

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

چکیده

هدف این مطالعه، تحلیل اثر تیمارهای آبیاری متعارف (DI) و آبیاری بخشی ریشه (PRD) به روش قطره ای - تیپ، بر عملکرد ذرت دانه ای، 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) در سه تکرار در مزرعه، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، می‌باشد. آزمایش در قالب طرح کرت های خرد شده در پایه بلوک های کامل تصادفی، در شهرستان پاکدشت، اجرا شد. نتایج داده ها در تیمارهای آبیاری متعارف، نشان داد: در سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی، عملکرد اندازه گیری 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، آماره 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، بوده ولی در تیمارهای آبیاری بخشی ریشه، با سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی، عملکرد اندازه گیری 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، می باشد، آماره 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، می باشد. مقایسه نتایج بین داده های اندازه گیری شده و برآوردی از مدل، اختلاف معنی داری، نداشته است. مدل SALTMED، دقت خوبی، برای پیش بینی، عملکرد دانه ذرت، کاهش مصرف آب و بهبود مدیریت آبیاری، بویژه روش کم آبیاری در اقلیم خشک، دارد.

کلید واژه ها: آبیاری بخشی ریشه، ذرت، کم آبیاری، عملکرد، مدل.

۱. مقدمه

کم آبیاری یکی از راهکارهای 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). ارزیابی مدل های SALTMED AquaCrop، شبیه سازی عملکرد ذرت تحت دو تیمار کم آبیاری و کاربرد سوپرجاذب بود، 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 تامین و برای انواع مختلف خاک و شرایط توپوگرافی مناسب است (Nasrollahi, et al., 2016). در تحقیق 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٪، به ترتیب، کاهش عملکرد ۲۵٪ و ۵۰٪ بوده ولی بیشترین کارایی مصرف آب زیست توده، ۳/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی، برای تیمار ۷۵٪ آبیاری قطره ای به دست آمد (Tabatabaei, et al., 2020; Amerian, et al., 2021). نتایج پژوهشی نشان داد، در شرایط کاهش ۱۰٪ در مصرف آب، نسبت به آبیاری کامل، بیشترین درآمد خالص، نصیب کشاورز، می شود (Mashal et al., 2009). در تحقیقی تیمار کم آبیاری در سطح ۷۵٪ درصد بر روی گیاه شب بو، 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٪ مصرف کمتر آب، عملکرد محصول در مقایسه با خاک معمولی ۱۹٪ بیشتر شده و بهره وری آب ۵۰٪ 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، مورد استفاده واقع 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، رشد و نمو 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 علائمی از ریشه به روزه ها، میزان بازشدن آن ها را تحت تاثیر قرار داده و باعث کاهش تلفات آب می شود (Karandish & Šimunek, 2019; Davies & 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٪ نسبت به سامانه سطحی کمتر بوده ولی بهره وری آب، عملکرد علوفه ای و دانه ای ذرت به ترتیب، ۱۶٪ و ۲۱٪ و برای گندم ۳۵٪، بیشتر بوده است (Mokhtaran, et al., 2021). 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 مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang, et al., 2012). مدل SALTMED به منظور مدیریت یکپارچه آب در مزرعه، برای سیستم‌های مختلف آبیاری، محصول، خاک، و کیفیت آب آبیاری، توسعه پیدا کرده است (Fghire, et al., 2015; Ragab, 2002). در مطالعه ای تأثیر کم آبیاری تنظیم شده (RDI) و کم آبیاری بخشی ریشه (PRD) بر رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد و بهره وری آب ذرت کشت شده در خاک ماسه ای در مصر را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عملکرد به دست آمده تحت RDI نسبتاً بیشتر از عملکرد تحت PRD بود، احتمالاً به دلیل نفوذ پذیری زیاد در خاک شنی است و تیمار PRD آبیاری کمتری دریافت کرده و حجم خاک مرطوب کمتر در محدوده ریشه، در زیر منطقه ریشه از بین رفته است (Abdelraouf, & Ragab, 2018). مدل SALTMED، توانست رطوبت خاک را برای همه لایه‌ها، به خوبی 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 شبیه سازی، عملکرد دانه، بوده است (Razzaghi & Ghannadi, 2016). تحقیقی با هدف ارزیابی کارایی مدل SALTMED، در شبیه‌سازی عملکرد و توزیع رطوبت اعماق خاک، تحت کشت ذرت و گندم و آبیاری با آب لب شور انجام گردید، با افزایش شوری آب آبیاری، دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر رطوبت خاک، افزایش می‌یابد و در شوری‌های بالاتر به مقادیر واقعی نزدیک تر می‌گردد (Khalvandi, et al., 2017; Kamali, et al., 2022). در مطالعه‌ای برنامه‌ریزی آبیاری خودکار و مدیریت آبیاری را بر رشد، عملکرد و بهره‌وری آب خیار در شرایط گلخانه، از دو روش مختلف برای کنترل زمان بندی آبیاری (کنترل دستی و کنترل خودکار) در قطعه‌های اصلی و سه تیمار کم آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد و آبیاری کامل، استفاده شد. نتایج نشان داد: 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 (Yaser, H, 2024; Ramadan., et al., 2020). مدل SALTMED، با شبیه‌سازی تمام معیارهای ارزیابی برای محتوای رطوبت خاک، جذب ازت، عملکرد و بهره‌وری آب خیار برای تیمارها برای دو فصل رشد به خوبی عمل کرد. در مطالعه ای، 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 بهره وری آب در هر دو روش آبیاری را شبیه‌سازی نمود (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 نخود فرنگی تحت دو برنامه آبیاری، بررسی گردید، برنامه‌ریزی آبیاری با کاهش ۳۰٪ ظرفیت مزرعه، باعث افزایش کارایی محصول و بهره‌وری آب می‌شود زیرا فواصل کم آبیاری تحت آبیاری با ۳۰٪ تخلیه ظرفیت مزرعه، باعث ایجاد توزیع یکنواخت‌تر آب، در طول دوره رشد محصول می‌شود. نتایج 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 روش ها

