



Analysis of the effects of conventional and partial root-zone irrigation treatments on maize yield using the SALTMed model under drip-tape irrigation

Behzad Azadegan¹ | Mahmoud Mashal² | Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh³ |
Maryam Varavipour⁴ | Maryam Tavakkoli⁵

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: bazad@ut.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sehashemi@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mvaravi@ut.ac.ir
5. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mobina.tavakkoli@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 2 June 2025
Received in revised form
3 July 2025
Accepted 10 September 2025
Published online 10 December 2025

Keywords:

Deficit irrigation
Partial root drying
Yield
Maize
Modeling

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the effects of conventional irrigation (DI) and partial root-zone drying (PRD) treatments using drip-tape irrigation on the yield of grain maize (hybrid single cross 704), through simulation with the SALTMed model. The experiment was conducted with six irrigation treatments (three levels of 100%, 75%, and 55% of crop water requirement), each replicated three times, at the research farm of the Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran. The field experiment followed a split-plot design based on a randomized complete block design and was conducted in Pakdasht City. Results under conventional irrigation showed measured yields of 11.86, 9.80, and 6.12 t/ha for the 100%, 75%, and 55% water requirement levels, respectively. The corresponding model-simulated yields were 11.71, 10.08, and 6.11 t/ha. The statistical indices NRSME were 8.75%, 11.2%, and 12.34%, RMSE were 0.55, 0.52, and 0.34 t/ha, and R^2 was 0.99. Under PRD treatments, measured yields were 10.10, 8.34, and 5.73 t/ha, while the simulated yields were 10.65, 8.56, and 5.65 t/ha, respectively. The NRSME values were 14.04%, 10.63%, and 9.48%, RMSE were 0.74, 0.39, and 0.27 t/ha, and R^2 was 0.98. No significant differences were observed between the measured and model-estimated values. The SALTMed model demonstrated good accuracy in predicting maize grain yield, optimizing water consumption, and enhancing irrigation management, particularly for deficit irrigation practices in arid climates.

Cite this article: Azadegan, B., Mashal, M., Hashemi Garmdareh, S. E., Varavipour, M., & Tavakkoli, M. (2025). Analysis of the effects of conventional and partial root-zone irrigation treatments on maize yield using the SALTMed model under drip-tape irrigation. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 509-524. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.396539.1237>





تحلیل اثر تیمارهای آبیاری متعارف و بخشی ریشه بر عملکرد ذرت با استفاده از مدل SALTMED در آبیاری قطره‌ای - تیپ

بهزاد آزادگان^۱ | محمود مشعل^۲ | سید ابراهیم هاشمی گرم‌دره^۳ | مریم وراوی پور^۴ | مریم توکلی^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sehashemi@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mvaravi@ut.ac.ir

۵. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mobina.tavakoli@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف این مطالعه، تحلیل اثر تیمارهای آبیاری متعارف (DI) و آبیاری بخشی ریشه (PRD) به روش قطره‌ای - تیپ، بر عملکرد ذرت دانه‌ای، رقم سینگل کراس ۷۰۴، با استفاده از شبیه‌سازی مدل SALTMED، با شش تیمار مقدار آب آبیاری (سه سطح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تکرار در مزرعه، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران می‌باشد. آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده در پایه بلوک‌های کامل تصادفی، در شهرستان پاکدشت، اجرا شد. نتایج داده‌ها در تیمارهای آبیاری متعارف، نشان داد: در سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی، عملکرد اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۱/۸۶، ۹/۸۰ و ۶/۱۲ و عملکرد برآوردی از مدل به ترتیب ۱۱/۷۱، ۱۰/۰۸ و ۶/۱۱ تن بر هکتار، است، آماره‌های NRSME، به ترتیب ۸/۷۵، ۱۱/۲ و ۱۲/۳۴ درصد، RMSE، به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۵۲ و ۰/۳۴ تن بر هکتار و R^2 ، ۰/۹۹ بود. در تیمارهای آبیاری بخشی ریشه، با سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی، عملکرد اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۰/۱۰، ۸/۳۴ و ۵/۷۳ و عملکرد برآوردی از مدل به ترتیب ۱۰/۶۵، ۸/۵۶ و ۵/۶۵ تن بر هکتار می‌باشد، آماره‌های NRSME، به ترتیب ۱۴/۰۴، ۱۰/۶۳ و ۹/۴۸ درصد، RMSE، به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۳۹ و ۰/۲۷ تن بر هکتار و R^2 ، ۰/۹۸ می‌باشد. مقایسه نتایج بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآوردی از مدل، اختلاف معنی‌داری نداشته است. مدل SALTMED، دقت خوبی، برای پیش‌بینی، عملکرد دانه ذرت، کاهش مصرف آب و بهبود مدیریت آبیاری، به‌ویژه روش کم‌آبیاری در اقلیم خشک دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹	
کلیدواژه‌ها:	
آبیاری بخشی ریشه	
ذرت	
کم‌آبیاری	
عملکرد	
مدل	

استناد: آزادگان، بهزاد؛ مشعل، محمود؛ هاشمی گرم‌دره، سید ابراهیم؛ وراوی پور، مریم و توکلی، مریم (۱۴۰۴). تحلیل اثر تیمارهای آبیاری متعارف و بخشی ریشه بر

عملکرد ذرت با استفاده از مدل SALTMED در آبیاری قطره‌ای - تیپ. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۳)، ۵۰۹-۵۲۴.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.396539.1237>



۱. مقدمه

کم آبیاری یکی از راه کارهای بهینه سازی مصرف آب و کاهش تنش خشکی است. می توان از مدل SALTMED، برای شبیه سازی رطوبت لایه های خاک، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی استفاده نمود (Cardon et al., 1992). شبیه سازی عملکرد ذرت تحت دو تیمار کم آبیاری و کاربرد سوپر جاذب با مدل های SALTMED و AquaCrop ارزیابی شد، کارایی هر دو مدل در شبیه سازی عملکرد ذرت در تیمارها، قابل قبول بوده است (Ebrahimipak et al., 2016). بهره وری مصرف آب با حداقل ورودی آب به اراضی کشاورزی، روشی برای حفظ منابع آب و خاک، نیازهای رو به رشد گیاهان زراعی است (Mohammed et al., 2023). آبیاری قطره ای، نیاز آبی عمده محصولات زراعی را با توزیع یکنواخت و مکرر آب، با استفاده از قطره چکان های کم فشار، تأمین نموده و برای انواع مختلف خاک و توپوگرافی مناسب است (Nasrollahi et al., 2016). در پژوهش کم آبیاری، آب کمتر از آبیاری کامل در طی دوره رشد به گیاه ذرت داده می شود، اما در یک سطحی بهینه از کم آبیاری، بیشترین عملکرد محصول به ازای آب مصرفی برداشت می شود، بهره وری آب در این سطح بیشترین مقدار را دارد (Kouhi-Chelekaran et al., 2015). در مطالعه ای اثر کم آبیاری در آبیاری قطره ای بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد، با اعمال کم آبیاری ۷۵ و ۵۵ درصد، به ترتیب، کاهش عملکرد ۲۵ و ۵۰ درصد بوده اما بیشترین کارایی مصرف آب زیست توده، ۳/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی، برای تیمار ۷۵ درصد آبیاری قطره ای به دست آمد (Tabatabaei et al., 2020; Amerian et al., 2021). نتایج پژوهشی نشان داد، در شرایط کاهش ۱۰ درصد در مصرف آب، نسبت به آبیاری کامل، بیشترین درآمد خالص نصیب کشاورز می شود (Mashal et al., 2009). در پژوهشی، تیمار کم آبیاری در سطح ۷۵ درصد بر روی گیاه شببو، باعث افزایش معنی دار کارایی مصرف آب، در سطح یک درصد گردید (Azadegan et al., 2022). در پژوهشی، کم آبیاری با کاربرد خاکپوش، علاوه بر ۲۸ درصد مصرف کمتر آب، عملکرد محصول در مقایسه با خاک معمولی ۱۹ درصد بیش تر شده و بهره وری آب ۵۰ درصد افزایش یافت (Ahmad et al., 2020). یکی از روش های کم آبیاری و کاهش مصرف آب، آبیاری بخشی ریشه (PRD) است که می تواند کارایی مصرف آب را بدون کاهش مشخصی در عملکرد گیاه، بهبود بخشد (Yazar et al., 2009; Ragab et al., 2005). آبیاری بخشی ریشه (PRD) برای اولین بار در کشور استرالیا، مطرح شد و هدف آن، کنترل رشد اضافی ساقه گیاه انگور بوده است (Dry et al., 2018). در روش، آبیاری بخشی ریشه، به طور متناوب، نیمی از ریشه خشک نگه داشته می شود و نیمه دیگر آن مرطوب، می باشد که در محصولات ردیفی ذرت، انگور، درختان میوه، فلفل و سیب زمینی استفاده شده است (Cheraghizade et al., 2018). در آبیاری بخشی ریشه (PRD)، در قسمتی از ریشه که آبیاری به صورت کامل، اعمال می شود، گیاه آب کافی جذب می نماید، رشدونمو عادی دارد و تغییری در مقدار فتوسنتز رخ نمی دهد. بخش دیگر ریشه که در خاک خشک است، با عکس العمل نسبت به خشکی و فرستادن علایمی از ریشه به روزنه ها، میزان باز شدن آن ها را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش تلفات آب می شود (Karandish and Šimunek, 2019; Davies and Zhang, 1991). بررسی نتایج روش آبیاری قطره ای و سطحی با آب لب شور بر گیاه گندم و ذرت، نشان داد که حجم آب کاربردی در آبیاری قطره ای، برای کشت های ذرت و گندم به ترتیب ۲۴ و ۳۲ درصد نسبت به آبیاری سطحی کمتر بوده اما بهره وری آب، عملکرد علوفه ای و دانه ای ذرت به ترتیب، ۱۶ و ۲۱ درصد و برای گندم ۳۵ درصد، بیش تر بوده است (Mokhtaran et al., 2021). در مطالعه ای در چین، تأثیر سطوح مختلف آبی را بر عملکرد دانه و ماده خشک ذرت، با روش آبیاری قطره ای با سه سطح ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، بررسی کردند، سطح آبی ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب عملکرد دانه را ۱۹/۴ و ۳۳ درصد و عملکرد ماده خشک را ۸ و ۱۴/۷ درصد نسبت به سطح آبی ۶۰ درصد، افزایش داد (Guo et al., 2022). مدل SALTMED یک مدل ریاضی است که برای تخمین رطوبت خاک، عملکرد و زیست توده خشک گیاه کاربرد دارد (Wang et al., 2012). مدل SALTMED به منظور مدیریت یکپارچه آب در مزرعه، برای سیستم های مختلف آبیاری،

