

بهبود بهره‌وری آب در اثر اعمال کم آبیاری با استفاده از مدل SALTMED

چکیده

افزایش تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی سبب کاهش منابع آب کشاورزی در مناطقی شده است که با کمبود آب مواجه هستند. بر این اساس، یک آزمایش مزرعه‌ای در دو فصل متوالی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در مرکز تحقیقات گیاهان دارویی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس انجام شد. هدف از این تحقیق بررسی اثر سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی (SDI) و آبیاری بخشی ریشه (PRD) و سه تیمار آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد تبخیر و تعرق گیاه) بر عملکرد گیاه عدس و ارزیابی مدل SALTMED در شبیه‌سازی رطوبت خاک، ماده خشک کل و عملکرد بود. علیرغم اینکه بالاترین مقادیر عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق (بدون کم آبیاری) بدست آمد، ولیکن تفاوت معنی‌داری بین عملکرد تیمارهای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی وجود نداشت. لذا می‌توان ۲۵ درصد صرفه جویی در مصرف آب بدون کاهش عملکرد به دست آورد. عملکرد و بهره‌وری آب در آبیاری بخشی ریشه کمی بیشتر از آبیاری قطره‌ای سطحی بود؛ زیرا رطوبت خاک در آبیاری بخشی ریشه به مدت زیادی در ناحیه ریشه بدون اینکه محصول تحت تنش آبی قرار گیرد، نگهداری می‌شود. مدل SALTMED به طور دقیق رطوبت خاک، ماده خشک کل، عملکرد و بهره‌وری آب را شبیه‌سازی کرد؛ بنابراین، این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری جهت مدیریت محصول، آب و زمین تحت شرایط اقلیمی ایران استفاده شود.

کلمات کلیدی: آبیاری بخشی ریشه، بهره‌وری آب، عملکرد، کم آبیاری، مدل SALTMED

مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌هایی که امروزه جوامع بشری با آن مواجه هستند کمبود شدید منابع آبی جهت تأمین نیاز آبی محصولات زراعی است (Tawfik and El-Mouhamady, 2019). در گذشته آبیاری محصولات کشاورزی بدون هیچگونه محدودیتی از نظر تأمین منابع آبی صورت می‌گرفت. اما با رشد جمعیت و صنعتی شدن جوامع، تقاضا برای مصرف آب افزایش یافت. بنابراین بخش کشاورزی جهت تأمین منابع آبی مورد نیاز برای کشت محصولات کشاورزی با مشکلات متعددی مواجه می‌باشد (Wilhite and Buchanan-Smith, 2005). از طرفی تمام مراحل فیزیولوژیکی و مرتبط با عملکرد محصول از مراحل اولیه کاشت تا برداشت به شدت تحت تأثیر خشکسالی قرار دارد (Golipour et al., 2013). در چنین شرایطی زارعین و متخصصین روش‌های گوناگونی را برای جلوگیری از اتلاف منابع محدود آب از قبیل خاک‌پوشی، مالچ پاشی (Kader et al., 2019; Iqbal et al., 2020) و استفاده از مواد ضد تعرق برای محصولات کشاورزی را برای کاهش و بهینه‌سازی مصرف آب با کمترین تأثیر در عملکرد محصول به کار گرفتند (Schahbazian and Iran Nejad, 2006). اگرچه این تکنیک‌ها می‌توانند اثرات مخرب خشکسالی را به حداقل برسانند، اما بیشتر آن‌ها گران، زمان‌بر یا نیازمند ماشین‌آلات خاصی هستند که توسط تعداد محدودی از کشاورزان امکان فراهم شدن دارد. علاوه بر این، بحران آب، بحران انرژی و نرخ بالای نهاده‌ها، موانع اصلی برای اتخاذ این استراتژی‌های ضد خشکسالی توسط کشاورزان می‌باشد. بنابراین، نیاز به توسعه یک روش مدیریتی وجود دارد که نه تنها مصرف آب را بدون کاهش عمده در عملکرد محصول به حداقل برساند، بلکه برای کشاورزان مقرون به صرفه و به راحتی قابل دسترسی باشد. یکی از این روش‌ها کم آبیاری می‌باشد، که در واقع نوعی مدیریت آب آبیاری است که اجرای آن در مناطقی که محدودیت منابع آبی وجود دارد توصیه می‌شود. در این روش نیاز آبی گیاه به طور کامل تأمین نمی‌شود، بلکه بخشی از نیاز آبی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. هدف اصلی از کم آبیاری افزایش بهره‌وری آب آبیاری است. این هدف یا با کاهش کفایت آبیاری و یا با حذف آبیاری‌های با تأثیر کمتر (آبیاری در مراحل غیر حساس گیاه به تنش آبی) حاصل می‌شود. روش‌های کم آبیاری به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که شامل کم آبیاری سنتی^۱ (افزایش فاصله بین آبیاری‌ها و یا تغییر عمق آب آبیاری)، کم آبیاری تنظیم شده^۲ (کم آبیاری در مراحل غیر حساس رشد) و آبیاری بخشی ریشه^۳ (فرم اصلاح شده کم آبیاری) می‌باشند. در روش آبیاری بخشی ریشه (PRD) ناحیه ریشه گیاه به دو قسمت تقسیم و به صورت متناوب آبیاری می‌شوند. در این روش یک نیمه از سیستم ریشه، آبیاری شده در حالی که نیمه دیگر آن خشک

- 1- Conventional deficit irrigation
- 2- Regulated deficit irrigation
- 3- Partial Root Drying

می‌باشد و قسمت خشک سیستم ریشه در آبیاری بعدی آبیاری می‌شود (Adu et al., 2018; English et al., 1990). روش‌های کم آبیاری مانند آبیاری بخشی ریشه از طریق تنظیم اسمزی تحمل به خشکی گیاه را افزایش می‌دهد. برخی تحقیقات نشان داده است که روش آبیاری بخشی ریشه از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی عملکرد بهتری داشته و ثابت شده است که بهره‌وری محصول و تحمل به خشکی هر دو با تولید آنتی اکسیدان‌ها و تنظیم اسمزی در روش آبیاری بخشی ریشه افزایش می‌یابد (Raza et al., 2017). تکنیک‌های صرفه‌جویی در آب مانند آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه نیاز آبی گیاه را بدون کاهش قابل توجهی در عملکرد کاهش می‌دهد (Abdelraouf & Ragab, 2018). فرآیند تر و خشک شدن متناوب در روش آبیاری بخشی ریشه منجر به بسته شدن نسبی روزنه‌ها می‌شود که سبب کاهش تلفات آب توسط تعرق و کاهش دی اکسید کربن برای فتوسنتز و رشد گیاه می‌شود (Iqbal et al., 2020). ولیکن تحقیقات نشان می‌دهد که این کاهش عملکرد معنی دار نمی‌باشد و در مجموع سبب افزایش بهره‌وری آب آبیاری (WP) گیاه می‌شود.