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

این تحقیق 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 آب و هوای گرم و نیمه خشک، متوسط بارش سالانه ۱۴۱ میلیمتر، دمای متوسط ۱۵/۶ سانتی گراد، تبخیر و تعرق ۱۳۹۰ میلی متر، در طبقه‌بندی اقلیمی دوماترن، جزو مناطق خشک می‌باشد. قبل از اجرای طرح، در چند نقطه مختلف، نمونه‌برداری خاک از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متر انجام، شد. با انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاکشناسی و انجام آزمایشات، 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 ولی در دوره تشکیل گل آذین‌نر، خروج ابریشم‌ها و گرده افشانی حساس است (Tabatabaei, et al., 2019). آزمایش، در قالب طرح کرت های خرد شده، در پایه بلوک های کامل تصادفی، شش تیمار در سه تکرار (۱۸ کرت)، کشت در دو فصل زراعی در سال های ۱۴۰۳-۱۴۰۲، بر اساس نقشه طرح و مشخصات زیر: فاصله گیاه بر روی ردیف ۰/۲ متر، ابعاد هر کرت ۳ متر × ۳ متر (مساحت ۹ متر مربع)، 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٪/DI₁₀₀، ۷۵٪/DI₇₅ و ۵۵٪/DI₅₅ نیاز آبی گیاه و سه تیمار آبیاری بخشی ریشه (PRD) با سطوح: ۱۰۰٪/PRD₁₀₀، ۷۵٪/PRD₇₅ و ۵۵٪/PRD₅₅ نیاز آبی گیاه، هر تیمار سه تکرار و جمعاً ۱۸ کرت، می باشد.

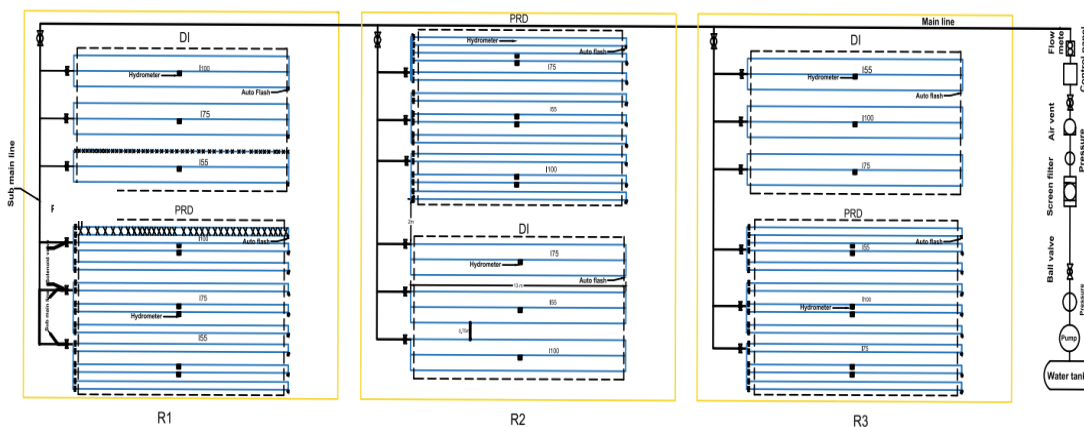


Figure 1. Schematic diagram of experimental design, DI and PRD irrigation treatments in field.