محصول، خاک و کیفیت آب آبیاری، توسعه پیدا کرده است (Fghire et al., 2015; Ragab, 2002). پژوهش‌گران، در مطالعه‌ای تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و کم‌آبیاری بخشی ریشه (PRD) بر رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد و بهره‌وری آب ذرت کشت‌شده در خاک ماسه‌ای در مصر را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عملکرد به‌دست آمده تحت RDI نسبتاً بیش‌تر از عملکرد تحت PRD بود، احتمالاً به‌دلیل نفوذپذیری زیاد در خاک شنی است چون تیمار PRD، آبیاری کم‌تری دریافت کرده و حجم خاک مرطوب در محدوده ریشه و در زیر منطقه ریشه کم‌تر، از بین رفته است (Abdelraouf and Ragab, 2018). مدل SALTMED، توانست رطوبت خاک را برای همه لایه‌ها به‌خوبی پیش‌بینی کند، تجزیه و تحلیل همبستگی بین عملکرد دانه ذرت با مقادیر شبیه‌سازی، نشان داد این مدل با ضریب تعیین (R^2) ۹۸ درصد برای تیمارها قادر به شبیه‌سازی عملکرد دانه بوده است (Razzaghi and Ghannadi, 2016). پژوهشی با هدف ارزیابی کارایی مدل SALTMED در شبیه‌سازی عملکرد و توزیع رطوبت اعماق خاک، تحت کشت ذرت و گندم و آبیاری با آب لب‌شور انجام گردید، با افزایش شوری آب آبیاری، دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر رطوبت خاک افزایش یافت چون در شوری‌های بالاتر به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌گردد (Khalvandi et al., 2022; Kamali et al., 2017). در مطالعه‌ای، برنامه‌ریزی آبیاری خودکار و مدیریت آبیاری بر رشد، عملکرد و بهره‌وری آب خیار در شرایط گلخانه بررسی گردید. از دو روش مختلف برای کنترل زمان‌بندی آبیاری (کنترل دستی و کنترل خودکار) در قطعه‌های اصلی و سه تیمار کم‌آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد و آبیاری کامل استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از کنترل خودکار برنامه آبیاری باعث بهبود بهره‌وری و خصوصیات کیفی محصول خیار می‌شود چون شرایط مناسبی را برای ریشه گیاهان، ایجاد کرد که تحت کم‌ترین تنش آبی، قرار دارند لذا مدل SALTMED، با شبیه‌سازی تمام معیارهای ارزیابی برای محتوای رطوبت خاک، جذب ازت، عملکرد و بهره‌وری آب خیار برای تیمارها برای دو فصل رشد به‌خوبی عمل کرد (Yaser, 2024; Ramadan et al., 2020). در مطالعه‌ای، اثر سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و میزان آبیاری، ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ درصد را، برای ارزیابی مدل SALTMED، در شبیه‌سازی رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد محصول لوبیا، در مصر بررسی کردند، نتایج نشان داد مدل با دقت خوبی بهره‌وری آب در هر دو روش آبیاری را شبیه‌سازی نموده است (Dewedar et al., 2020). مدل SALTMED، را برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تولید محصولات، بهره‌وری آب و رشد محصولات تحت سناریوهای مختلف خاک، آب، و اقلیم می‌توان استفاده کرد (Boozar et al., 2024). پژوهشی، با دو آزمایش بر روی نخودفرنگی، تحت دو برنامه آبیاری بررسی گردید، برنامه‌ریزی آبیاری با کاهش ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه، باعث افزایش کارایی محصول و بهره‌وری آب، شد زیرا فواصل کم‌آبیاری تحت آبیاری با ۳۰ درصد تخلیه ظرفیت مزرعه باعث ایجاد توزیع یکنواخت‌تر آب در طول دوره رشد محصول می‌شود. نتایج پژوهشی، نشان داد که مدل SALTMED ابزاری مناسب برای پیش‌بینی پارامترهای محصول برای ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری، است (Marwa et al., 2020). مطالعات مختلف، کارایی مدل SALTMED، را در شرایط مزرعه نشان داده است (Alkhasha et al., 2019). هدف این پژوهش، ارزیابی مدل SALTMED، با اعمال تیمارهای آبیاری متعارف و بخشی ریشه، با سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی گیاه ذرت، در شهرستان پاکدشت (استان تهران) با اقلیم خشک می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مزرعه دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، واقع در شهرستان پاکدشت، با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۰۲۷ متر از سطح دریا اجرا گردید. این شهرستان دارای آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک، متوسط بارش سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط ۱۵/۶ سانتی‌گراد، تبخیر و تعرق ۱۳۹۰

میلی‌متر در طبقه‌بندی اقلیمی دوما رتن، جزو مناطق خشک می‌باشد. قبل از اجرای طرح، در چند نقطه مختلف نمونه‌برداری خاک از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متر انجام شد. با انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی و انجام آزمایش‌ها، برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها تعیین گردید. نتایج تجزیه در جدول (۱) ارائه شده است.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of the soil in the field

Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture	pH	EC _e (ds/m)	O.C. (%)	N (%)	ρ _b (gr/cm ³)	Porosity (%)
0-20	33	50	17	S.L	7.6	1.5	0.07	0.11	1.45	40
20-40	33	50	17	S. L	7.5	1.4	0.28	0.14	1.44	42
40-60	42	42	15	Loam	7.5	1.3	0.19	0.12	1.42	47

۲.۲. گیاه مورد مطالعه

ذرت سینگل کراس رقم ۷۰۴، بوده که در طی مرحله رویشی تحمل نسبی در مقابل تنش آب دارد اما در دوره تشکیل گل‌آذین نر، خروج ابریشم‌ها و گرده‌افشانی حساس است (Tabatabaei et al., 2019). آزمایش، در قالب طرح کرت‌های خردشده در پایه بلوک‌های کامل تصادفی، با شش تیمار در سه تکرار با انجام کشت در دو فصل زراعی در سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲، براساس نقشه طرح و مشخصات زیر فاصله گیاه بر روی ردیف ۰/۲ متر، ابعاد هر کرت ۳×۳ متر (مساحت ۹ مترمربع)، در سه ردیف به فواصل ۰/۷۵ متر و فاصله هر بلوک ۱/۵ متر، اجرا شد (شکل ۱). آزمایش، شامل سه تیمار آبیاری متعارف با سطوح ۱۰۰ درصد (DI₁₀₀)، ۷۵ درصد (DI₇₅) و ۵۵ درصد (DI₅₅) نیاز آبی گیاه و سه تیمار آبیاری بخشی ریشه (PRD) با سطوح ۱۰۰ درصد (PRD₁₀₀)، ۷۵ درصد (PRD₇₅) و ۵۵ درصد (PRD₅₅) نیاز آبی گیاه است، هر تیمار دارای سه تکرار و در مجموع ۱۸ کرت می‌باشد.