عدس (*Lens culinaris*)، نقش مهمی در رژیم غذایی انسان و حفظ حاصلخیزی خاک دارد و دارای پروتئین و مواد ریز مغذی بالایی می‌باشد (Abraham 2015, Ghanem et al. 2015)، و حاصلخیزی خاک را از طریق افزودن نیتروژن (N)، کربن و مواد آلی بهبود می‌بخشد (Sarker and Erskine 2006, Abraham 2015). تولید جهانی عدس در سال ۲۰۲۱ به ۵/۷۷ میلیون تن رسید که کانادا بزرگترین تولید کننده آن با ۱/۶ میلیون تن بود (FAOSTAT, 2021). در ایران، بیشترین سطح زیر کشت عدس آبی متعلق به شهرستان آباد (استان فارس) با ۱۳۴۲/۲۴ هکتار و عملکرد ۲۲۲۹/۱۰ تن در هکتار و کمترین سطح زیر کشت متعلق به شهرستان تفرش (استان مرکزی) با ۰/۰۱ هکتار و عملکرد ۰/۱۲ تن در هکتار می‌باشد (آمار وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). تعدادی از مطالعات نشان دادند که مدل SALTMED شبیه‌سازی دقیقی از عملکرد محصول، ماده خشک و رطوبت خاک ارائه می‌دهد (Ragab, 2002; Malash et al., 2005a; Malash et al., 2005b; Hirich et al., 2012; Pulvento et al., 2013; Kaya et al., 2015; Ragab, 2015; Afzal; et al., 2016; Cosi_c et al., 2017; El-Shafie et al., 2017; Abdelraouf and Ragab, 2018; Marwa et al., 2020). مزایای استفاده از مدل‌های کالیبره شده و معتبر این است که ارزان‌تر و سریع‌تر از انجام آزمایش‌های میدانی هستند و حالت‌های مختلفی را می‌توان با آن‌ها شبیه‌سازی کرد (El-Shafie et al., 2018). به همین دلیل، مدل SALTMED ابزار مفیدی برای ارزیابی تأثیر سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (SDI) و روش آبیاری قطره‌ای بخشی ریشه (PRD) بر محصول و خاک است (Ragab, 2015). در تحقیقی آنالیز حساسیت مدل SALTMED نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به میزان آب آبیاری با ضریب حساسیت متوسط ۱/۲۹ دارد. بر اساس یافته‌های این پژوهش درجه حرارت ماکزیمم نیز به عنوان حساسترین پارامتر اقلیمی مدل شناخته شد (Golabi et al., 2012).

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه و تیمارهای آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد تبخیر و تعرق گیاه) بر رشد، عملکرد و ماده خشک گیاه عدس و ارزیابی عملکرد مدل SALTMED در پیش‌بینی میزان رطوبت خاک، عملکرد و ماده خشک و در نهایت مقایسه بهره‌وری آب آبیاری در اثر این دو روش آبیاری در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ بود.

روش شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

آزمایش‌های صحرایی در مزرعه تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، در طول فصل رشد ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ (شهریور تا آذر ماه) انجام شد. یک ایستگاه هواشناسی در نزدیکی مزرعه آزمایشی برای پایش و ثبت داده‌های هواشناسی نصب شد. منطقه دارای آب و هوای خشک و تابستان‌های گرم و خشک است. در فصل رشد ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ میانگین دمای هوا ۲۱/۸۵ و ۲۰/۹۳ درجه

سانتی گراد، میانگین رطوبت نسبی ۳۵/۲ و ۳۸/۷۳ درصد و کل بارندگی به ترتیب ۹ و ۱۱/۵ میلی متر بوده است. تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) با استفاده از داده‌های ثبت شده هواشناسی و به کارگیری معادله پنمن مانتیث فائو (Allen et al., 1998) محاسبه شد. قبل از شروع آزمایش نمونه‌های خاک تا عمق ۶۰ سانتی متری جمع آوری و ویژگی‌های فیزیکی خاک در عمق‌های ۲۰ سانتی متری ثبت شد (جدول ۱). مطابق این جدول محتوای آب خاک ۱۳۳/۸ میلی متر در حد ظرفیت زراعی (FC) و ۷۵/۸ میلی متر در نقطه پژمردگی دائم (PWP) است، که بیانگر ۵۸ میلی متر آب در پروفیل خاک می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک در محل آزمایش

ρ_b (گرم بر سانتی متر مکعب)	K_s (میلی متر بر ساعت)	PWP (درصد)	FC (درصد)	بافت خاک	اندازه ذرات (درصد)			عمق (سانتی متر)
					رس	سیلت	شن	
۱/۵۵	۳۴/۵	۱۰/۷	۲۰/۳	لوم شنی	۱۰/۲	۲۱/۵	۶۸/۳	۲۰-۰
۱/۵۵	۲۲/۴	۱۲/۳	۲۲/۲	لوم شنی	۱۴/۳	۱۸/۱	۶۷/۶	۴۰-۲۰
۱/۵۵	۱۶/۱	۱۴/۹	۲۴/۴	لوم شنی	۱۳/۱	۱۸/۳	۶۸/۶	۶۰-۴۰

FC درصد رطوبت در حد ظرفیت زراعی، PWP درصد حجمی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع و ρ_b چگالی ظاهری خاک

طبق توصیه‌های مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور کود مورد نیاز محصول عدس برای تمام تیمارها اعمال شد. جدول ۲ خصوصیات شیمیایی آب آبیاری را نشان می‌دهد.

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب آبیاری

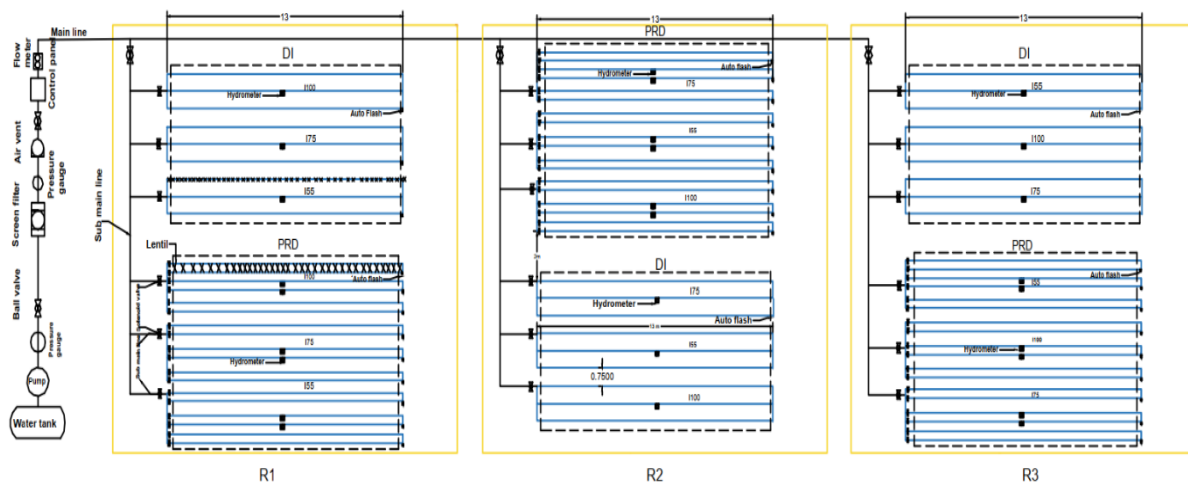
SAR*	آنیون‌ها (میلی اکی والان بر لیتر)				کاتیون‌ها (میلی اکی والان بر لیتر)				EC* (ds/m)	اسیدیته
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		
۴/۶۱	۲/۱۷	۱/۴۵	۲/۳۳	۰/۰۱	۰/۲۱	۳/۰۰	۰/۵۰	۲/۱۵	۰/۵	۷/۳

SAR* نسبت جذب سدیم و EC هدایت الکتریکی

طراحی مزرعه

مزرعه شامل دو روش آبیاری طی دو فصل متوالی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ بود. عدس (*Lens culinaris*) در ۱۵ شهریور کشت و در ۱۱ آذر در دو فصل رشد برداشت شد. بذرها در ردیف‌هایی با فاصله ۰/۷ متر روی پشته‌هایی که با فاصله ۰/۸ متر از هم فاصله داشتند کشت شدند. آزمایش با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تیمار (دو روش آبیاری و سه سطح آبیاری) و سه تکرار در هر تیمار انجام شد. سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه در سطح بلوک و سه سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I₁₀₀)، ۷۵ درصد نیاز آبی (I₇₅) و ۵۵ درصد نیاز آبی (I₅₅) به ترتیب اعمال شدند.