۳.۲. عملیات تهیه زمین، کاشت ذرت و تیمارهای آبیاری

پس از عملیات آماده سازی زمین، شامل شخم و دیسک، کرت بندی انجام و بذرها، به صورت دستی، با فاصله ۰/۲ متر روی ردیف ها و عمق ۵ سانتی متر، در هر نقطه ۳-۴ بذر، کاشته شد. پس از سبز شدن کامل و در مرحله ۷-۸ برگی، تنک سازی و حذف بوته های 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، بر اساس آزمون خاک قبل از کاشت، در دو مرحله (۵۰٪، مرحله ۷-۸ برگی و ۵۰٪، در مرحله گلدهی گیاه)، به خاک، داده شد.

۳.۲.۱. مراحل کاشت

آزمایش در چهار مرحله رشد، 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 پر شدن 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 پر شدن دانه تا یک هفته پیش از برداشت، انجام آبیاری، ادامه داشت. آب مصرفی بر اساس محاسبه نیاز آبی گیاه و روش های آبیاری متعارف و قطره ای (آبیاری تیپ برای هر ردیف کشت، فاصله قطره چکان ها 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.

۳.۲.۲. 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 حاشیه ای، سه بوته گیاه، به صورت تصادفی، انتخاب شد. برای تعیین عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه، نمونه برداری از هر تیمار با رعایت حاشیه ها، 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 و زیست توده محصول ذرت، به روش های معمول، تعیین، گردید.

۴.۲. محاسبه مقدار تبخیر و تعرق روزانه گیاه

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

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{0.34}{u_2}\right)} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

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 متر مربع بر روز)، T : میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (سانتی گراد)، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، γ : ثابت سایکرومتریک (کیلو پاسکال بر درجه سانتی گراد)، G : شار گرمای زمین (مگاژول بر متر مربع بر روز) و

e_s و e_a : به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال) می باشد. پس از محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET_0)، با اندازه گیری ضریب گیاهی (K_c)، در مراحل رشدی گیاه، مقدار تبخیر- تعرق روزانه گیاه (ET)، از رابطه (۲)، محاسبه می شود.

۵.۲. معیارهای ارزیابی مدل

واسنجی و ارزیابی مدل SALTMED، با مقایسه نتایج حاصل داده های اندازه گیری شده، انجام شد. برای مقایسه بین داده ها، 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 شاخص ها، عبارتند از: P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و $\bar{p}$ میانگین مقادیر پیش بینی شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده $\bar{O}$ و میانگین مقادیر اندازه گیری شده، n تعداد داده ها.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})(O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \right]^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2} \quad (4)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (5)$$

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 شاخص های گیاهی فوق الذکر، برای روش آبیاری متعارف، در جدول (۲)، ارائه شده است.

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

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		
	Intermediate	1	1.15	0.47	2.80
	Final	0.9	1.1		

۳.۱.۱. روش آبیاری متعارف

با مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده، عملکرد دانه ذرت و زیست توده محصول، محاسبه آماره های ارزیابی و نتایج داده های آبیاری متعارف و آبیاری بخشی ریشه، مدل SALTMED، واسنجی، گردید. مقادیر عملکرد و زیست توده محصول ذرت، در مدت زمان های ۴۵، ۶۰، ۷۳، ۸۷ و ۱۱۳ روز پس از کاشت، برای تیمارهای سطوح نیاز آبی به روش آبیاری متعارف، اندازه گیری و محاسبه، گردید. مقادیر عملکرد دانه ذرت و زیست توده، اندازه گیری شده و برآوردی (تن بر هکتار) برای تیمارهای آبیاری متعارف (DI)، در جدول (۳)، ارائه شده است. آماره ها، از روابط (۳، ۴ و ۵) محاسبه گردید جدول (۴). اگر مقدار $NRMSE < 10\%$ باشد، شبیه سازی مدل عالی، $NRMSE < 10-20\%$ شبیه سازی مدل خوب، $NRMSE < 20-30\%$ شبیه سازی مدل متوسط و $NRMSE > 30\%$ شبیه سازی مدل ضعیف، می باشد (Jamieson et al, 1991).

