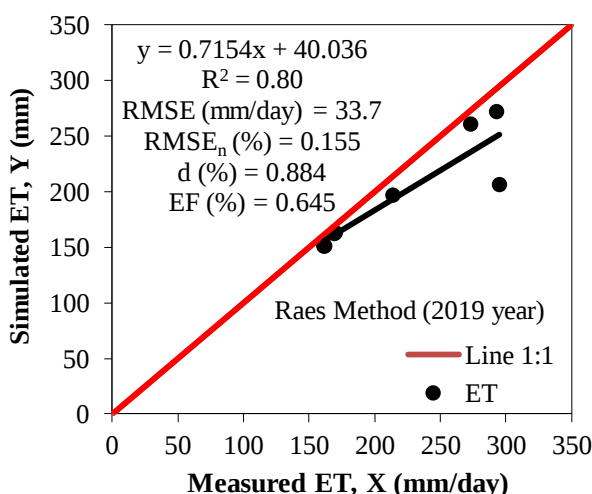
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تبخیر-تعرق روزانه در روش‌های تافته، پاسکوئله و رانس در سال اول به‌ترتیب ۲۴/۹، ۸۶/۷ و ۲۴/۷ میلی‌متر در روز و در سال دوم به‌ترتیب ۳۴/۴، ۶۷/۹ و ۳۳/۷ میلی‌متر در روز بود (شکل‌های ۴ تا ۶). در تبخیر-تعرق روزانه، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (RMSE_n) در سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در روش تافته به‌ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۱۶ درصد و در روش پاسکوئله به‌ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۳۱ درصد و در روش رانس به‌ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۱۶ درصد را نشان داد. شاخص توافق یا سازگاری (d) برای تبخیر-تعرق روزانه در روش تافته، پاسکوئله و رانس در سال اول به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۲۲ و ۰/۹۶ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۲۴ درصد بود (شکل‌های ۴ تا ۶). ضریب کارایی (EF) به‌دست آمده در روش‌های تافته، پاسکوئله و رانس در سال اول به‌ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸۸ و ۰/۸۵ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۰/۶۳، ۰/۴۴ و ۰/۶۵ درصد بود (شکل‌های ۴ تا ۶).



شکل ۴- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش تافته در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



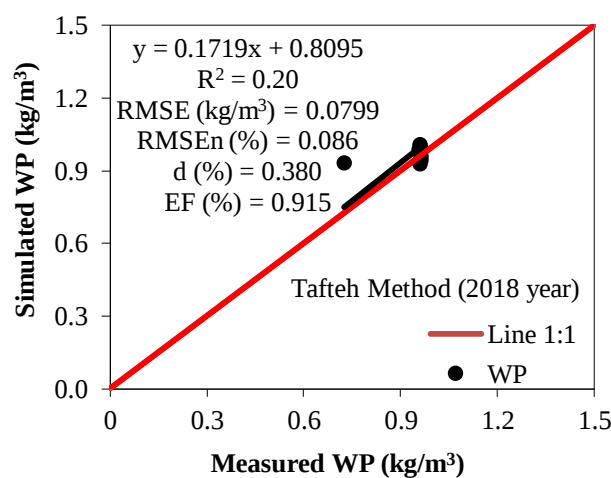
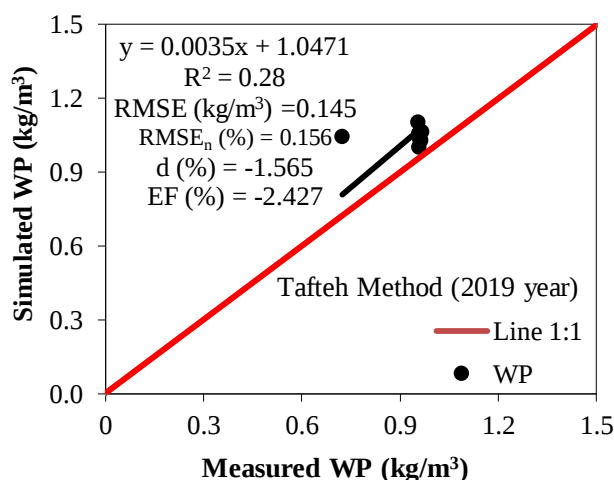
شکل ۵- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش پاسکوئله در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