مساحت کل آزمایش ۳۹×۳۰ متر مربع بود که به سه تکرار با ابعاد ۱۳×۳۰ متر مربع تقسیم شد. نیمی از مساحت هر تکرار به سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و نیم دیگر به آبیاری بخشی ریشه مجهز شد و برای جلوگیری از اثرات تداخلی بین تیمارهای آبیاری، مساحتی به ابعاد ۳۰×۱ متر مربع بین تکرارها محصولی کشت نشد و تکرارها با فواصل ۲ متری از یکدیگر جدا شدند. قطر لوله‌های جانبی شبکه هر دو سیستم ۱۶ میلی متر بود. قطره چکان‌های انتخاب شده به گونه‌ای طراحی شدند که در فشار کاری ۱ بار (حدود ۱۰ متر)، دارای دبی ۴ لیتر بر ساعت باشند. فاصله بین قطره چکان‌ها ۳۰ سانتی متر و فاصله بین دو ردیف ۶۰ سانتی متر بود. در انتهای دوره رشد از وسط هر کرت نمونه برداشت و از میانگین آن‌ها جهت تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد.



شکل ۱. نحوه آرایش روش آبیاری بخشی ریشه و سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی در مزرعه آزمایشی

نیاز آبیاری محصول عدس

با در نظر گرفتن دور آبیاری ۳ روز، نیاز ناخالص آبیاری هر ۳ روز یکبار بر اساس رابطه ۱ محاسبه و اعمال شد.

$$IR_g = \frac{(ET_0 \times K_c \times K_r) \times F}{E_i} - P_{eff} + LR \quad (1)$$

که در آن:

IR_g نیاز ناخالص آبیاری (میلی‌متر)، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز) که مقدار آن با استفاده از معادله پنمن-ماتیت-فائو محاسبه شده است، K_c ضریب گیاهی (بدون بعد)، K_r ضریب کاهش تبخیر از سطح خاک (بدون بعد)، F دور آبیاری (روز)، E_i راندمان آبیاری (درصد)، P_{eff} بارش موثر (میلی‌متر) و LR آب مورد نیاز برای شستشوی نمک‌های انباشته شده در منطقه ریشه (میلی‌متر) می‌باشد.

طبق توصیه سازمان خواربار جهانی (FAO)، اگر بارش کمتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، بارش موثر صفر و اگر بیشتر از ۱۲/۷ میلی‌متر باشد، از رابطه ۲ محاسبه و اعمال شد.

$$p_{eff} = 0.8(P - 12.7) \quad (2)$$

که در آن:

P بارش کل می‌باشد.

نیاز آبشویی (LR) از روابط ۳ تا ۵ محاسبه و اعمال شد.

$$LF = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} \quad (3)$$

$$EC_{dw} = SEC_e - EC_{iw} \quad (4)$$

$$LR = \frac{ET}{1 - LF} \quad (5)$$

که در آن‌ها:

LF جز آبشویی (بدون بعد)، EC_{iw} شوری آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر)، EC_{dw} شوری زه‌آب (دسی‌زیمنس بر متر)، SEC_e حد آستانه تحمل شوری گیاه عدس (دسی‌زیمنس بر متر) و ET نیاز آبی گیاه (میلی‌متر بر روز) می‌باشد. حد آستانه تحمل شوری گیاه عدس ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده است (katerji et al., 2003).

میزان رطوبت خاک

رطوبت حجمی آب خاک (θ_v) در فواصل ۲۵ سانتی‌متری تا عمق ۵۰ سانتی‌متری با استفاده از دستگاه رطوبت سنج (EnviroSCAN) شرکت Sentek ساخت (استرالیا) اندازه‌گیری شد. این دستگاه ابتدا با روش Sentek (۲۰۰۱) و Jabro و همکاران (۲۰۰۵) در شرایط مزرعه کالیبره و در ادامه هر سه روز یکبار میزان رطوبت حجمی در اعماق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری اندازه

گیری شد. در روش آبیاری بخشی ریشه در هر نوبت آبیاری رطوبت حجمی ناحیه تر و خشک در اعماق ۲۵ و ۵۰ سانتی متری اندازه گیری و ثبت شد.

عملکرد گیاه عدس

برای هر تیمار، وزن کل عدس برداشت شده ثبت و عملکرد به صورت کیلوگرم عدس برداشت شده در یک متر مربع و عملکرد کل به صورت تن در هکتار بیان شد.

بهره وری آب آبیاری عدس

بهره وری آب با استفاده از رابطه ۶ برآورد شد (James, 1998).

$$WP = \frac{Y}{I_r} \quad (6)$$

که در آن: WP بهره وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و I_r میزان آب مصرفی در طول فصل (متر مکعب در هکتار) می باشد.

مدل SALTMED

این مدل در وب سایت کمیسیون بین المللی آبیاری و زهکشی (ICID) به آدرس https://www.icid.org/wg_crop.html قابل دسترس می باشد. مدل SALTMED (V. 3.04.25, Ragab, 2015) می تواند سیستم های آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه را مدیریت کند (Ragab, 2015; Ragab et al., 2015; Ragab et al., 2005a, 2005b; Ragab, 2002). این مدل در کشورهای مختلف و برای مدیریت های مختلف مزارع اعمال شده است (Ragab, 2020). مدل SALTMED یک مدل فیزیکی-ریاضی است که برای شبیه سازی جریان آب، انتقال نمک و مصرف آب توسط گیاه در خاک های زراعی طراحی شده است. این مدل به طور خاص برای مدیریت بهینه آبیاری و بررسی تأثیر شوری خاک در سیستم های کشاورزی کاربرد دارد. در این مدل، جریان آب در خاک توسط معادله ریچاردز توصیف و با شبیه سازی دینامیک آب و نمک در خاک و تعامل آن با گیاه، ابزاری کاربردی برای بهبود کارایی آبیاری و مدیریت شوری در کشاورزی است. تبخیر و تعرق مرجع در این مدل با روش آلن و همکاران (۱۹۹۸) محاسبه می شود. اطلاعات مربوط به آبیاری شامل؛ تاریخ آبیاری، شدت جریان، زمان شروع و خاتمه آبیاری و شوری آب آبیاری بر اساس اندازه گیری های مزرعه ای به مدل وارد شد. داده های هواشناسی (دما، رطوبت نسبی، تابش، سرعت باد و بارندگی) از ایستگاه موجود در محل برداشت شد. پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله منحنی نگهداشت رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی با استفاده از معادله ونگنوختن محاسبه شد. وضعیت لایه بندی خاک و مشخصات هر لایه مانند؛ ضخامت لایه، رطوبت اولیه، شوری اولیه و میزان نیتروژن با توجه به اندازه گیری های مزرعه ای و آزمایشگاهی انجام شده تعیین شد.