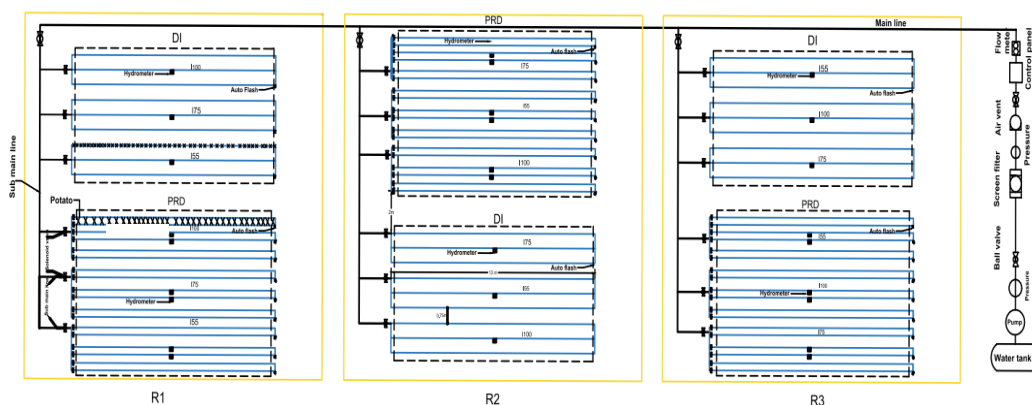


Figure 1. Schematic diagram of experimental design, DI and PRD irrigation treatments in field

۳.۲. عملیات تهیه زمین، کاشت ذرت و تیمارهای آبیاری

پس از عملیات آماده‌سازی زمین، شامل شخم و دیسک، کرت‌بندی انجام و بذرها به‌صورت دستی با فاصله ۰/۲ متر روی ردیف‌ها و عمق ۵ سانتی‌متر، در هر نقطه ۳-۴ بذر کاشته شد. پس از سبز شدن کامل و در مرحله ۷-۸ برگ، تنک‌سازی و حذف بوته‌های ضعیف انجام شد و در نهایت یک بوته در هر ۰/۲ متر باقی ماند. تراکم نهایی حدود ۶۵-۷۰ هزار بوته در هکتار بود. طول دوره رشد گیاه از کاشت تا رسیدن فیزیولوژیکی، ۱۲۰-۱۱۰ روز متغیر است. کود نیتروژن، براساس آزمون خاک قبل از کاشت، در دو مرحله (۵۰ درصد، مرحله ۷-۸ برگ و ۵۰ درصد، در مرحله گلدهی گیاه)، به خاک داده شد.

۲.۳.۱. مراحل انجام آبیاری

آبیاری در چهار مرحله رشدی گیاه اجرا شد؛ ۱- مرحله استقرار (۳۱ روز ابتدایی)، در این مدت کم آبیاری، اعمال نشد و آبیاری هر چهار روز یکبار انجام شد، ۲- مرحله رشد رویشی (۳۵ روز)، از پایان مرحله استقرار تا ظهور گل، تیمارهای آبیاری اجرا گردید، ۳- مرحله گلدهی تا پرشدن دانه (۲۸ روز)، انجام عملیات آبیاری به صورت یک روز در میان انجام شد، ۴- مرحله رسیدگی (۱۹ روز)، مجموع دوره رشد گیاه ۱۱۳ روز بوده است. از آغاز پرشدن دانه تا یک هفته پیش از برداشت، انجام آبیاری ادامه داشت. آب مصرفی براساس محاسبه نیاز آبی گیاه و روش‌های آبیاری متعارف و آبیاری قطره‌ای- تیپ (برای هر ردیف کشت، فاصله قطره‌چکان‌ها ۰/۲ متر با دبی دو لیتر بر ساعت)، اعمال شد. تا ۳۰ روز، تیمارها مقدار مساوی آب دریافت کردند. سپس تیمارهای کم آبیاری اعمال گردید.

۲.۳.۲. نمونه برداری گیاه در طول فصل رشد تا برداشت

۴۵ روز پس از زمان کاشت گیاه (دو هفته بعد از اولین اعمال تیمار)، به فاصله هر دو هفته از تیمارها نمونه برداری گردید. در هر دوره نمونه برداری با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای، سه بوته گیاه به صورت تصادفی انتخاب شد. برای تعیین عملکرد و اجزای عملکرد گیاه نمونه برداری از هر تیمار با رعایت حاشیه‌ها شامل ارتفاع بوته، قطر بوته، تعداد برگ، سطح برگ، شاخص سطح برگ، نسبت سطح برگ، وزن تر و وزن خشک برگ و ساقه، به مدت ۱۱۳ روز بعد از کاشت (رسیدن فیزیولوژیکی گیاه) انجام شد. سپس عملکرد دانه و زیست توده محصول ذرت، به روش‌های معمول اندازه گیری گردید.

۲.۴. محاسبه مقدار تبخیر و تعرق روزانه گیاه

برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، باید داده‌های هواشناسی مورد نیاز معادله پنمن-مانتیت-فائو، وارد نرم افزار (ET₀ Calculator) شود. نرم افزار قابلیت آن را دارد که در صورت فقدان برخی داده‌های هواشناسی، آن‌ها را با روابط تجربی پیش فرض، تخمین زده یا مقادیر پیش فرض خود را جایگزین آن‌ها کند. داده‌های هواشناسی مورد نیاز این نرم افزار، حداقل و حداکثر دما، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی، بوده است. تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) با استفاده از معادله پنمن-مانتیت، نشریه شماره ۵۶، فائو (Allen et al., 1998)، از رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$ET_0 = \frac{\frac{0}{408\Delta(R_n - G)} + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a) + \frac{0}{408\Delta(R_n - G)} + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{0}{34u_2}\right)} \Delta + \gamma (1 + 0/34u_2) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما در دمای میانگین (کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد)، R_n تشعشع خالص (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری (سانتی گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، γ ثابت سایکرومتریک (کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد)، G شار گرمای زمین (مگاژول بر مترمربع بر روز) و e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) می باشد. پس از محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET₀)، با اندازه گیری ضریب گیاهی (K_c)، در مراحل رشدی گیاه، مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه (ET) از رابطه (۲) محاسبه می شود.