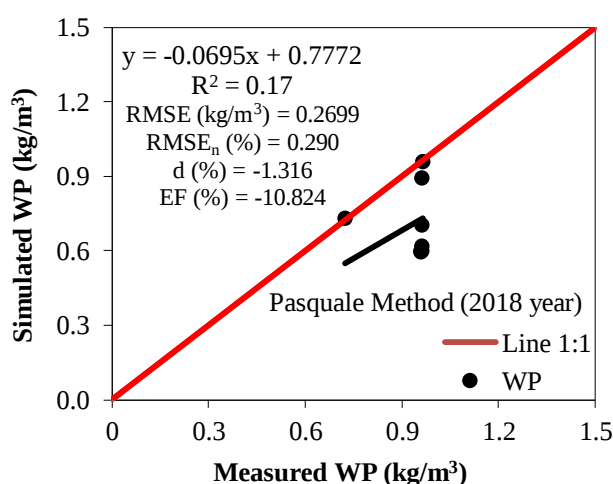
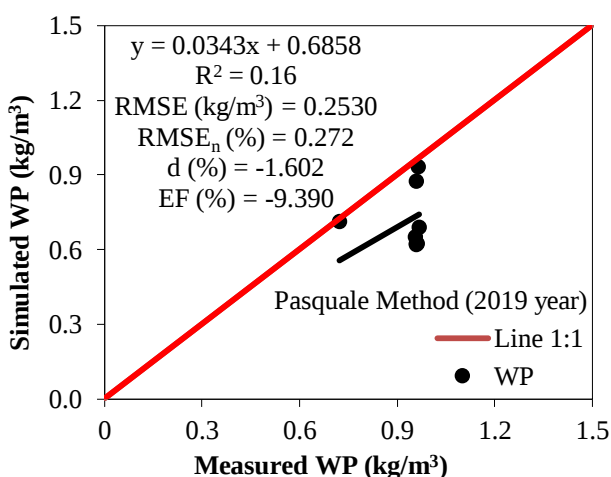
شکل ۶- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده به روش رائس در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب در سال ۱۳۹۷ در روش تافته به‌ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۰۶۶ میلی‌متر در روز، در روش پاسکوئله به‌ترتیب ۰/۲۷۰ و ۰/۲۵۳ میلی‌متر در روز و در روش رائس به‌ترتیب ۰/۰۷۷ و ۰/۰۶۶ میلی‌متر در روز بود، در حالی که این مقادیر در سال ۱۳۹۸ در روش تافته به‌ترتیب ۰/۱۴۵ و ۰/۱۲۱ میلی‌متر در روز، در روش پاسکوئله به‌ترتیب ۰/۲۵۳ و ۰/۲۳۲ میلی‌متر در روز و در روش رائس به‌ترتیب ۰/۱۳۶ و ۰/۱۱۵ میلی‌متر در روز بود (شکل‌های ۷ تا ۱۲). در بهره‌وری آب، شاخص توافق (d) و ضریب کارایی (EF) در روش تافته در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۰/۳۸۰ و ۰/۹۱۵ درصد و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۱/۵۶۵ و ۲/۴۲۷ درصد بود. این شاخص‌ها در روش پاسکوئله در سال اول به‌ترتیب ۱/۳۱۶ و ۱۰/۸۲۴ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۱/۶۰۲ و ۹/۳۹۰ درصد را نشان داد. این دو شاخص در سال ۱۳۹۷ در روش رائس به‌ترتیب ۰/۴۰۶ و ۰/۰۲۸ درصد و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۱/۳۴۲ و ۱/۹۹۰ درصد شد (شکل‌های ۷ تا ۹). در کارایی مصرف آب، شاخص توافق (d) و ضریب کارایی (EF) در روش تافته در سال ۱۳۹۷ به‌ترتیب ۰/۳۳۶ و ۰/۱۴۶ درصد و در سال ۱۳۹۸ به‌ترتیب ۱/۲۷۶ و ۱/۸۴۹ درصد بود. این شاخص‌ها در روش پاسکوئله در سال اول به‌ترتیب ۱/۴۱۱ و ۱۱/۳۹۰ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۱/۴۶۲ و ۹/۴۱۲ درصد را