واسنجی مدل

واسنجی مدل بر اساس میزان رطوبت خاک، عملکرد و ماده خشک کل برای آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) با سیستم آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه برای فصل ۱۴۰۱ انجام و مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده با هم مقایسه شدند. جهت دستیابی به یک همبستگی خوب، تنظیم دقیق پارامترهای مربوطه مدل SALTMED انجام شد. در مورد واسنجی رطوبت خاک، پارامترهای خاک مانند فشار در نقطه ورود هوا به خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، محتوای آب اشباع خاک و شاخص توزیع منافذ تا زمانی که همبستگی خوبی بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده شده حاصل شود، به دقت تنظیم شدند. علاوه بر این، ضریب گیاهی، ضریب محصول پایه (Kcb) و پوشش کسری (Fc) بخشی از فرایند واسنجی مدل بودند و چون از داده های محققین قبلی استفاده شد نیاز به تعدیل جزئی داشتند (Hirich et al., 2012). برای واسنجی ماده خشک و عملکرد، پارامترهای رشد محصول، به ویژه بازده فتوسنتز، به دقت تنظیم شدند (Hasan et al., 2024). مقدار دقیق بازده فتوسنتز برای عدس بسته به شرایط آزمایشی متفاوت است، اما معمولاً بازده فتوسنتزی گیاه عدس در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ مولکول دی اکسید کربن به ازای هر فوتون جذب شده گزارش شده است. در مدل، معمولاً از بازده فتوسنتزی به صورت کسر جذب انرژی تابشی خورشید تبدیل شده به ماده خشک استفاده می شود که معادل حدود ۱/۵ تا ۳ درصد است (Hasan et al., 2024). جدول (۳) پارامترهای اصلی مورد استفاده در مدل SALTMED را نشان می دهد.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای گیاه و خاک واسنجی شده در مدل SALT MED برای عدس

پارامتر	واحد	مقدار پیش فرض	پارامتر	واحد	مقدار پیش فرض
تاریخ کشت	---	۱۵ شهریور	ضریب گیاهی مرحله میانی	---	۱/۱
طول دوره کشت	روز	۸۷	ضریب گیاهی مرحله پایانی	---	۰/۳
طول مرحله جوانه زنی	روز	۱۷	حداقل عمق ریشه	متر	۰/۰
طول مرحله توسعه	روز	۳۰	حداکثر عمق ریشه	متر	۰/۵
طول مرحله میانی	روز	۳۰	عملکرد پتانسیل	تن در هکتار	۱/۵
طول مرحله انتهایی	روز	۱۰	شاخص برداشت	---	۰/۳
شاخص سطح برگ در مرحله ابتدایی	---	۰/۵	شاخص پراکندگی ذرات	---	۰/۲
شاخص سطح برگ در مرحله میانی	---	۳/۵	فاکتور عرض ریشه	---	۰/۳
شاخص سطح برگ در مرحله انتهایی	---	۴/۰	ماکزیم عمق تبخیر از خاک	میلی متر	۱۵۰
ضریب گیاهی مرحله اولیه	---	۰/۴	رطوبت باقیمانده در خاک	مترمکعب بر مترمکعب	۰/۰۰۱
ضریب گیاهی مرحله رشد و توسعه	---	---	فشار نقطه ورود هوا به خاک	سانتی متر	۲۷

۲-۷-۲. اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی با استفاده از تیمارهای باقیمانده (با استفاده از پارامترهای واسنجی شده) انجام شد. اعتبارسنجی شامل مقایسه ماده خشک، عملکرد و رطوبت خاک شبیه سازی و مشاهده شده برای فصول ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، در دو سیستم آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه و برای سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی بود. عملکرد مدل با استفاده از پارامترهای آماری ضریب تعیین^۱ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده^۳ (NRMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف^۴ (NSE) و ضریب جرم باقیمانده^۵ (CRM) مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقادیر به ترتیب از روابط ۷ تا ۱۱ محاسبه می شود:

$$R^2 = \frac{\sum (y_o - y_{\bar{o}})(y_s - y_{\bar{s}})}{N(\sigma_{y_o} - \sigma_{y_s})} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_o - y_s)^2}{N}} \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_o - y_{\bar{s}})^2}{\sum (y_o - y_{\bar{o}})^2} \quad (10)$$

$$CRM = \frac{(\sum y_o - \sum y_s)}{\sum y_o} \quad (11)$$

که در آنها:

y_o مقدار مشاهده شده، y_s مقدار شبیه سازی شده، $y_{\bar{o}}$ مقدار میانگین مشاهده شده، $y_{\bar{s}}$ مقدار میانگین شبیه سازی شده، σ_{y_o} انحراف استاندارد داده های مشاهداتی، σ_{y_s} انحراف استاندارد داده های مشاهداتی و N تعداد کل داده ها است.

جهت دستیابی به یک همبستگی خوب مقادیر ضریب تعیین، RMSE و CRM می بایست به ترتیب ۱، صفر و صفر باشند. لازم به ذکر است NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشان دهنده ضعیف بودن مدل می باشد. شاخص نش-ساتکلیف معیاری از نسبت واریانس مقادیر مشاهداتی به شبیه سازی شده توسط مدل می باشد (Nash and Sutcliffe, 1970). این شاخص می تواند مقادیری بین منفی بی نهایت تا یک را

- Correlation of coefficient
- Root Mean Square Error
- Normalized Root Mean Square Error
- Nash sutcliffe
- Coefficient of Residual Mass

داشته باشد. بهترین مقدار این شاخص، یک است که نشان دهنده انطباق کامل مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه سازی توسط مدل می باشد.

تحلیل آماری

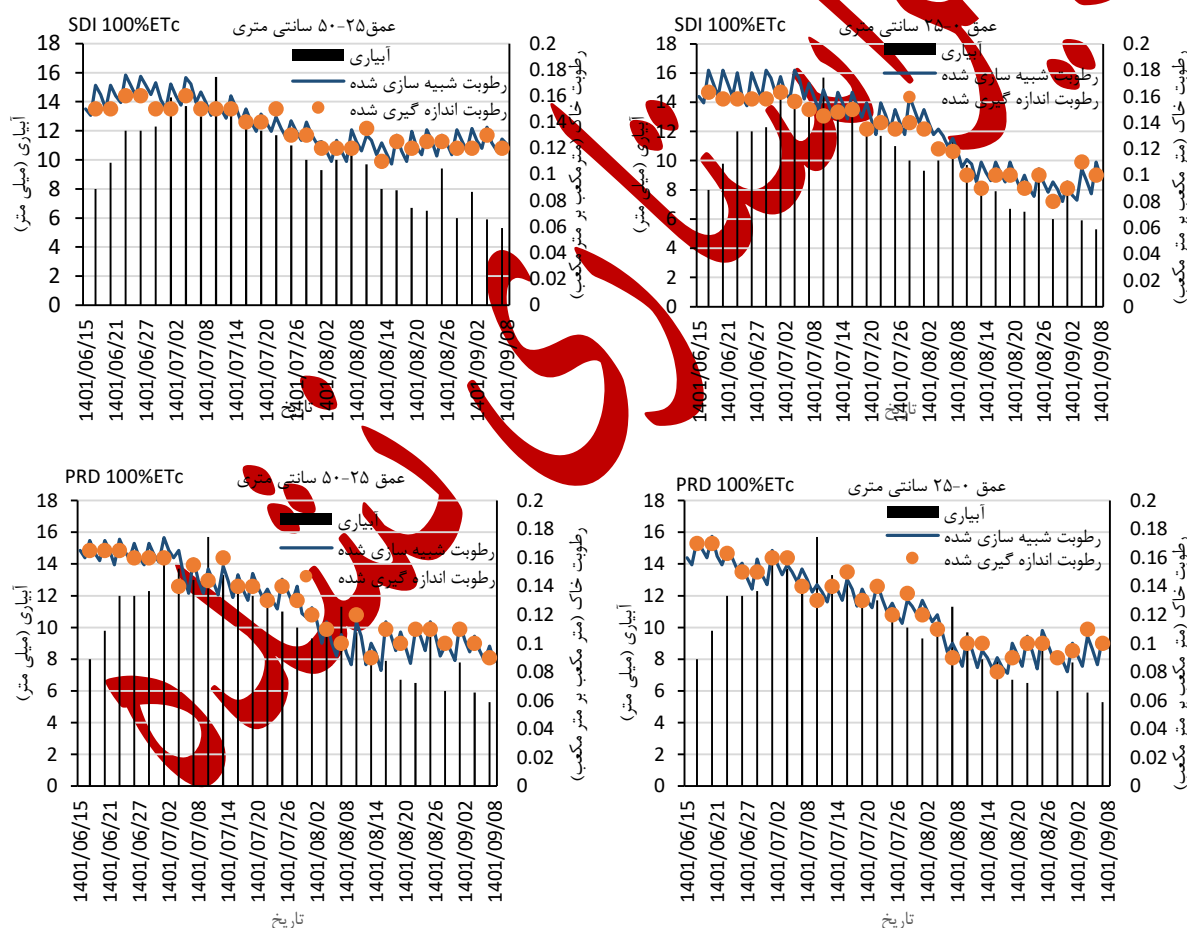
داده های به دست آمده در دو فصل زراعی با استفاده از نرم افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و برابری میانگین ها با آزمون چند دامنه ای دانکن مورد بررسی قرار گرفت (Duncan, 1955).