Table 3. Comparison of measured and estimated treatments yield and biomass on corn (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

۳.۱.۱. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی (DI₁₀₀)

در تیمار با سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی (DI₁₀₀)، عملکرد و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۱۱/۷۱، ۱۱/۸۶، ۲۴/۳۳ و ۲۷/۰۵ تن بر هکتار، می باشد جدول (۳). آماره ها: NRMSE، به ترتیب، ۸/۷۵ و ۱۰/۵۰ درصد، RMSE، به ترتیب، ۰/۵۵ و ۲ تن بر هکتار، R² به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۵، برای عملکرد و زیست توده محصول، برآورد گردید جدول (۴). مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست توده، به ترتیب، عالی و خوب، ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج تحقیق (Nasrollahi, et al., 2016; Kamali, et al., 2023) مطابقت دارد.

Table 4. Comparisons of measured and estimated conventional treatments, yield and biomass on Maize.

Treatments irrigation	corn	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

۳.۱.۲. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI₇₅)

در روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI₇₅)، عملکرد و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۹/۸۰، ۱۰/۰۸ و ۱۴/۸۷، ۱۳/۱۰ تن بر هکتار، می باشد جدول (۳). مقادیر آماره های عملکرد ذرت و زیست توده عبارتند از: NRMSE به ترتیب، ۱۱/۱۲ و ۱۳/۵۲ درصد، RMSE، به ترتیب، ۰/۵۲ و ۱/۵۸ تن بر هکتار، R² برای عملکرد ذرت و زیست توده به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۷۸، می باشد جدول (۴). شبیه سازی مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست توده، به ترتیب، عالی و خوب، ارزیابی شد. نتایج این پژوهش، با نتایج تحقیق (Mohammed, et al. 2023; Nakhjavanimoghaddam, et al., 2024) همخوانی دارد.

۳.۱.۳. اعتبارسنجی مدل با روش آبیاری متعارف و سطح ۵۵ درصد نیاز آبی (DI₅₅)

در روش آبیاری متعارف و سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (DI₅₅)، عملکرد دانه و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۶/۱۲، ۶/۱۱ و ۱۲/۶۹، ۱۲/۳۵ تن بر هکتار، می باشد جدول (۳). مقادیر آماره های عملکرد ذرت و زیست توده 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 زیست توده، به ترتیب، ۰/۹۸ و ۰/۹۳ می باشد جدول (۴). مدل SALTMED، برای مقادیر عملکرد و زیست توده ذرت، به ترتیب، خوب و عالی، ارزیابی، شد. نتایج این پژوهش، با نتایج تحقیق (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، اندازه گیری شدند. مقادیر میانگین شاخص های گیاهی فوق برای روش آبیاری بخشی ریشه، در جدول (۵)، ارائه شده است.

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

Parameter	Growth stage	K _{cb}	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 treatments PRD yield-biomass on Maize (ton. h⁻¹).

Treatments 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)، 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، (R^2) 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)، 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 (R^2) 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 تحقیق (Wang, et al., 2024; Abdelraouf, et al, 2018) مطابقت دارد.

Table 7. Comparison of measured and estimated treatments for (PRD) irrigation on Maize.

Treatments	corn	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 (PRD₅₅):

در روش آبیاری بخشی ریشه، برای سطح آبی ۵۵ درصد نیاز آبی (PRD₅₅)، عملکرد دانه و زیست توده اندازه گیری شده و برآوردی به ترتیب، ۵/۷۳، ۵/۶۵ و ۱۲/۰۰، ۱۱/۰۵ تن بر هکتار، می باشد جدول (۶). مقادیر آماره های عملکرد ذرت و زیست توده 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 زیست توده به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۸۳ محاسبه، شد (جدول ۷). مدل SALTMed در محدوده شبیه سازی عالی و خوب می باشد. نتایج اعتبارسنجی با تیمار ۵۵ درصد (PRD₅₅)، نشان داد که مدل به خوبی قابلیت شبیه سازی عملکرد ذرت در تیمار کم آبیاری PRD را دارد. با توجه به نتایج اعتبارسنجی و واسنجی مدل در آبیاری متعارف و آبیاری بخشی ریشه با سطوح مختلف، می توان نتیجه گرفت که مدل SALTMed با دقت نسبتاً خوبی توانایی شبیه سازی تیمارهای مورد بررسی را داشته است. نتایج این پژوهش، با نتایج تحقیق (Wang, et al., 2012; Yazar, et al, 2009) مطابقت دارد.