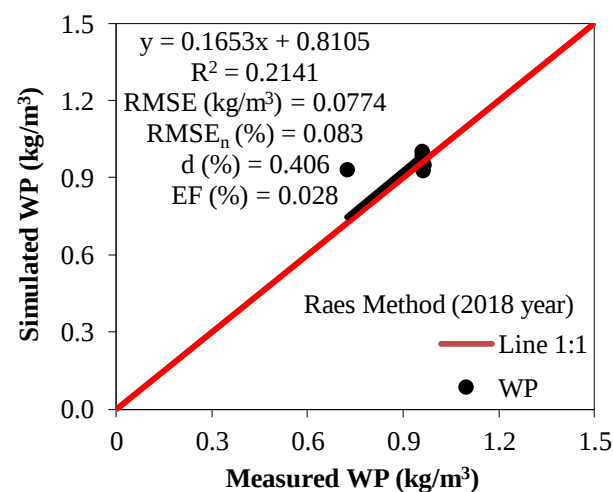
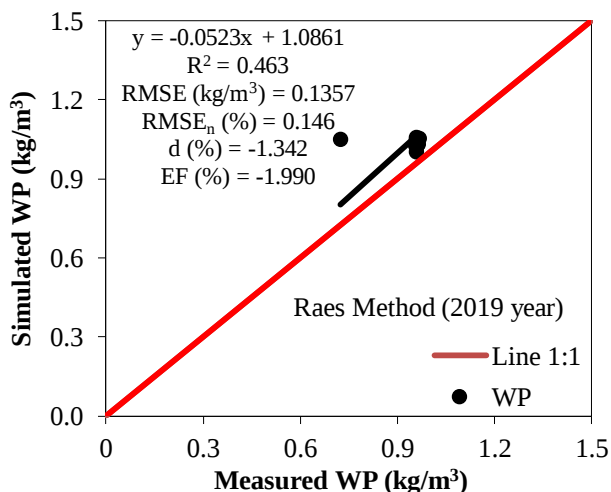
نشان داد. این دو شاخص در سال ۱۳۹۷ در روش رانس به ترتیب ۰/۳۲۱ و ۰/۱۴۵ درصد و در سال ۱۳۹۸ به ترتیب ۰/۹۷۹ و ۱/۵۴۷ درصد شد (شکل‌های ۱۰ تا ۱۲).



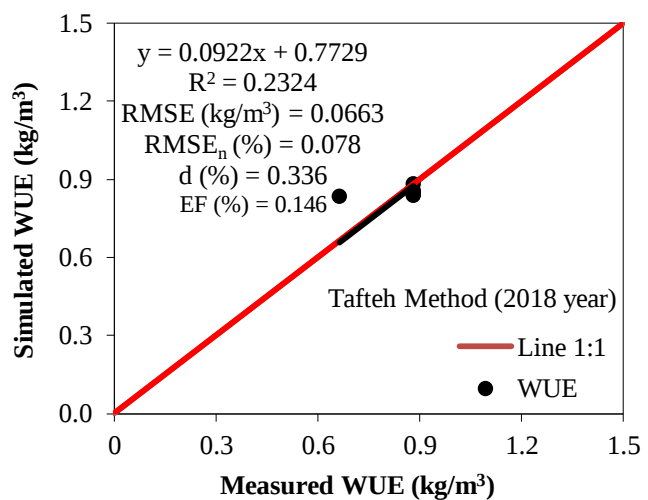
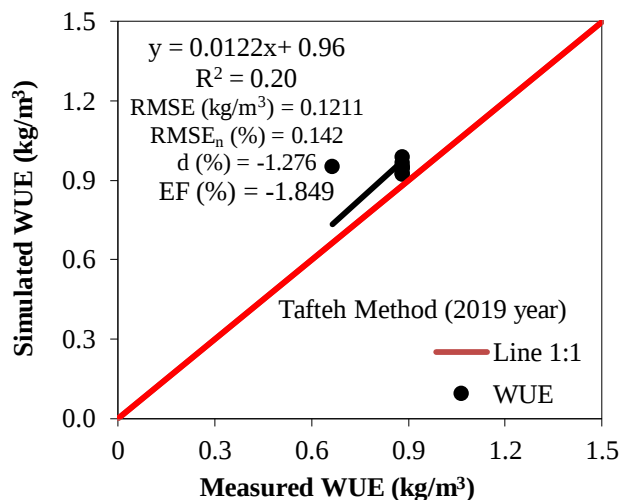
شکل ۷- مقایسه مقادیر بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش تافته در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