بحث و نتیجه گیری

واسنجی مدل

واسنجی رطوبت خاک

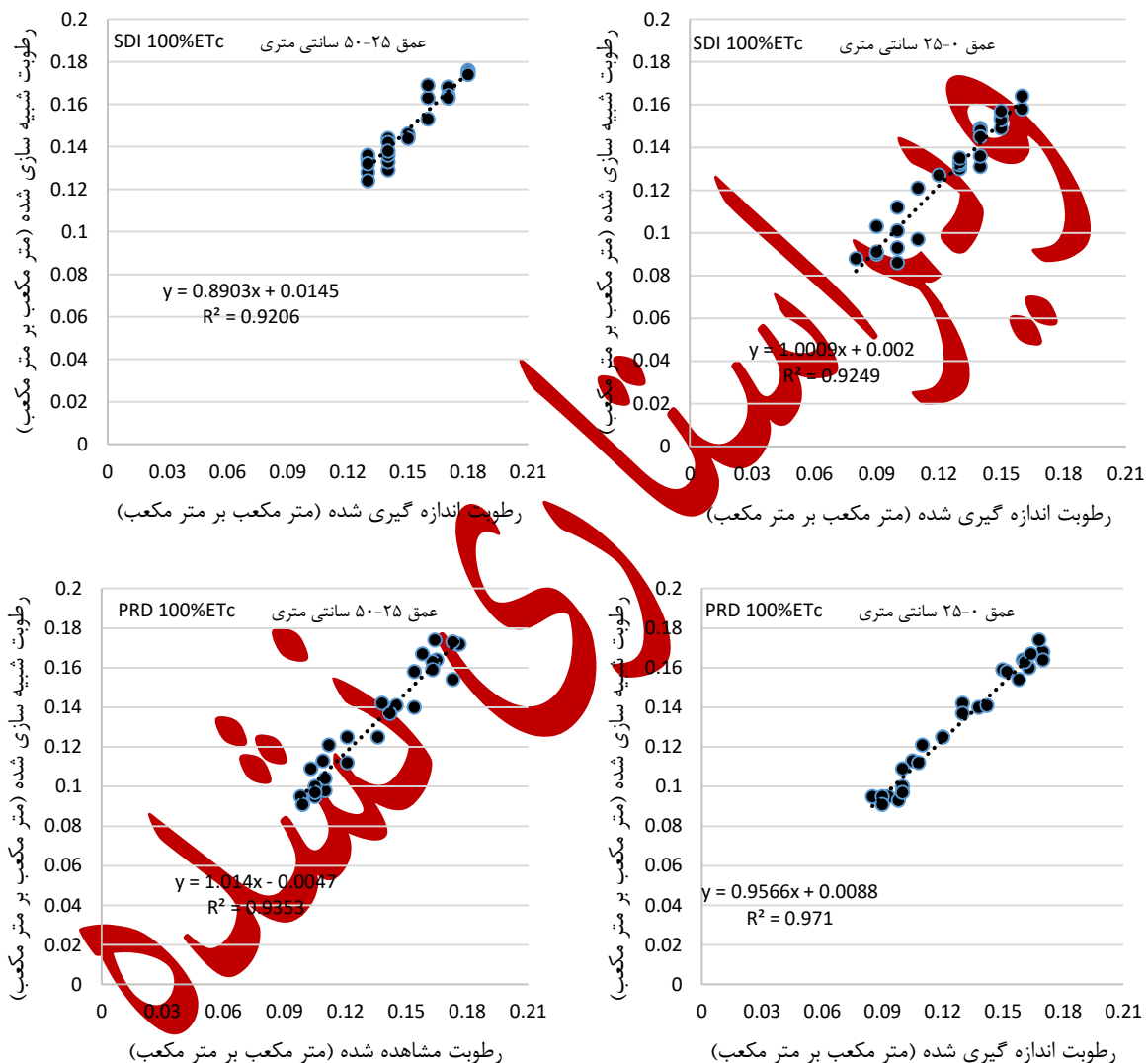
میزان رطوبت خاک شبیه سازی و اندازه گیری شده برای لایه های خاک ۰/۲۵-۰/۵۰ متر برای آبیاری کامل تحت شرایط آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در طول فصل ۱۴۰۱ مقایسه شد. شکل ۲ سری زمانی رطوبت خاک مشاهده شده و شبیه سازی شده را نشان می دهد. یک همبستگی قوی بین میزان رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده برای تیمارهای آبیاری وجود دارد (شکل ۲) و مقادیر شبیه سازی شده نزدیک به مقادیر مشاهده شده برای هر دو لایه خاک بود.



شکل ۲. رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده برای تیمار بدون تنش آبی در سیستم آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی متری در سال ۱۴۰۱

همبستگی بین رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. ضریب تعیین برای لایه ۰-۲۵ سانتی متری تحت آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه به ترتیب به ۰/۹۲۵ و ۰/۹۷۱ و برای لایه ۲۵-۵۰ سانتی متر تحت آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه به ترتیب به ۰/۹۲ و ۰/۹۳۵ بود. تفاوت معنی داری بین داده های رطوبت مشاهداتی و شبیه سازی شده در تمام لایه های خاک وجود نداشت. تغییرات رطوبت خاک در هر دو لایه به دلیل آبیاری مکرر

بسیار اندک است که رطوبت خاک را در مقدار بالایی نگه می‌دارد. RMSE محاسبه‌شده در لایه‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۸ (متر مکعب بر متر مکعب) در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه بود. NRMSE محاسبه‌شده در لایه‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۵ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و ۰/۰۲۱ و ۰/۰۲۶ در سیستم آبیاری بخشی ریشه بود. NSE محاسبه‌شده در لایه‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۸ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و ۰/۶۹ و ۰/۷۱ در سیستم آبیاری بخشی ریشه بود. مقادیر CRM در لایه‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری به ترتیب ۰/۱۶- و ۰/۱۳- در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و ۰/۰۲- و ۰/۰۲- در سیستم آبیاری بخشی ریشه بود. نتایج نشان می‌دهد مدل به خوبی واسنجی و از پارامترهای آن می‌توان برای اعتبار سنجی استفاده کرد.