۳.۳. آب مصرفی آبیاری

مقدار آبیاری روزانه و تجمعی (میلی متر) بر روی محورهای عمودی و دوره رشد گیاه ذرت دانه ای (روز) بر روی محور افقی، نشان داده شده که حاصل از شبیه سازی مدل SALTMED، برای تیمار آبیاری کامل (DI₁₀₀)، است (شکل ۲). بر اساس داده های هواشناسی، در شرایط اقلیم گرم و خشک منطقه پاکدشت، میانگین نیاز آبی ذرت علوفه ای، ۷۵۰۰۰-۵۵۰۰۰ متر مکعب، 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 می شود که مقدار کل آب آبیاری، در پایان دوره شبیه سازی مدل SALTMED، (۱۱۳ روز پس از کاشت ذرت دانه ای) برابر با ۹۰۰ میلی متر، است. مدل SALTMED، معمولاً میزان آبیاری را بر اساس سطح خیس شده اطراف قطره چکان ها، محاسبه می کند، نه کل مساحت کرت. در صورتی که فرض شود مقدار ۹۰۰ میلی متر آب، مربوط به هر متر مربع از سطح خیس شده باشد، نیاز آبی، معادل ۹۰۰ میلی متر بر متر مربع، خواهد بود که با مقادیر واقعی مورد انتظار برای منطقه مورد مطالعه، همخوانی دارد. موضوع اهمیت تفسیر صحیح خروجی های مدل و لحاظ کردن سطح مؤثر آبیاری، در تحلیل نتایج، تأکید دارد.

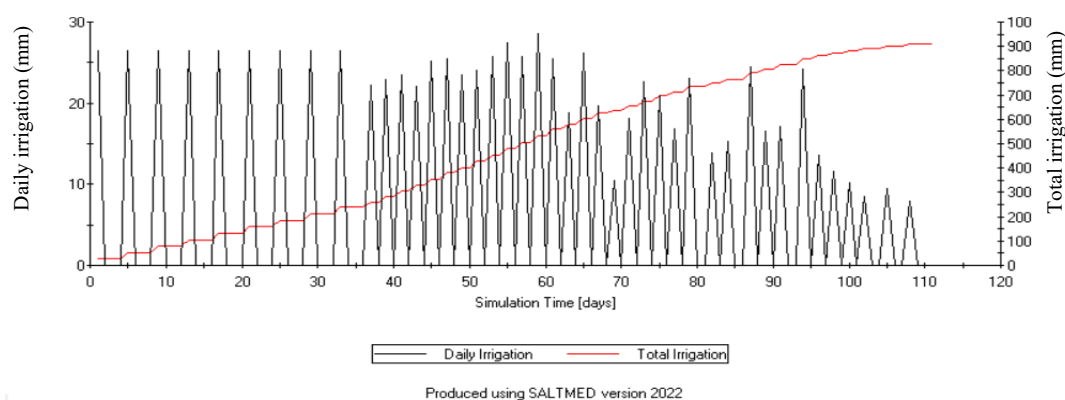


Figure 2. Daily and cumulative water consumption (mm) for treatment irrigation (DI₁₀₀) during the grow period.

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 (میلیمتر بر متر مربع) را در سه تیمار آبیاری ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۵٪ 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 (میلیمتر بر متر مربع)، از صفر تا ۹۰۰ میلیمتر بر متر مربع، می باشد. با کاهش سطح تأمین نیاز آبی از ۱۰۰٪ به ۷۵٪ 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 اینکه 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).

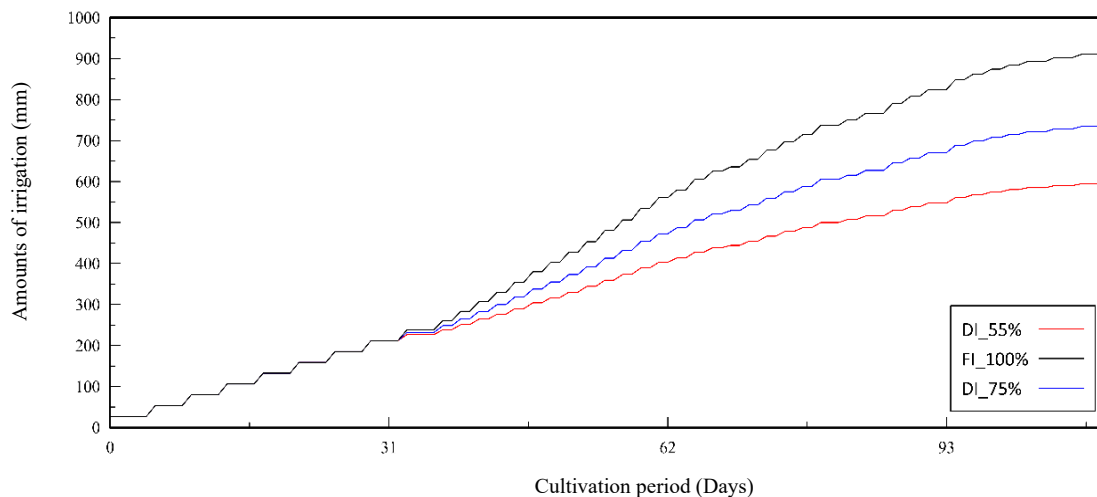


Figure 3. Amounts of water irrigation (mm) in three treatments, (100, 75 and 55%) Conventional irrigation.