۲.۵. معیارهای ارزیابی مدل

واسنجی و ارزیابی مدل SALT MED، با مقایسه نتایج حاصل داده‌های اندازه گیری بررسی گردید. برای مقایسه بین داده‌ها، از ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)،

استفاده شد (روابط ۳، ۴ و ۵)، که در این روابط، پارامترهای شاخص‌ها، عبارتند از p_i مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و $\bar{p}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده $\bar{O}$ و میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، n تعداد داده‌ها.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \right]^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۵}$$

۳. نتایج و بحث

ضریب گیاهی (K_C)، ضریب گیاهی پایه (K_{Cb})، راندمان فتوسنتز (PE) و شاخص برداشت (HI)، در مدت رشد گیاه بررسی شدند. مقادیر میانگین شاخص‌های گیاهی فوق‌الذکر، برای روش آبیاری متعارف در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Initial and Calibrated amount of crop coefficient for conventional irrigation method

Parameter	Growth stage	Kcb	Kc	HI	PE
Primary amount	Initial	0.2	0.4	0.6	2.25
	Intermediate	1	1.15		
	Final	0.9	1.1		
Calibrated amount	Initial	0.2	0.4	0.47	2.80
	Intermediate	1	1.15		
	Final	0.9	1.1		

۳.۱. روش‌های آبیاری

۳.۱.۱. روش آبیاری متعارف

آماره‌های ارزیابی و نتایج داده‌های آبیاری متعارف و آبیاری بخشی ریشه، با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآورده‌شده، عملکرد دانه ذرت و زیست‌توده محصول، محاسبه و با مدل SALTMed، واسنجی شد. مقادیر عملکرد و زیست‌توده محصول ذرت، در مدت زمان‌های ۴۵، ۶۰، ۷۳، ۸۷ و ۱۱۳ روز پس از کاشت، برای تیمارهای سطوح نیاز آبی به‌روش آبیاری متعارف اندازه‌گیری و محاسبه گردید. آماره‌ها، از روابط (۳)، (۴) و (۵) محاسبه گردید (جدول ۴). اگر مقدار $NRMSE < 10\%$ باشد، شبیه‌سازی مدل عالی، $NRMSE < 10-20\%$ شبیه‌سازی مدل خوب، $NRMSE < 20-30\%$ شبیه‌سازی مدل متوسط و $NRMSE > 30\%$ شبیه‌سازی مدل ضعیف، می‌باشد (Jamieson et al., 1991). مقادیر عملکرد دانه ذرت و زیست‌توده، اندازه‌گیری‌شده و برآوردی (تن بر هکتار) برای تیمارهای آبیاری متعارف (DI) در جدول (۳) ارائه شده است.

Table 3. Comparison of measured and estimated treatments yield and biomass in Maize (ton. ha⁻¹)

Treatments	Planting days	Grain yield measured	Grain yield estimated	Biomass measured	Biomass estimated
DI ₁₀₀	45	0.81	1.16	11.87	9.20
	60	3.68	2.73	14.99	14.17
	73	5.03	4.35	20.91	18.82
	87	9.95	9.96	22.92	22.37
	113	11.86	11.71	24.33	27.05
DI ₇₅	45	0.22	1.14	7.23	8.72
	60	2.50	2.71	9.76	11.93
	73	4.29	4.34	12.75	14.20
	87	6.78	7.42	13.83	14.40
	113	9.80	10.08	14.87	13.10
DI ₅₅	45	0.14	0.84	7.41	8.08
	60	0.69	0.58	8.28	8.17
	73	2.14	2.01	10.84	9.85
	87	4.82	5.07	12.14	11.16
	113	6.12	6.11	12.69	12.55

۳.۱.۲. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی (DI_{100})

در تیمار با سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی (DI_{100})، مقادیر عملکرد و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۱۱/۸۶، ۱۱/۷۱ و ۲۴/۳۳، ۲۷/۰۵ تن بر هکتار، می‌باشد (جدول ۳). آماره‌ها NRMSE، به ترتیب، ۸/۷۵ و ۱۰/۵۰ درصد، RMSE، به ترتیب، ۰/۵۵ و ۲ تن بر هکتار، R^2 به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۵، برای عملکرد و زیست‌توده محصول، برآورد گردید (جدول ۴). مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست‌توده، به ترتیب، عالی و خوب ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج پژوهش Nasrollahi et al. (2016) و Kamali et al. (2023) مطابقت دارد.

Table 4. The statistical parameters for treatments of conventional irrigation method in Maize

Irrigation treatment	Parameters	RMSE (ton. ha ⁻¹)	NRMSE (%)	R ²
(DI ₁₀₀)	Yield	0.55	8.75	0.99
	Biomass	2	10.50	0.95
(DI ₇₅)	Yield	0.52	11.12	0.99
	Biomass	1.58	13.52	0.78
(DI ₅₅)	Yield	0.34	12.34	0.98
	Biomass	0.69	6.75	0.93

۳.۱.۳. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI_{75})

در روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI_{75})، مقادیر عملکرد و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۹/۸۰، ۱۰/۰۸ و ۱۴/۸۷، ۱۳/۱۰ تن بر هکتار می‌باشد (جدول ۳). مقادیر آماره‌های عملکرد ذرت و زیست‌توده عبارتند از NRMSE به ترتیب، ۱۱/۱۲ و ۱۳/۵۲ درصد، RMSE، به ترتیب، ۰/۵۲ و ۱/۵۸ تن بر هکتار، R^2 برای عملکرد ذرت و زیست‌توده، به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۷۸، می‌باشد (جدول ۴). شبیه‌سازی مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست‌توده، به ترتیب، عالی و خوب ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج پژوهش Mohammed et al. (2023) و Nakhjavanimoghaddam et al. (2024) همخوانی دارد.

۳.۱.۴. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۵۵ درصد نیاز آبی (DI_{55})

در روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI_{55})، مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۶/۱۲، ۶/۱۱ و ۱۲/۶۹، ۱۲/۳۵ تن بر هکتار می‌باشد (جدول ۳). مقادیر آماره‌های عملکرد ذرت و زیست‌توده عبارتند از NRMSE، به ترتیب، ۱۲/۳۴ و ۶/۷۵ درصد، RMSE به ترتیب، ۰/۳۴ و ۰/۶۹ تن بر هکتار، (R^2) برای عملکرد دانه ذرت و زیست‌توده به ترتیب، ۰/۹۸ و ۰/۹۳، می‌باشد (جدول ۴). مدل SALTMED، برای عملکرد و زیست‌توده ذرت، به ترتیب، خوب و عالی، ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج پژوهش Mashal et al. (2009) همخوانی دارد.

۳.۲. روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)

ضریب گیاهی (K_C)، ضریب گیاهی پایه (K_{Cb})، راندمان فتوسنتز (PE) و شاخص برداشت (HI)، در مدت رشد گیاه اندازه‌گیری شدند. مقادیر میانگین شاخص‌های گیاهی فوق برای روش آبیاری بخشی ریشه در جدول (۵) ارائه شده است.

Table 5. Initial and calibrated amount of crop coefficient for PRD irrigation method

Parameter	Growth stage	K _b	K _c	HI	PE
Primary amount	Initial	0.2	0.4	0.6	2.25
	Intermediate	1	1.15		
	Final	0.9	1.1		
Calibrated amount	Initial	0.1	0.55	0.47	2.80
	Intermediate	0.8	1.11		
	Final	0.6	0.97		

مقادیر عملکرد و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی ذرت (تن بر هکتار)، برای تیمارهای آبیاری بخشی ریشه (PRD) در جدول (۶) درج شده است.

Table 6. Comparison of measured and estimated treatment PRD yield and biomass in Maize (ton. h⁻¹)

Treatment irrigation	Planting days	Grain yield measured	Grain yield estimated	Biomass measured	Biomass estimated
PRD ₁₀₀	45	0.57	0.74	11.27	12.53
	60	2.68	3.07	12.75	14.19
	73	4.73	4.37	14.56	16.22
	87	8.31	6.85	19.11	17.65
	113	10.10	10.65	20.74	22.52
PRD ₇₅	45	0.27	0.91	6.57	6.38
	60	1.44	1.60	7.31	6.75
	73	1.82	1.27	9.94	7.53
	87	6.39	6.34	12.38	10.94
	113	8.34	8.56	12.96	13.31
PRD ₅₅	45	0.23	0.78	6.55	7.98
	60	1.05	0.86	7.51	8.40
	73	2.12	2.19	9.37	8.40
	87	4.89	4.95	11.25	9.76
	113	5.73	5.65	12.00	11.05

۳.۲.۱. اعتبارسنجی مدل با آبیاری به روش PRD و سطح آبی ۱۰۰ درصد (PRD₁₀₀)

در روش آبیاری بخشی ریشه، برای سطح آبی ۱۰۰ درصد (PRD₁₀₀)، مقادیر عملکرد دانه و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۱۰/۱۰، ۱۰/۶۵ و ۲۰/۷۴، ۲۲/۵۲ تن بر هکتار، می باشد (جدول ۶). مقادیر آماره های عملکرد ذرت و زیست توده عبارتند از NRMSE، به ترتیب، ۱۴/۰۴ و ۹/۷۷ درصد، RMSE به ترتیب، ۰/۷۴ و ۱/۵۳ تن بر هکتار، (R²) عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب، ۰/۹۶ و ۸۹۰ می باشد (جدول ۷). شبیه سازی مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست توده به ترتیب، عالی و خوب ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با مطالعه Ahmad et al. (2020) مطابقت دارد.