شکل ۳. همبستگی رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده در تیمار بدون تنش آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری در سال ۱۴۰۱

واسنجی عملکرد و ماده خشک

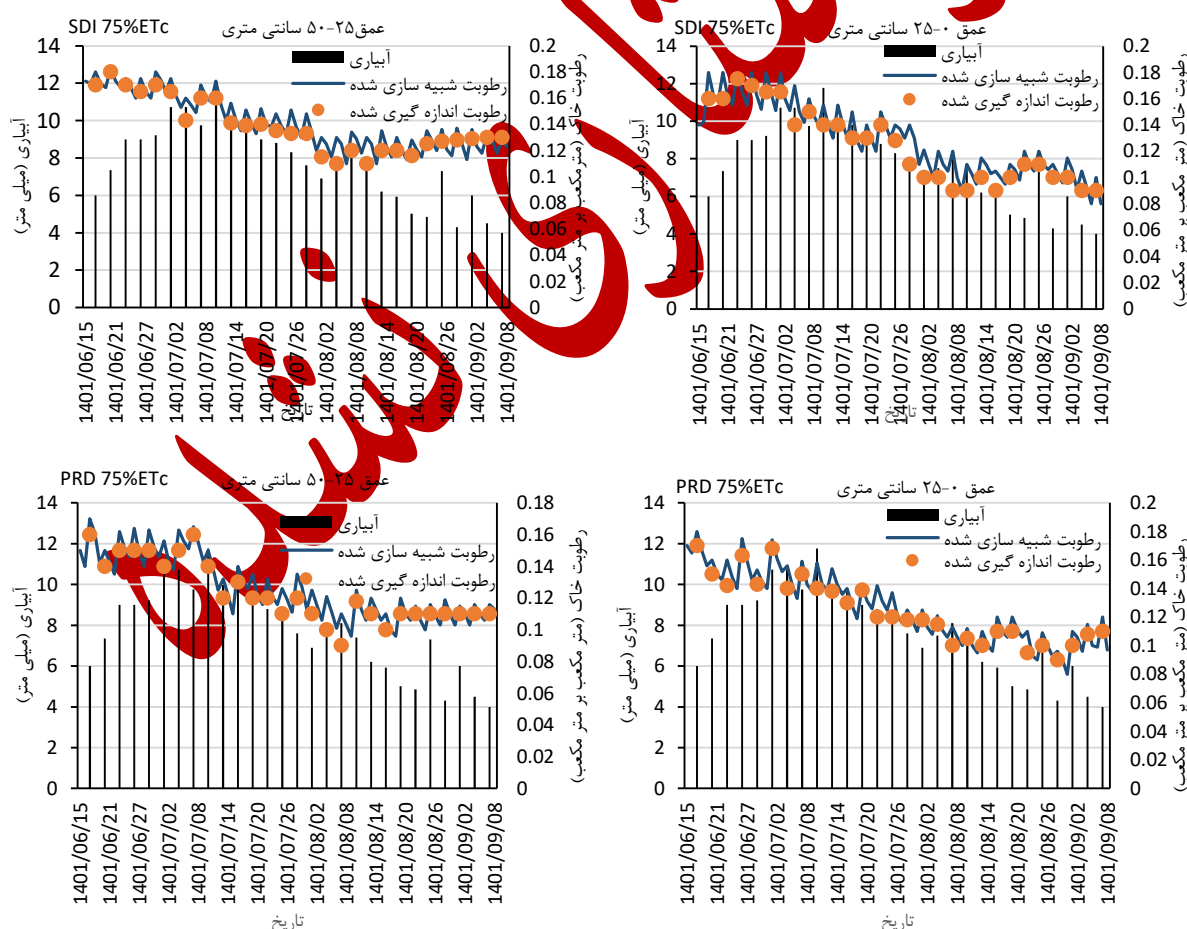
عملکرد و ماده خشک کل برای تیمار آبیاری کامل در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه با تنظیم دقیق پارامترهای رشد محصول (مانند راندمان فتوسنتز) کالیبره شدند. مدل همبستگی خوبی بین عملکرد مشاهده شده (۱/۱۰۷ و ۱/۲۷۳ تن در هکتار) و عملکرد شبیه سازی شده (۱/۱۷۷ و ۱/۲۱۷ تن در هکتار) با انحراف کم (۰/۸۹۵- و ۱/۶۴ درصد) به ترتیب برای آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه نشان داد. علاوه بر این، کل ماده خشک تولیدی با اختلاف ۰/۷۲- و ۰/۹۳ درصد

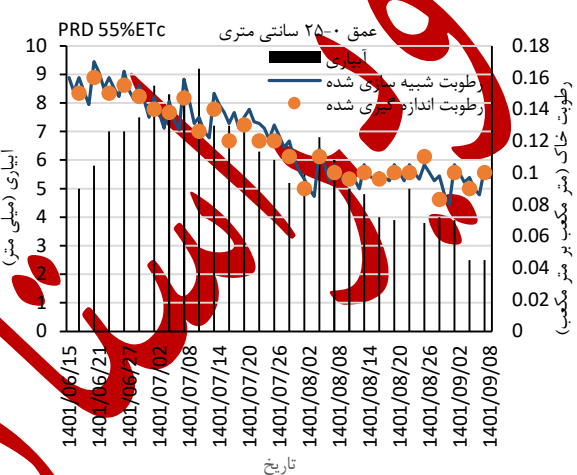
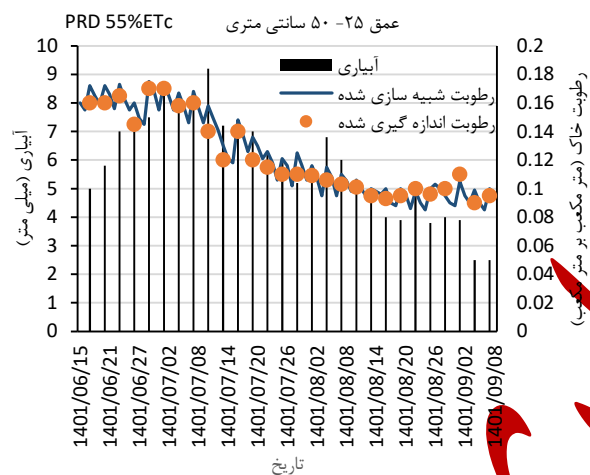
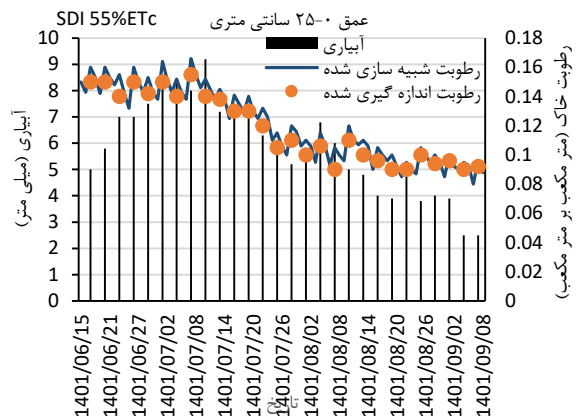
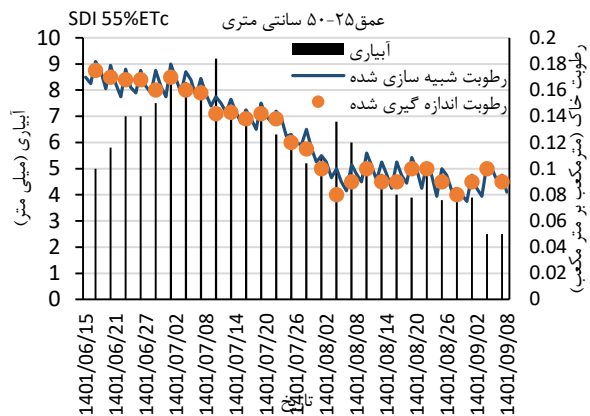
بین مقادیر مشاهده شده (۲/۱۷۶ و ۲/۲۷۲ تن در هکتار) و مقادیر شبیه سازی شده (۲/۱۹۲ و ۲/۲۵۱ تن در هکتار) به ترتیب برای آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه کالیبره شد. بنابراین مدل با موفقیت کالیبره و از پارامترهای آن می‌توان برای اعتبارسنجی استفاده کرد.