۳.۴. 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٪ (FI₁₀₀)، ۷۵٪ (DI₇₅) و ۵۵٪ (DI₅₅) نیاز آبی، مقدار تبخیر سطحی واقعی (AE)، به ترتیب ۴۳، ۴۱ و ۳۹ لیتر در روز، برای مساحت ۹ متر مربع کرت، محاسبه شده که با تبدیل واحد، مقادیر تبخیر واقعی (AE)، به ترتیب ۴/۴۸، ۴/۵ و ۴/۳ میلیمتر در روز، می گردد. مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE)، در تیمارهای آبیاری ۱۰۰٪ (FI₁₀₀)، ۷۵٪ (DI₇₅) و ۵۵٪ (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)، عمدتاً ناشی از زمان بندی آبیاری بوده، چون در روزهای آبیاری، تبخیر از سطح خاک، افزایش می یابد و با کاهش مقدار آب آبیاری، مقدار تبخیر از سطح خاک، کاهش می یابد (Hsiao, T. C., & Xu, L. K. 2000). در تیمارهای آبیاری بخشی ریشه (PRD)، مقدار تبخیر پتانسیل، ۴۱۲ میلی متر در طول دوره کشت (۱۱۲ روز)، است. در تیمارهای ۱۰۰٪ (PRD₁₀₀)، ۷۵٪ (PRD₇₅) و ۵۵٪ (PRD₅₅) نیاز آبی، مقدار تبخیر سطحی واقعی، به ترتیب ۱۹/۵۳، ۱۹/۴۸ و ۱۹/۳۴ لیتر در روز، برای مساحت ۹ متر مربع کرت، محاسبه شده که با تبدیل واحد، مقادیر تبخیر واقعی (AE)، به ترتیب ۲/۱۷، ۲/۱۶ و ۲/۱۵ میلیمتر در روز، می شود. مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE) برای تیمارهای فوق، ۰/۴۳، می باشد شکل (۵). در روش آبیاری بخشی ریشه (PRD)، تفاوتی در مقدار نسبت تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل (AE/PE) تیمارها، مشاهده نمی شود. این مقدار با شرایط اقلیمی منطقه در فصل رشد، کاملاً مطابقت دارد. کاهش سطح آبیاری، تأثیر خیلی جزئی، بر تبخیر واقعی از سطح خاک، به علت 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 می کند و می تواند در کاهش اتلاف آب از طریق تبخیر سطحی در شرایط کم آبی، مؤثر باشد. یافته های این پژوهش، با مطالعه (Marwa, et al., 2020) مطابقت دارد.

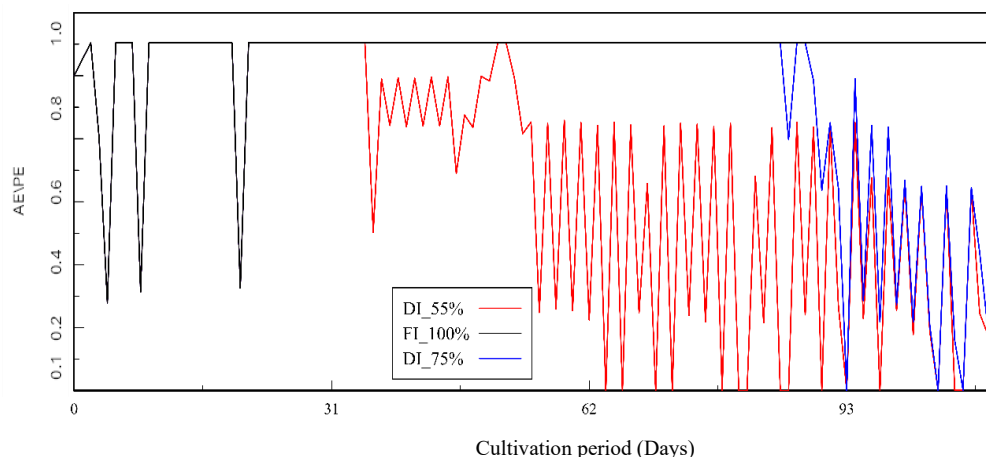


Figure 4. Ratio of Actual Evaporation to Potential Evaporation in Conventional irrigation.