۳.۲.۲. اعتبارسنجی مدل با آبیاری به روش PRD با سطح آبی ۷۵ درصد (PRD₇₅)

در روش آبیاری بخشی ریشه، برای سطح آبی ۷۵ درصد نیاز آبی (PRD₇₅)، مقادیر عملکرد دانه و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۸/۳۴، ۸/۵۶ و ۱۲/۹۶، ۱۳/۳۱ تن بر هکتار می باشد (جدول ۶). مقادیر آماره های عملکرد ذرت و زیست توده عبارتند از NRMSE به ترتیب، ۱۰/۶۳ و ۱۵/۱۳ درصد، RMSE به ترتیب، ۰/۳۹ و ۱/۲۹ تن بر هکتار با (R²) عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۸۷ است (جدول ۷). مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست توده، نسبتاً خوب و قابل قبول ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج پژوهش Wang et al. (2024) و Abdelraouf et al. (2018) مطابقت دارد.

Table 7. The statistical parameters for treatments of (PRD) irrigation method in Maize

Treatment	Parameter	RMSE (ton. ha ⁻¹)	NRMSE (%)	R ²
(PRD ₁₀₀)	Yield	0.74	14.04	0.96
	Biomass	1.53	9.77	0.89
(PRD ₇₅)	Yield	0.39	10.63	0.99
	Biomass	1.29	13.15	0.87
(PRD ₅₅)	Yield	0.27	9.48	0.99
	Biomass	1.18	12.59	0.83

۳.۲.۳. اعتبارسنجی مدل با آبیاری به روش PRD و سطح آبی ۵۵ درصد (PRD_{55})

در روش آبیاری بخشی ریشه، برای سطح آبی ۵۵ درصد نیاز آبی (PRD_{55})، مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآوردی به ترتیب ۵/۷۳، ۵/۶۵ و ۱۲/۰۰، ۱۱/۰۵ تن بر هکتار می‌باشد (جدول ۶). مقادیر آماره‌های عملکرد ذرت و زیست‌توده عبارتند از NRMSE به ترتیب ۹/۴۸ و ۱۲/۵۹ درصد، RMSE به ترتیب ۰/۲۷ و ۱/۱۸ تن بر هکتار، (R^2) عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۸۳ محاسبه شد (جدول ۷). مدل SALTMED در محدوده شبیه‌سازی عالی و خوب ارزیابی گردید. نتایج اعتبارسنجی با تیمار ۵۵ درصد (PRD_{55})، نشان داد که مدل به خوبی قابلیت شبیه‌سازی عملکرد ذرت در تیمار کم‌آبیاری PRD را دارد. نتایج این پژوهش، با نتایج پژوهش Wang et al. (2012) و Yazar et al. (2009) مطابقت دارد. با توجه به نتایج اعتبارسنجی و واسنجی مدل در روش‌های آبیاری متعارف و آبیاری بخشی ریشه با تیمارهای سطوح مختلف نیاز آبی گیاه، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SALTMED، توانایی با دقت نسبتاً خوبی، برای شبیه‌سازی تیمارها در روش‌های آبیاری موردبررسی را داشته است.

۳.۳. آب مصرفی آبیاری

مقدار روزانه و مقدار کل آبیاری (میلی‌متر) بر روی محورهای عمودی و دوره رشد گیاه ذرت دانه‌ای (روز) بر روی محور افقی نشان داده شده که حاصل از شبیه‌سازی مدل SALTMED، برای تیمار آبیاری کامل (DI_{100}) است (شکل ۲). براساس داده‌های هواشناسی، در شرایط اقلیم گرم و خشک منطقه پاکدشت، میانگین نیاز آبی ذرت علوفه‌ای، ۷۵۰۰-۵۵۰۰ مترمکعب در هکتار گزارش شده، نیاز آبی بستگی به روش آبیاری، دفعات آبیاری در مراحل رشدی گیاه، تاریخ کاشت، مدت دوره رشد ذرت، نوع خاک و اقلیم، دارد (Nakhjavanimoghaddam et al., 2024). با توجه به نمودار (۲)، مشاهده می‌شود که مقدار کل آب آبیاری، در پایان دوره شبیه‌سازی مدل SALTMED (۱۱۳ روز پس از کاشت ذرت دانه‌ای) برابر با ۹۰۰ میلی‌متر، است. مدل SALTMED، معمولاً میزان آبیاری را براساس سطح خیس‌شده اطراف قطره‌چکان‌ها محاسبه می‌کند، نه کل مساحت کرت. در صورتی که فرض شود مقدار ۹۰۰ میلی‌متر آب، مربوط به هر مترمربع از سطح خیس‌شده باشد، نیاز آبی معادل ۹۰۰ میلی‌متر بر مترمربع، خواهد بود که با مقادیر واقعی موردانتظار برای منطقه مورد مطالعه همخوانی دارد. این موضوع، بر اهمیت تفسیر صحیح خروجی‌های مدل و لحاظ کردن سطح مؤثر آبیاری، در تحلیل نتایج تأکید دارد.

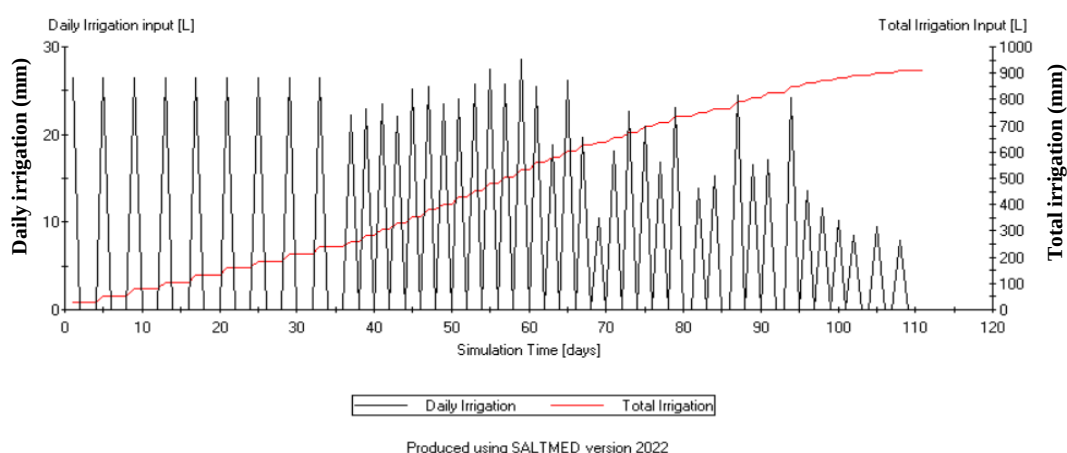


Figure 2. Daily and total water consumption (mm) for irrigation treatment (DI_{100}) during the grow period

نتایج حاصل از اجرای مدل SALTMED در این مطالعه، با محاسبه مقدار کل آب مصرفی برای تیمارهای مختلف، امکان مقایسه دقیق بین کارایی مصرف آب در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی را فراهم کرده است. شکل (۳)، روند تغییرات مقدار آب آبیاری (میلی متر بر مترمربع) را در سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی گیاه، طی دوره ۱۱۳ روز رشد ذرت، به صورت سه نمودار جداگانه نشان می دهد. محور افقی، زمان (روز) و محور عمودی، مقدار آب آبیاری (میلی متر بر مترمربع)، از صفر تا ۹۰۰ میلی متر بر مترمربع می باشد. با کاهش سطح تأمین نیاز آبی از ۱۰۰ به ۷۵ درصد و سپس ۵۵، مقدار کل آب مصرفی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. مدل SALTMED، توانسته است این تفاوت ها را به خوبی شبیه سازی کرده و نشان دهد که حتی در شرایط کم آبی، با مدیریت صحیح، مانند روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، می توان کارایی مصرف آب را افزایش داد، بدون این که عملکرد گیاه، به طور شدیدی کاهش یابد. این تحلیل، نقش مدل SALTMED را به عنوان ابزاری مهم، در برنامه ریزی آبیاری بهینه و تصمیم گیری مدیریت منابع آب تأیید می کند (Ragab et al., 2005).