تأثیر سیستم های آبیاری، رژیم آب و اعتبارسنجی مدل

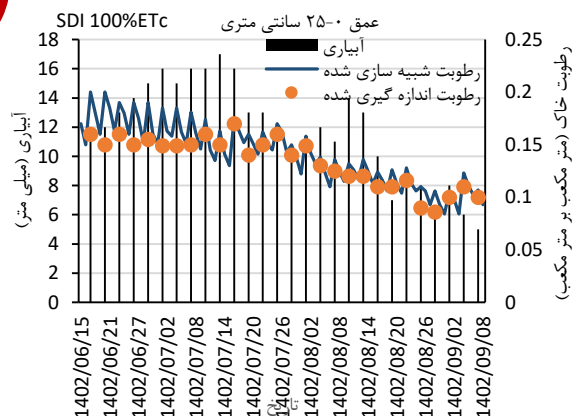
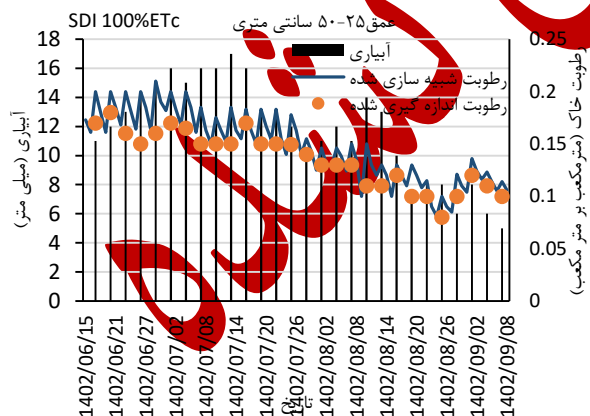
میزان رطوبت خاک

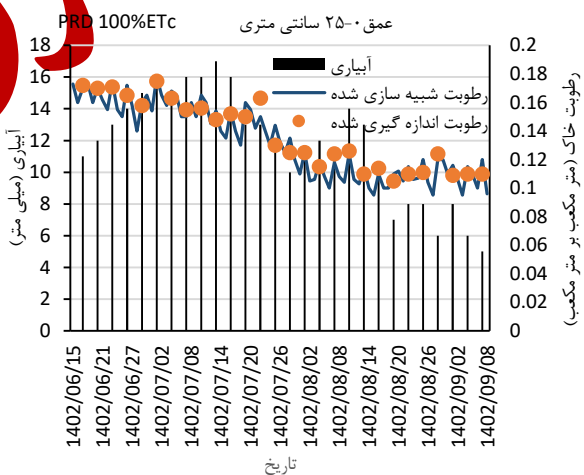
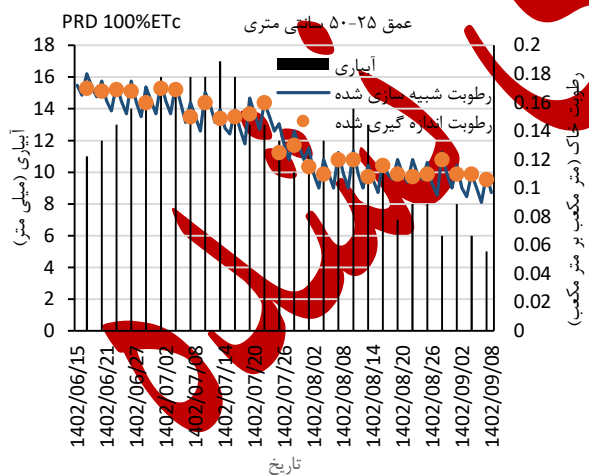
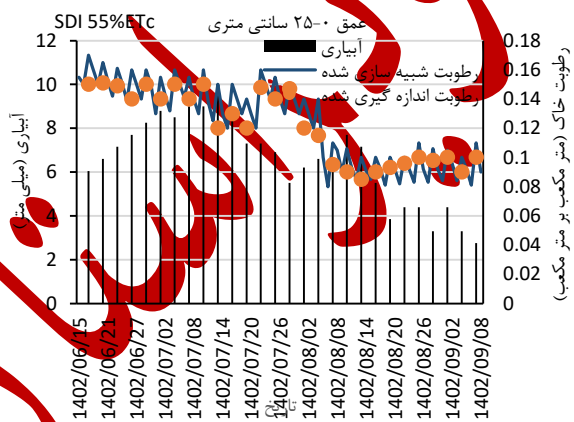
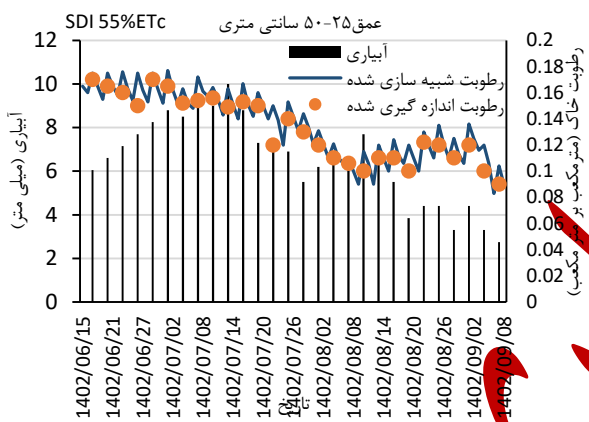
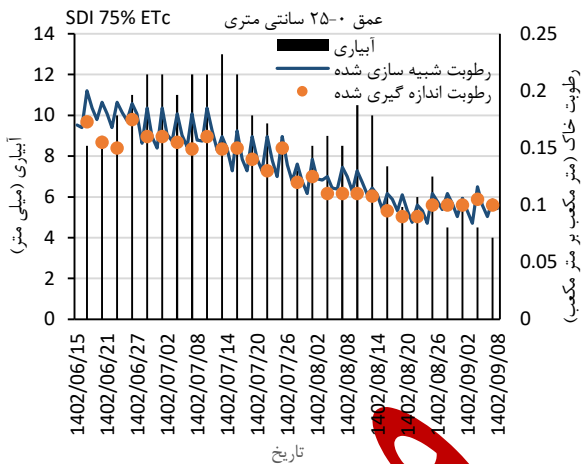
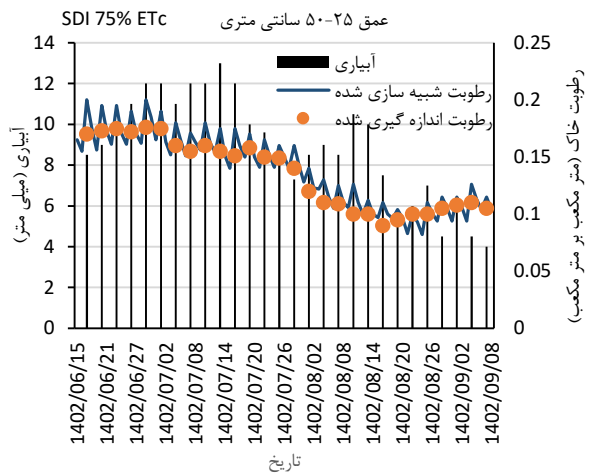
اعتبارسنجی مدل SALT MED بر روی تیمارهای باقیمانده، به جز تیماری که جهت واسنجی استفاده شد (۱۰۰ درصد نیاز آبی در سال زراعی ۱۴۰۱) با مقایسه بین داده‌های مشاهده شده رطوبت خاک، عملکرد و ماده خشک کل برای تیمار ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سال زراعی ۱۴۰۲ برای هر دو سیستم آبیاری انجام گرفت. در تمام تیمارها، رطوبت خاک در لایه بالایی پروفیل خاک (۰-۲۵ سانتی‌متر) در مقایسه با لایه پائینی (۲۵-۵۰ سانتی‌متر) کمتر بود؛ زیرا لایه بالایی آب بیشتری نسبت به لایه پائینی از طریق تبخیر از سطح خاک از دست می‌دهد، که با نتایج Hirich و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد. رطوبت خاک در طول دو فصل به دلیل جذب آب توسط ریشه گیاهان روند کاهشی داشت. در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، رطوبت خاک در سیستم آبیاری بخشی ریشه در مقایسه با سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی برای هر دو لایه بیشتر بود. این ممکن است به دلیل کاهش مساحت ناحیه آبیاری شده سیستم آبیاری بخشی ریشه در مقایسه با سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی باشد. شکل‌های ۴ و ۵، سری زمانی تغییرات رطوبت خاک بین مقادیر مشاهده و شبیه سازی شده در تیمارهای ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی را در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