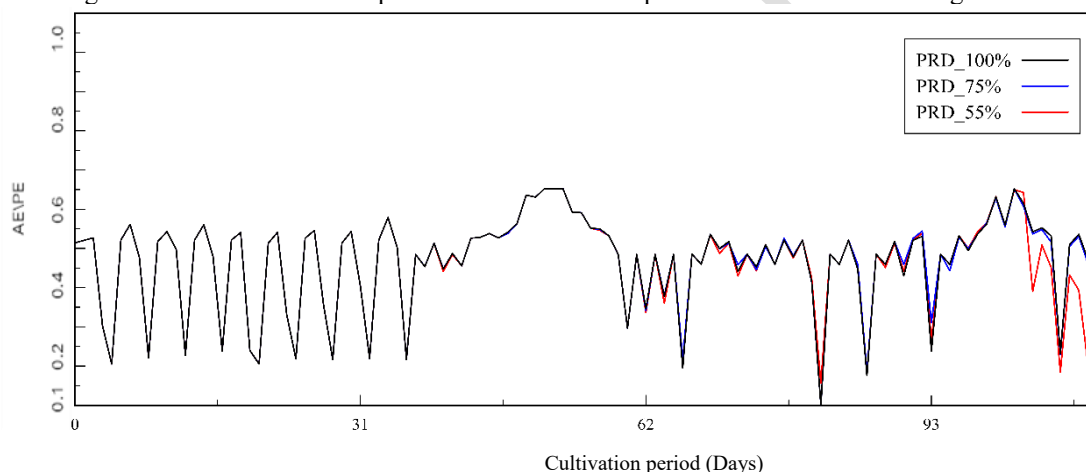


Figure 5. Ratio of Actual Evaporation to Potential Evaporation in PRD irrigation.

۳.۵. 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 $DI_{100}/100\%$ ، برابر یک، است، چون آب مورد نیاز تأمین شده و گیاه بدون تنش آبی رشد کرده است. با کاهش مقدار سطح آبیاری از 100% ، به سطوح 75% و 55% ، مقدار تعرق واقعی، کاهش یافته و در تیمار DI_{55} ، نسبت به تیمار DI_{75} ، کاهش تعرق با شدت بیشتری، مشاهده می شود 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، می گردد. 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 می گیرد که موجب کاهش رشد رویشی گیاه و تبخیر سطحی، می شود. اما بخش دیگر ریشه در منطقه مرطوب، می باشد که امکان تأمین نسبی نیاز تعرقی گیاه را، فراهم می سازد. گیاه با تنظیم فیزیولوژیکی، حتی در سطوح کم آبی، تعرق خود را در سطح پایدارتری، حفظ می کند که بستگی به ماهیت روش PRD، دارد (Marouelli, W. A., & Silva, W. L. C. 2007).

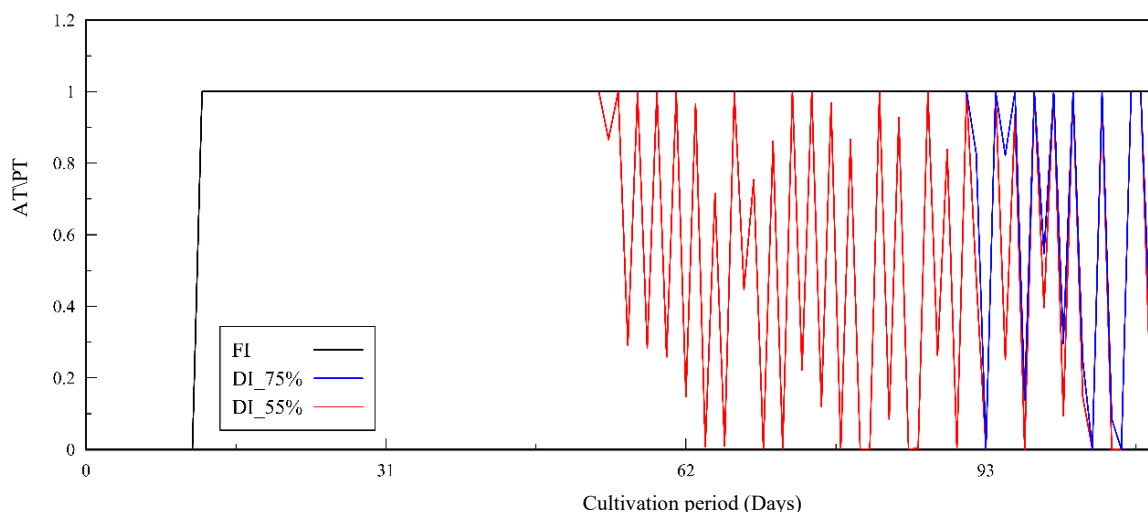


Figure 6. Ratio of actual transpiration to potential transpiration during the Cultivation period(Days) in irrigation