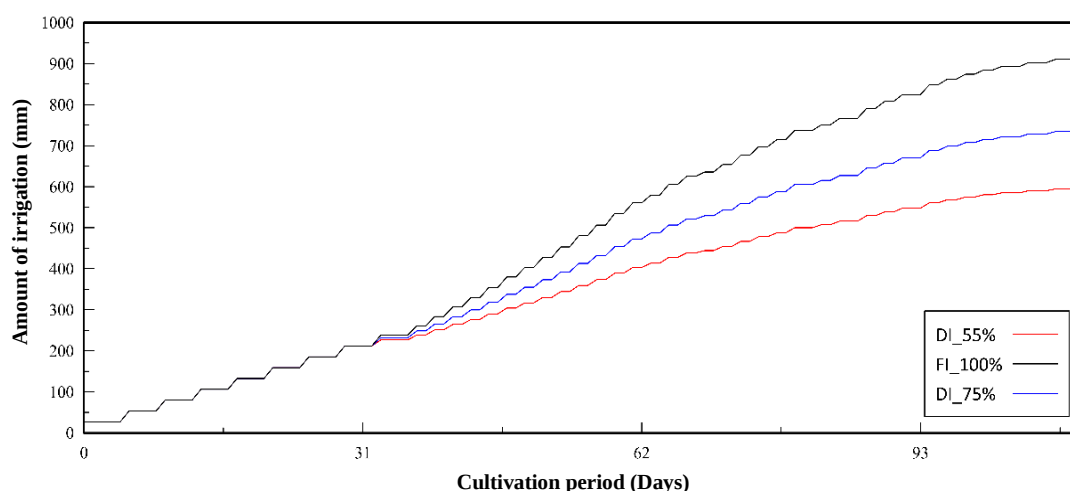


Figure 3. Amount of water irrigation (mm) in three treatments (100, 75 and 55%) Conventional irrigation method

۴.۳. نسبت تبخیر در تیمارهای مختلف

در این بخش از مطالعه، نسبت تبخیر واقعی (AE) به تبخیر پتانسیل (PE)، به عنوان شاخصی برای ارزیابی اتلاف آب از سطح خاک، در تیمارهای روش های آبیاری متعارف و آبیاری بخشی ریشه (PRD) بررسی گردید. در تیمارهای آبیاری متعارف، مقدار تبخیر پتانسیل، ۵۴۹ میلی متر در طول دوره کشت (۱۱۳ روز)، می باشد. در تیمارهای آبیاری ۱۰۰ درصد (FI₁₀₀)، ۷۵ درصد (DI₇₅) و ۵۵ درصد (DI₅₅) نیاز آبی، مقدار تبخیر سطحی واقعی (AE)، به ترتیب ۴۳، ۴۱ و ۳۹ لیتر در روز، برای مساحت ۹ مترمربع کرت محاسبه شده که با تبدیل واحد، مقادیر تبخیر واقعی (AE) به ترتیب ۴/۴۸، ۴/۵ و ۴/۳ میلی متر در روز می شود. مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE)، در تیمارهای آبیاری ۱۰۰ درصد (FI₁₀₀)، ۷۵ درصد (DI₇₅) و ۵۵ درصد (DI₅₅)، معادل ۰/۷۰، ۰/۹۵ و ۰/۵۰ می باشد (شکل ۴). با کاهش سطح آبیاری، مقدار تبخیر واقعی نیز کاهش یافته که بیانگر کاهش رطوبت سطحی خاک و در نتیجه کاهش اتلاف آب از طریق تبخیر است. نوسانات مشاهده شده در نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE)، به طور عمده ناشی از زمان بندی آبیاری بوده، چون در روزهای آبیاری تبخیر از سطح خاک

افزایش می‌یابد و با کاهش مقدار آب آبیاری، مقدار تبخیر از سطح خاک کاهش می‌یابد (Hsiao and Xu, 2000). در تیمارهای آبیاری بخشی ریشه (PRD)، مقدار تبخیر پتانسیل، ۴۱۲ میلی‌متر در طول دوره کشت (۱۱۲ روز) است. در تیمارهای ۱۰۰ درصد (PRD₁₀₀)، ۷۵ درصد (PRD₇₅) و ۵۵ درصد (PRD₅₅) نیاز آبی، مقدار تبخیر سطحی واقعی، به‌ترتیب ۱۹/۵۳، ۱۹/۴۸ و ۱۹/۳۴، لیتر در روز برای مساحت ۹ مترمربع کرت، محاسبه شده که با تبدیل واحد، مقادیر تبخیر واقعی (AE)، به‌ترتیب ۲/۱۷، ۲/۱۶ و ۲/۱۵ میلی‌متر در روز، می‌شود. مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE) برای تیمارهای فوق، ۰/۴۳، می‌باشد (شکل ۵). در روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، تفاوتی در مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE) بین تیمارها مشاهده نمی‌شود. این مقدار با شرایط اقلیمی منطقه در فصل رشد، کاملاً مطابقت دارد. کاهش سطح آبیاری، تأثیر خیلی جزئی، بر تبخیر واقعی از سطح خاک، به‌علت ماهیت متناوب خشک و مرطوب شدن خاک در روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، دارد. روش (PRD) با ایجاد فازهای خشک، تبخیر سطحی را در دوره رشد گیاه محدود می‌کند و می‌تواند در کاهش اتلاف آب از طریق تبخیر سطحی در شرایط کم‌آبی مؤثر باشد. یافته‌های این پژوهش، با مطالعه Marwa et al. (2020) مطابقت دارد.

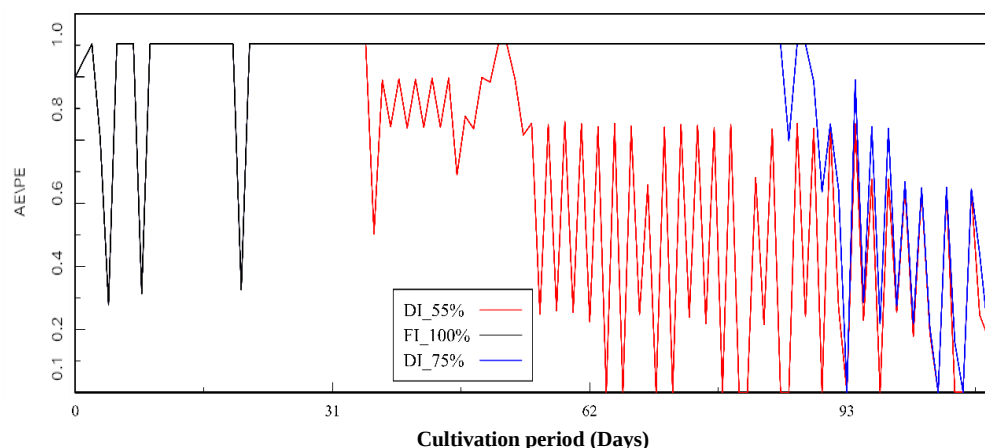


Figure 4. Ratio of Actual Evaporation to Potential Evaporation in Conventional irrigation method

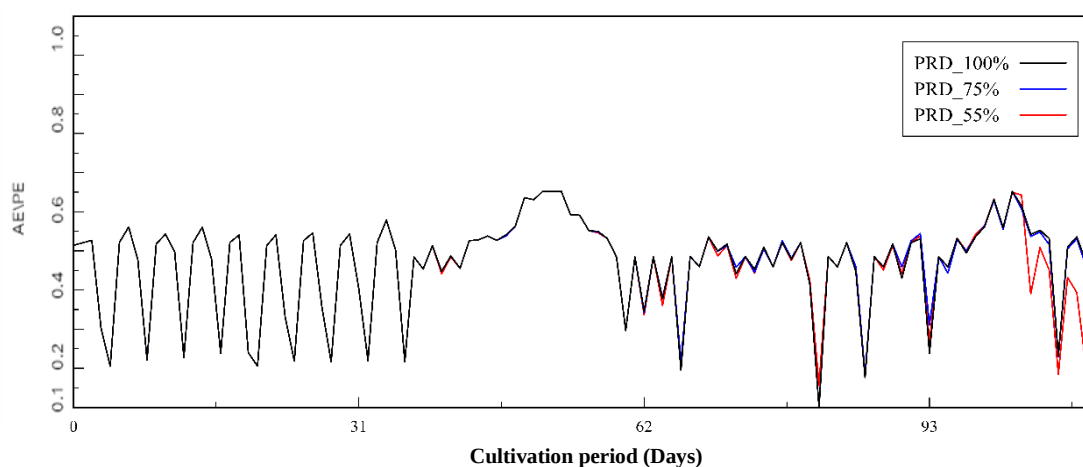


Figure 5. Ratio of Actual Evaporation to Potential Evaporation in PRD irrigation method