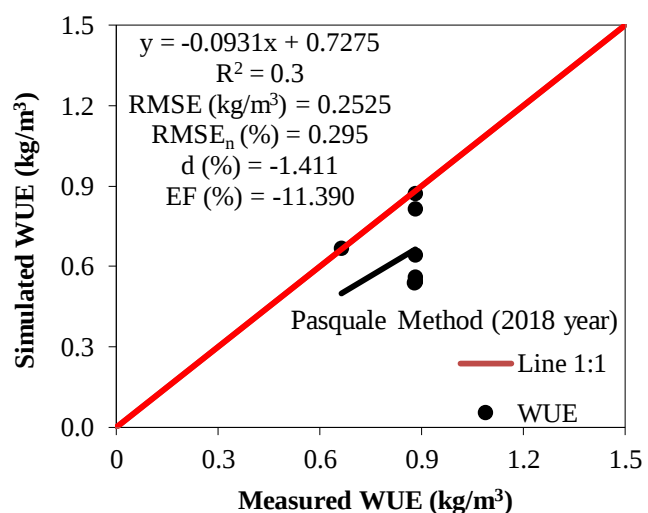
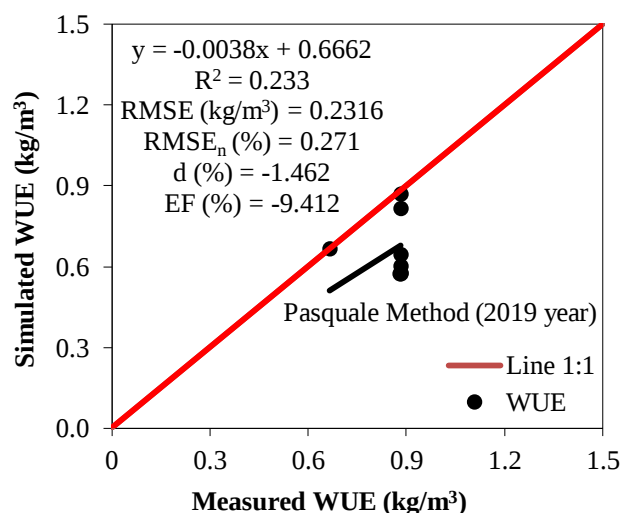
شکل ۸- مقایسه مقادیر بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش پاسکوئله در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



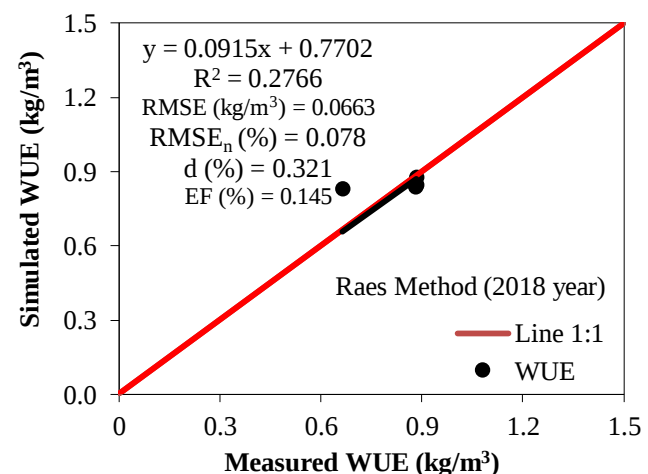
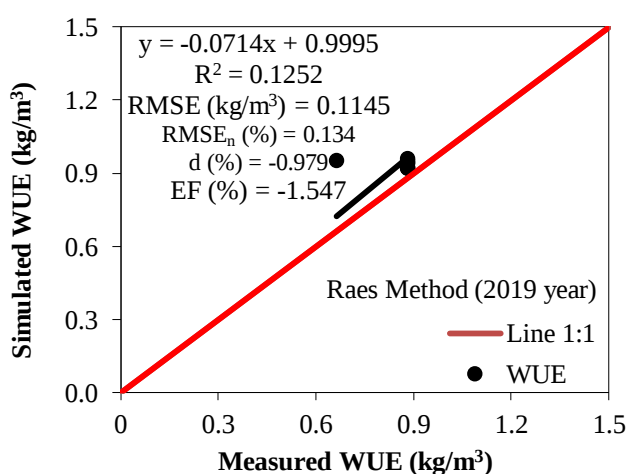
شکل ۹- مقایسه مقادیر بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش رانس در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش تافته در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه به روش پاسکوئله در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با سامانه در روش رائس در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸.