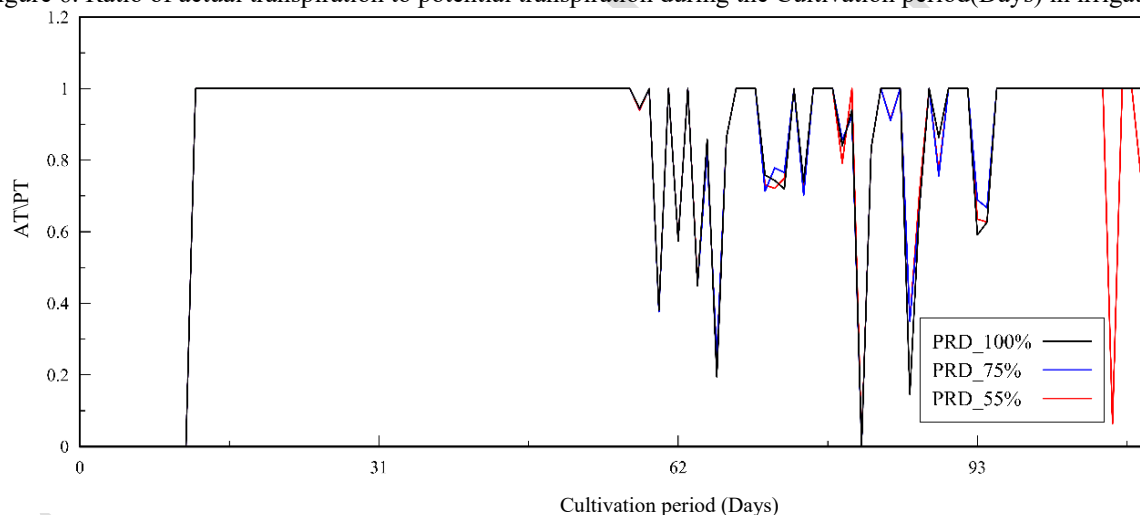


Figure 7. Ratio of Actual Transpiration to Potential Transpiration during the cultivation(Days)in PRD irrigation.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر تیمارها با سطوح مختلف نیاز آبی، در آبیاری متعارف و بخشی ریشه، با استفاده از مدل SALTMED، و آبیاری قطره ای-تیپ بر عملکرد ذرت دانه ای، بررسی گردید. واسنجی مدل با محاسبه، آماره های R^2 ، RMSE و NRMSE و اعتبارسنجی آن با مقایسه نتایج داده های عملکرد اندازه گیری شده و برآوردی محصول، در آبیاری متعارف و بخشی ریشه، نشان داد، مدل توانسته این تفاوتها را به خوبی، با دقت قابل قبولی شبیه سازی کند. با کاهش سطح نیاز آبی از ۱۰۰٪ به ۷۵٪ و سپس ۵۵٪، مقدار کل آب مصرفی، به میزان قابل توجهی، کاهش یافت. در آبیاری متعارف، نسبت تعرق واقعی (AT)، به تعرق پتانسیل (PT)، در تیمار (DI₁₀₀)، برابر یک بوده و گیاه بدون تنش آبی رشد، کرده است. با کاهش مقدار آبیاری سطوح ۷۵٪ و ۵۵٪، مقدار کاهش تعرق واقعی، در تیمار (DI₅₅)، نسبت به تیمار (DI₇₅)، با شدت بیشتری، مشاهده می شود. 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 SALTMED، دقت مطلوبی در شبیه سازی عملکرد ذرت و بهبود مدیریت آبیاری، بویژه روش کم آبیاری در اقلیم خشک، دارد.

۵. پی نوشتها

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

۶. تعارض منافع

هیچ گونه 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 SALTMed 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 SALTMed model. *Irrig. Sci.*, 37, 637–655.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome,
- 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. *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. and 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), pp.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. *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. *Agronomy*, 13(6), 1481.
- Mokhtaran, A., Varjavand, P., Dehghanisani, 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., and 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 YB, 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. 54(2), 95–112.

Analysis of the Effects of Conventional and Partial Root-Zone Irrigation Treatments on Maize Yield Using the SALTMED Model under Drip-Tape Irrigation

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, Aboureihan Campus, University of Tehran. The field experiment followed a split-plot design based on a randomized complete block design and was conducted in Pakdasht County. 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.

Keywords: Deficit Irrigation, Partial Root Drying, Yield, Maize, Modeling