۵.۳. نسبت تعرق در تیمارهای مختلف

نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل (AT/PT)، معیاری کلیدی در سنجش میزان استفاده گیاه از آب و کارایی مصرف آب است. در آبیاری متعارف، نسبت تعرق واقعی (AT)، به تعرق پتانسیل (PT)، در تیمار ۱۰۰ درصد (DI_{100})، برابر یک است، چون آب موردنیاز تأمین شده و گیاه بدون تنش آبی رشد کرده است. با کاهش مقدار سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد به سطوح ۷۵ و ۵۵ درصد، مقدار تعرق واقعی، کاهش یافته و در تیمار (DI_{55})، نسبت به تیمار (DI_{75})، کاهش تعرق با شدت بیشتری مشاهده می‌شود (شکل ۶). افزایش تعرق پتانسیل (PT)، به دلیل بالا رفتن نیاز آبی گیاه در دوره گلدهی و رسیدگی دانه، باعث کاهش دسترسی به آب در خاک، کاهش جذب آب دریافتی از ریشه گیاه، در نتیجه، کاهش تعرق و افت عملکرد گیاه، می‌گردد. در روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، مقادیر نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE)، در تیمارهای مختلف آبیاری تفاوتی مشاهده نگردید (شکل ۷). در روش آبیاری PRD، بخشی از ریشه در ناحیه خشک قرار می‌گیرد که موجب کاهش رشد رویشی گیاه و تبخیر سطحی می‌شود. اما بخش دیگر ریشه در منطقه مرطوب می‌باشد که امکان تأمین نسبی نیاز تعرقی گیاه را، فراهم می‌سازد. گیاه با تنظیم فیزیولوژیکی، حتی در سطوح کم‌آبی، تعرق خود را در سطح پایدارتری، حفظ می‌کند که بستگی به ماهیت روش PRD دارد (Marouelli and Silva, 2007).

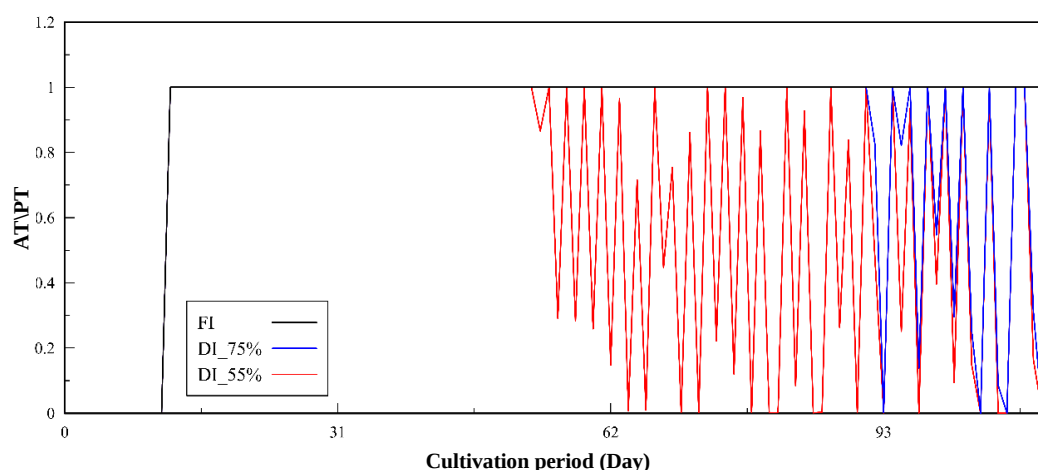


Figure 6. Ratio of actual transpiration to potential transpiration at cultivation period(Day) in irrigation

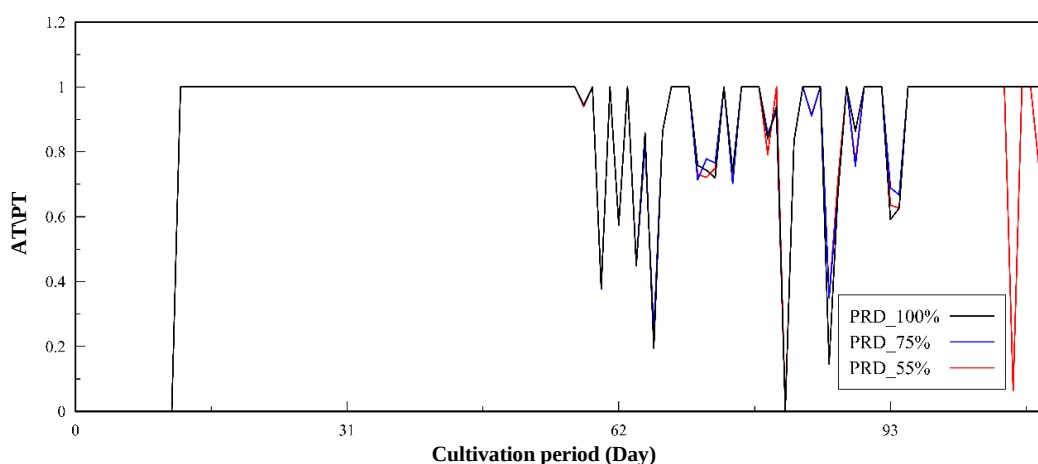


Figure 7. Ratio of Actual Transpiration to Potential Transpiration at cultivation(Day)in PRD irrigation method

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر تیمارها با سطوح مختلف نیاز آبی در آبیاری متعارف و بخشی ریشه با استفاده از مدل SALT MED و آبیاری قطره‌ای- تیپ بر عملکرد ذرت دانه‌ای، بررسی گردید. واسنجی مدل با محاسبه، آماره‌های R^2 ، RMSE و NRMSE و اعتبارسنجی آن با مقایسه نتایج داده‌های عملکرد اندازه‌گیری شده و برآوردی محصول، در آبیاری متعارف و بخشی ریشه نشان داد، مدل توانسته این تفاوت‌ها را به خوبی با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. با کاهش سطح نیاز آبی از ۱۰۰ به ۷۵ درصد و سپس ۵۵ درصد، مقدار کل آب مصرفی، به میزان قابل توجهی، کاهش یافت. در آبیاری متعارف نسبت تعرق واقعی (AT)، به تعرق پتانسیل (PT)، در تیمار (DI_{100})، برابر یک بوده و گیاه بدون تنش آبی رشد کرده است. با کاهش مقدار آبیاری سطوح ۷۵ و ۵۵ درصد، مقدار کاهش تعرق واقعی در تیمار (DI_{55}) نسبت به تیمار (DI_{75}) با شدت بیش‌تری مشاهده می‌شود. در تیمارهای مختلف روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، در مقادیر نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE\PE) تفاوتی مشاهده نگردید. کاهش ضرایب گیاهی در آبیاری بخشی ریشه، موجب افزایش تعرق نسبت به تبخیر گردید. مدل SALT MED دقت مطلوبی در شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهبود مدیریت آبیاری، به‌ویژه روش کم‌آبیاری در اقلیم خشک دارد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Full irrigation (FI)
2. Deficit irrigation (DI)
3. Partial Root Dry (PRD)
4. Aactual Evaporation (AE)
5. Potential Evaporation (PE)
6. Aactual Transpiration (AT)
7. Potential Transpiration (PT)
8. Conventional irrigation

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abdelraouf, R. E., & Ragab, R. (2018). Is the partial root drying irrigation method suitable for sandy soils? Field experiment and modelling using the SALT MED model. *Irrigation and Drainage*, 67(4), 477-490.
- Ahmad, S., Raza, M.A.S., Saleem, M.F., Zaheer, M.S., Iqbal, R., Haider, I., & Khan, I.H. (2020). Significance of partial root zone drying and mulches for water saving and weed suppression in wheat. *J. Anim. Plant. Sci.*, 30, 154-162.
- Alkhasha, A., & Al-Omran, A. (2019). Simulated tomato yield, soil moisture, and salinity using fresh and saline water: Experimental and modeling study using the SALT MED model. *Irrigation Science*, 37, 637-655.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: *FAO Irrigation and drainage*, paper No. 56. Food and Agriculture Organization.
- Amerian, M., Hashemi Garmdareh, S. E., & Karami, A. (2021). Effect of deficit drip irrigation on yield and water use efficiency of single cross corn 704. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(3), 247-258. (In Persian).
- Azadegan, B., Kouhestani, R., & Mashal, M. (2022). Effect of low irrigation and type of culture medium on water use efficiency and some morphological and physiological characteristics of the stock plant. *Journal of Crops Improvement*, 24(1), 115-122. (In Persian).