در پژوهشی دیگر، Abdzad Gohari et al. (2022) نیاز آبی رقم‌های مختلف گیاه بادام‌زمینی را در سامانه نیاز آب ارزیابی و گزارش نمودند که در تیمارهای نیاز آبی، مقدار ضریب تبیین در رقم‌های بادام‌زمینی بین ۰/۶۵ و ۰/۶۴، ریشه

میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۵۲/۶۰ و ۵۲/۲۴ میلی‌متر در روز و میانگین انحراف خطا بین ۱۵/۵۳ و ۱۵/۰۳ درصد متغیر بود و شاخص توافق مدل به ترتیب بین ۰/۹۵ و ۰/۹۸ درصد و ضریب کارایی بین ۹۵ و ۹۸ درصد قرار داشت که نشان دهنده برآورد مناسب مقدار واقعی آب آبیاری به وسیله سامانه نیاز آب بود. در یک پژوهش دیگر، Tafteh et al., (2018) از توابع حاصل ضرب اصلاح شده روش‌های رائس و تافته، میزان عملکرد گیاه کلزا را در شرایط کم‌آبیاری در بازه‌های ماهانه، مراحل چهارگانه رشد و کل دوره رشد ارزیابی و گزارش کردند که شاخص‌های آماری ریشه مربعات خطای نرمال شده ($RMSE_n$)، میزان شاخص توافق و ضریب تبیین به ترتیب ۲۱۱/درصد، ۰/۷۶ درصد و ۰/۶۴۵ بود. بررسی نتایج سامانه نیاز آب در تعیین نیاز آبی گیاه کینوا در شرایط استاندارد و در شرایط تنش کمبود آب نشان داد که سامانه در شرایط تنش کمبود آب دقت قابل‌قبولی دارد و گزینه‌های مختلف تنش کمبود آب در دوره‌های مختلف رشد را به خوبی تخمین می‌زند (Tafteh & Emdad, 2021). در مطالعه‌ای دیگر، Ebrahimipak et al. (2022a) نتایج اندازه‌گیری مزرعه‌ای مقدار آب آبیاری و عملکرد گندم در شرایط مدیریت کشاورزان، در سطح ۳۷ شهرستان در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ و مقایسه آن با برآورد مقدار آب آبیاری سامانه نیاز آب و تعیین بهره‌وری آب آبیاری گندم ارزیابی و گزارش کردند که میانگین مقدار آب آبیاری گندم در روش اندازه‌گیری شده و سامانه نیاز آب به ترتیب برابر با ۶/۵۷۳ و ۲/۵۹۷ متر مکعب بر هکتار بود و میانگین عملکرد گندم در روش اندازه‌گیری مزرعه و سامانه نیاز آب به ترتیب برابر با ۵/۵۲۲ و ۶/۴۹۵ کیلوگرم بر هکتار و بهره‌وری آب گندم در روش اندازه‌گیری مزرعه و سامانه نیاز آب برابر ۱ و ۹/۰ کیلوگرم بر متر مکعب شد. همچنین، نتایج آنان نشان داد که سامانه نیاز آب با ریشه میانگین خطای نرمال ۱۹ درصد و ضریب توافق ۹۳ درصد، مقدار آب آبیاری گندم را در مقیاس شهرستان برآورد می‌نماید و محصول دانه گندم با ریشه میانگین خطای نرمال ۱۷ درصد و ضریب توافق ۹۵ درصد و بهره‌وری آب گندم را با ریشه میانگین خطای نرمال ۲۴ درصد و ضریب توافق ۹۰ درصد برآورد می‌نماید و ضریب کارایی سامانه نیاز آب نشان داد که سامانه نتایج قابل‌قبولی در تعیین مقدار آب آبیاری و بهره‌وری آب گندم در سطح مزارع کشور برآورد می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

باتوجه به وقت‌گیر و پرهزینه بودن اندازه‌گیری آب و تبخیر-تعرق گیاه در سطح مزرعه، سامانه نیاز آب کشور برای محاسبه و برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در مناطق مختلف کشور می‌تواند ابزار مناسبی باشد. پژوهش حاضر با هدف برآورد آب مصرفی، بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب گیاه عدس در شرایط مزرعه‌ای و مقایسه آن با سامانه نیاز آب بر اساس حل معکوس تابع تولید انجام شد. نتایج نشان داد که خطای نسبی برای مقادیر آب مصرفی در شرایط مزرعه‌ای و برآورد شده با روش‌های تافته، پاسکوئله و رائس در سال اول به ترتیب ۳/۹، ۳۵/۱ و ۳/۴ درصد و در سال دوم به ترتیب ۱۱/۳، ۳۲/۶ و ۱۰/۲ درصد بود. میانگین تبخیر-تعرق در شرایط مزرعه‌ای و روش‌های تافته، پاسکوئله و رائس در سال ۱۳۹۷ به ترتیب ۲۴۳، ۲۴۱، ۳۱۴ و ۲۴۲ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۸ به ترتیب مقادیر ۲۱۷، ۱۹۴، ۲۷۴ و ۱۹۵ میلی‌متر بود. مقدار آب مصرفی و میزان تبخیر-تعرق در روش‌های تافته و رائس دارای ضریب تبیین مناسبی بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۵ بودند. خطای نسبی تبخیر-تعرق در سال اول بین ۰/۳ تا ۰/۷ درصد و در سال دوم بین ۸/۹ تا ۳۲/۱ درصد بود. باتوجه به نتایج آماری و برآورد مناسب بین داده‌های مزرعه‌ای و سامانه نیاز آب در تعیین مقدار واقعی آب آبیاری گیاه عدس، می‌توان از سامانه نیاز آب در تخمین آب مصرفی گیاه عدس استفاده نمود.

منابع مورد استفاده

References

- Abdzaad Gohari, A., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N.A. (2022). Investigation of water requirement system in determining the actual amount of irrigation water of peanut plant based on inverse solution of yield function under water stress conditions. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 16(3), 460-471. (in Persian with English abstract)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.3.1.2>
- Abdzaad Gohari, A., Tafteh, A., Ebrahimipak, N.A. & Babazadeh, H. (2021). Estimation of stress coefficients, plant coefficients and yield response to water in peanut under different levels irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2763-2774. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.331076.669083>
- Ahmadi, A., Amini Dehaghi, M., Fotokian, M.H., Sedghi, M., & Mansourifar, C. (2020). The effect of drought stress on antioxidant enzyme activity and chlorophyll content of some advanced genotypes of lentil (*Lens culinaris Medik*). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(4), 1105-1116. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.1712.1390>
- Amiri, S., Salimi, K., & Ziaei, M. (2021). The effect of deficit irrigation on yield and water use efficiency of lentil (*Lens culinaris Medik.*). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 75-83. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.2618.1683>
- Ebrahimipak, N. A., Tafteh, A., Abbasi, F., & Baghani, J. (2022a). Estimation of the actual amount of wheat irrigation water using the NIAZAB system and comparing with the farm measurement. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (9), 2075-2092. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346273.669328>
- Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Hosseini, N. & Kaykhaei, F. (2022b). Water Requirements System. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Iran. (<http://niwr.ir>). (in Persian with English abstract)
- Franca, P.N.O., Faria, R.T., Carrega, W.C., Coelho, A.P., Godoy, I.J., & Palaretti, L.F. (2021). Peanut (*Arachis hypogaea* L.) yield under irrigation levels in off-season cultivation. *Journal of the Faculty of Agricultural Sciences*, 53(1), 55-67.
<https://doi.org/10.48162/rev.39.006>
- Ghaderi, J., Fatehi, S., Akhyani, A., & Khalkhal, K. (2025). Evaluation of nutritional status of sugar beet plant by deviation from optimum percentage (DOP) method in Semnan province (Shahroud): Results of a two-year study. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 15-29. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22034/sps.2025.66086.1001>
- Hosseini, F.S., Nezami, A., Paesa, M. & Hajmohammadnia-Ghalibaf, K. (2011). Effects of supplementary irrigation on yield and yield components of lentil (*lens culinaris medik.*) cultivars in Mashhad climate. *Journal of water and soil*. 25(3), 625-633. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9697>
- 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, 337-350.
[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Kamali, B., Ramezani Etedali, H., & Sotoodehnia, A. (2016). Determining appropriate time for rainfed lentil sowing and supplementary irrigation in Qazvin's plain using AquaCrop model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5 (10), 613-621. (in Persian with English abstract)
https://idj.iaid.ir/article_55425.html
- Khazaei, H., Subedi, M., Nickerson, M., Martnez-Villaluenga, C., Frias, J., & Vandenberg, A. (2019). Seed protein of lentil: Current status, progress, and food applications. *Foods*, 8, 391.
<https://doi.org/10.3390/foods8090391>
- Mehraban, A. (2018). Evaluation of quality properties of lentil cultivars (*Lens culinaris* L.) in different sowing dates under rainfed condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 27(4), 107-119. (in Persian with English abstract)