- Boozar, N., Egdernezhad, A., & Boroomand Nasab, S. (2024). Evaluation of the SALTMed model to simulate potato yield and water productivity under different irrigation water management in the Shahrekord. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 329-340.
- Chauhdary, J. N., Bakhsh, A., Ragab, R., Khaliq, A., Engel, B. A., Rizwan, M., Shahid, M. A., & Nawaz, Q. (2020). Modeling corn growth and root zone salinity dynamics to improve irrigation and fertigation management under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 230, 105986.
- Cheraghizade, M., Shahnazari, A., & Ziatabar Ahmadi, M. (2018). Evaluation of the effect of irrigation interval by conducting partial rootzone drying (PRD) deficit irrigation and full irrigation (FI) on sunflower plant. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 439-451. (In Persian).
- Davies, W. J., & Zhang, J. H. (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42, 55-76.
- Dewedar, O. M., Plauborg, F., Marwa, M. A., El-Shafie, A. F., & Ragab, R. (2020). Improving water saving, yield, and water productivity of beans under deficit drip irrigation: Field and modelling study using the SALTMed model. *Irrigation and Drainage*, 70 (2), 224-242.
- Dry, P. R., Loveys, B. R., & Düring, H. (2000). Partial drying of the rootzone of grape. I. Transient changes in shoot growth and gas exchange. *Journal of VITIS*, 39(1), 3-7.
- Fghire, R., Wahbi, S., Anaya, F., Issa Ali, O., Benlhabib, O., & Ragab, R. (2015). Response of quinoa to different water management strategies: Field experiments and SALTMed model application results. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 29-40.
- Guo, J., Fan, J., Xiang, Y., Zhang, F., Yan, S., Zhang, X., Zheng, J., Li, Y., Tang, Z., & Li, Z. (2022). Coupling effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer type on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-irrigated maize. *Agricultural Water Management*, 261, 107389. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107389>
- Hsiao, T. C., & Xu, L. K. (2000). Sensitivities of crop water productivity to changes in crop transpiration efficiency, irrigation, and soil evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1-2), 79-90.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), pp.337-350.
- Kamali, H. R., Abdollahipour, M & M. J., Nahvinia,. (2022). Evaluation of SALTMed model in estimation of wheat yield under deficit irrigation and salinity stress in arid areas (Case study: Birjand). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 815-837. (In Persian).
- Karandish, F., & Šimůnek, J. (2019). A comparison of the HYDRUS (2D/3D) and SALTMed models to investigate the influence of various water-saving irrigation strategies on the maize water footprint. *Journal of Agricultural Water Management*, 213, 809-820.
- Khalvandi, N., Mohammadi, A. S., & Nasab, S. B. (2017). Simulation of soil moisture distribution and maize yield under irrigation with saline water by SALTMed model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 231-246. (In Persian).
- Kouhi-Chelekaran, N., Alizadeh, A., & Davari, K. (2015). Effects of different irrigation amounts on corn (*Zea mays* L.) root length density and yield under drip irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 331-340. (In Persian).
- Marwa, M. A., El-Shafie, A. F., Dewedar, O. M., Molina-Martinez, J. M., & Ragab, R. (2020). Predicting the water requirement, soil moisture distribution, yield, water productivity of peas and impact of climate change using SALTMed model. *Plant Archives*, 20(1), 3673-3689.
- Marouelli, W. A., & Silva, W. L. C. (2007). Evapotranspiration and crop coefficients of sweet corn in central Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(6), 839-847.
- Mashal, M., Varavypour, M., Sadatnouri, S. A., & Zare, Z. E. (2009). Optimizing consumptive water depth for corn by deficit-irrigation (Case study: Varamin area). *Agricultural Research*, 8(4), 123-134. (In Persian).
- Mohammed, M. K., Hameed, K. A., & Musa, A. J. (2023). Water savings, yield, and economic benefits of using SRI methods with deficit irrigation in water-scarce southern Iraq. *Journal of Agronomy*, 13(6), 1481.
- Mokhtaran, A., Varjavand, P., Dehghanisanij, H., Absalan, S., Azizi, A., & Jafarnejadi, A. (2021). Comparison of drip irrigation with surface irrigation and monitoring soil salinity in wheat and corn irrigated with brackish water. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(3), 217-234.
- Nakhjavanimoghaddam, M. M., Nasser, A., & Abbasi, F. (2024). Water management indicators of irrigation systems in forage corn production Case study Agroclimatic conditions of Tehran and Alborz Provinces. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 18(1), 205-215.

- Nasrollahi, A., Boroomand Nasab, S., Hooshmand, A., & Heydarinia, M. (2016). Evaluation of the SALTMED model under different managements of drip irrigation with saline water. *Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 561-567. (In Persian).
- Ebrahimipak, N.A., Egdernezhad, A., Asadi Kapourchal, S., & Khodadadi Dehkordi, D. (2016) . Evaluation of SALTMED and AquaCrop models in simulating sweet maize yield under deficit irrigation and superabsorbent application. *Journal of Environmental Stresses in crop Sciences*, 13(4), 1105-1114. (In Persian).
- Ragab, R. (2002). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17(4), 345-361.
- Ragab, R., Malash, N., Gawad, G. A., Arslan, A., & Ghaibeh, A. (2005). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 1. The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78(1-2), 67-88.
- Ramadan, A., Ghanem, H. G., A Bukhari, N., & El-Zaidy, M. (2020). Field and Modeling Study on Manual and Automatic Irrigation Scheduling under Deficit Irrigation of Greenhouse Cucumber. *Sustainability*, 12(23), 9819.
- Razzaghi, F., & Ghannadi, T. (2016). Assessing SALTMED model for wheat experiments irrigated with basin and sprinkler. *Journal of Plan Production*, 10(2), 233-250. (In Persian).
- Tabatabaei, M. S., Gheysari, M., Abedi Kupae, J., & Amiri, Z. J. (2019). Interaction of water and nitrogen on yield and irrigation water use efficiency of corn (*Zea mays*) under drip-tape irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage*, 12(6), 1529-1539. (In Persian).
- Wang, Y., Li, S., Qin, S., Guo, H., Yang, D., & Lam, H. M. (2020). How can drip irrigation save water and reduce evapotranspiration compared to border irrigation in arid regions in northwest China. *Agricultural Water Management*, 239, 106256.
- Wang, Y., Xu, C., Gu, Q., Shi, Y., Chen, J., Wu, H., He, J., Li, X., Han, L., & Su., D. (2024). Partial rootzone drying subsurface drip irrigation increased the alfalfa quality yield but decreased the alfalfa quality content. *Front. Plant Sci*, 15, 1297468
- Yazar, A., Gökçel, F., & Sezen, M. S. (2009). Corn yield response to partial rootzone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. *Plant, Soil and Environment*, 55(11), 494-503.
- Yazar, A., İnce Kaya, Ç., Çolak, Y.B., Tekin, S., & Alghory, A. (2023). Yield, dry matter and water productivity simulation for surface and subsurface drip-irrigated bell pepper using the SALTMED model. *The Journal of Agricultural Science*, 161, 76-87.
- Yaser, H. (2024). Evaluation of SALTMED Model in Estimating Water Consumption Efficiency of Greenhouse Cucumbers of Sawdust Mixing Treatments under Moisture Stress Conditions. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 54(2), 95-112. (In Persian).