- Nie, T., Tang, Y., Jiao, Y., Li, N., Wang, T., Du, C., Zhang, Z., Chen, P., Li, T., Sun, Z. & Zhu, S. (2022). Effects of Irrigation Schedules on Maize Yield and Water Use Efficiency under Future Climate Scenarios in Heilongjiang Province Based on the AquaCrop Model. *Agronomy*, 12, 810.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12040810>
- Raes, D. (2004). Budget: A soil water and salt balance model. Reference Manual. Version 6.0.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao T.C. & Fereres, E. (2017). Reference manual Aqua Crop, FAO, Land and Water Division, Rome. Italy.
- Sadeghi, S.M. & Abdzad Gohari, A. (2023). Investigating irrigation management in different stages of growth on the yield and yield components of lentils under different levels of iron nano-chelate in deylaman region. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 12 (4), 101-111. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.30495/wsrcj.2023.69377.11323>
- Salkhourri Ghiathund, S., Sharifi, P. & Amin Panah, H. (2018). The effect of nitrogen amount and foliar application of iron sulfate on yield and yield components of lentil under dry conditions. *Applied Research of Plant Ecophysiology*, 5(2), 113-133. (in Persian with English abstract)
<https://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-331-fa.html>
- Saremi, M., Farhadi, B., Maleki, A., & Farasati, M. (2015). Determination the crop coefficient and water requirement of lentil, using water balance method (Case study: Khorram Abad). *Iranian Journal of Pulses Research*, 6(2), 87-98. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ijpr.v1394i2.38241>
- Tafteh, A. & Emdad, M. (2021). Determination of crop yield response factor (K_y) in deficit irrigation management at different stages of quinoa plant growth. *Water Management in Agriculture*, 8(2), 101-116. (in Persian with English abstract)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764531.1400.8.2.9.5>
- Tafteh, A., Babazadeh, H., Ebrahimipak, N.A. & Kaveh, F. (2014a). Optimization of irrigation water distribution using the MGA method and comparison with a linear programming method. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 590-598.
<https://doi.org/10.1002/ird.1869>
- Tafteh, A., Ebrahimipak, N. A., Babazadeh, H. & Kaveh, F. (2013). Evaluation of improvement of crop production functions for simulation winter wheat yields with two types of yield response factors. *Journal of Agricultural Science*, 5, 111-122. (in Persian with English abstract)
doi: 10.5539/jas.v5n3p111
- Tafteh, A., Ebrahimipak, N.A., Babazadeh, H. & Kaveh, F. (2014b). Determine yield response factors of important crops by different production functions in Qazvin plain. *Ecology, Environment and Conservation*, 20(2), 415-422.
<https://www.envirobiotechjournals.com>
- Tafteh, A., Egdernezhad, A., & Ebrahimipak, N.A. (2018). Evaluation of production functions to estimate rapeseed yield in different Interval times. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3(7), 103-112. (in Persian with English abstract)
<https://sanad.iau.ir/Journal/wsrcj/Article/828896>
- Vafaei, M.H., Parsa, M., Nezami, A. & Ganjeali, A. (2019). Screening for drought tolerance in lentil genotypes (*Lens culinaris Medik*) with emphasis on comparing old and new indices of stress tolerance in order to introduce promising genotypes. *Iranian Journal of Pulses Research*, 10(2), 204-218. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ijpr.v10i2.70269>
- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3c1309:scoteo%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3c1309:scoteo%3e2.0.co;2)