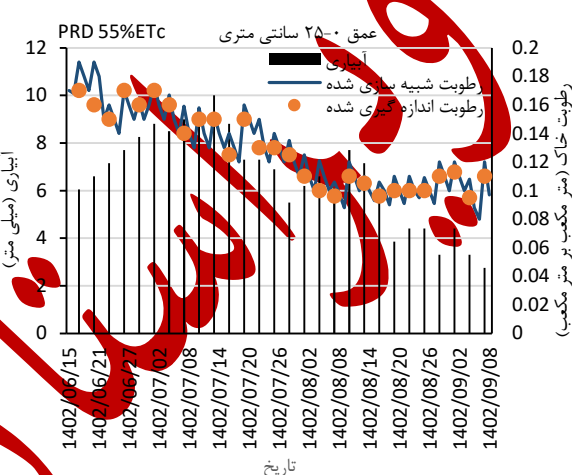
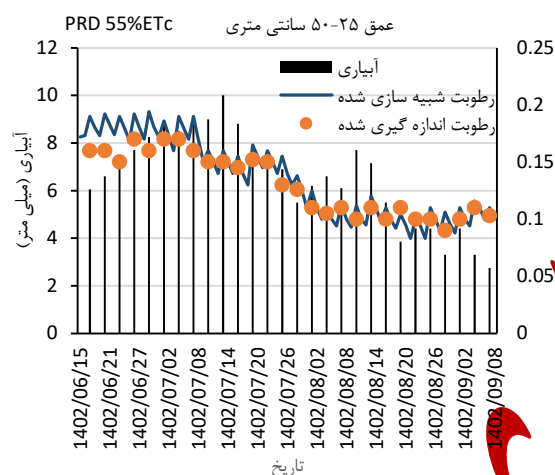
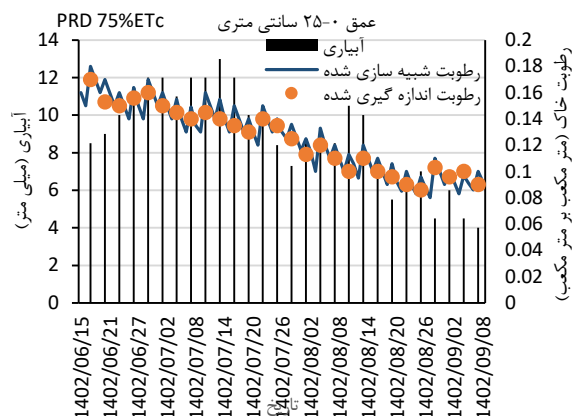
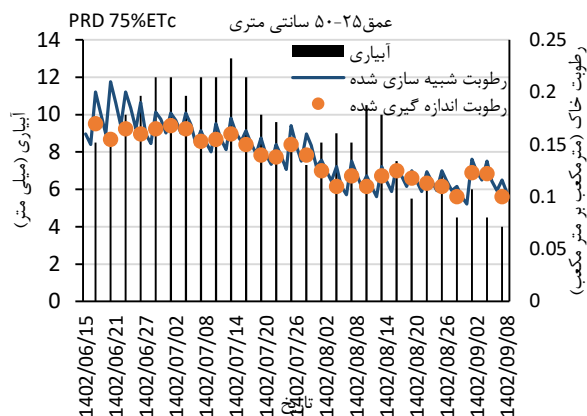




شکل ۴. رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده (بعد از اعتبار سنجی مدل) برای تیمار ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی متری در سال ۱۴۰۱

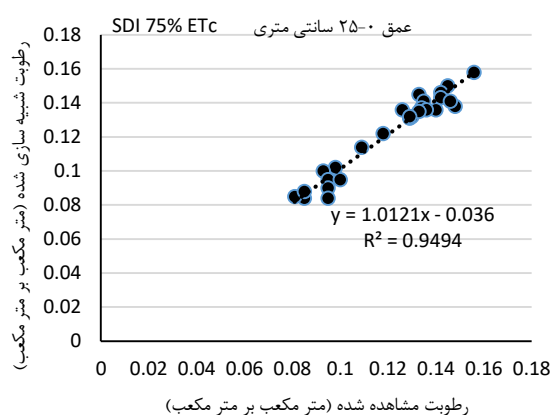
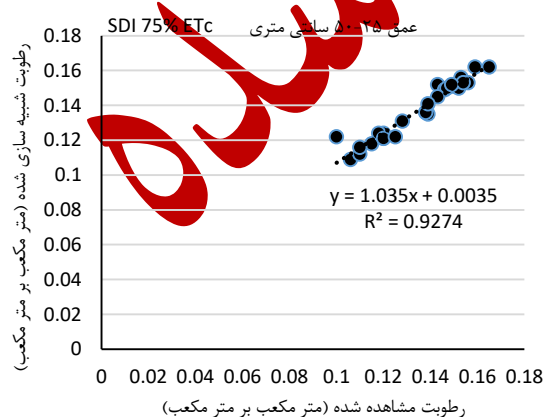


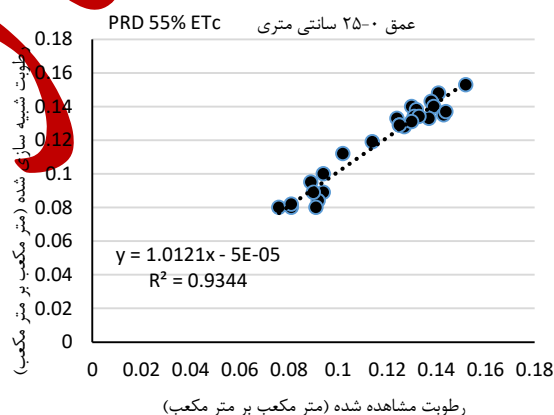
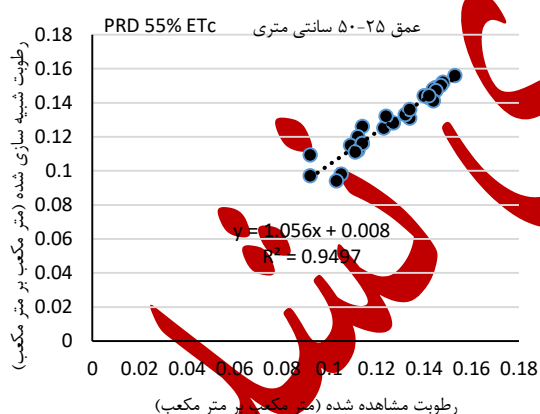
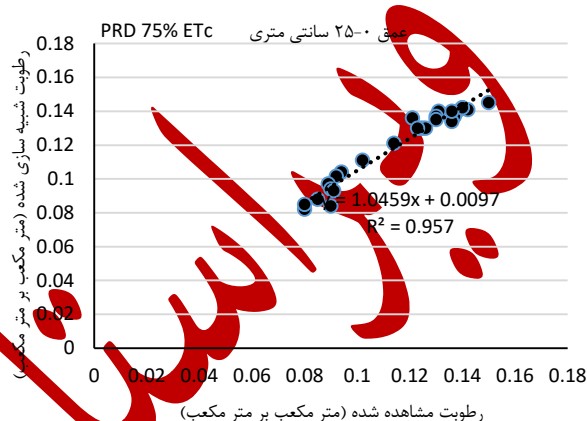
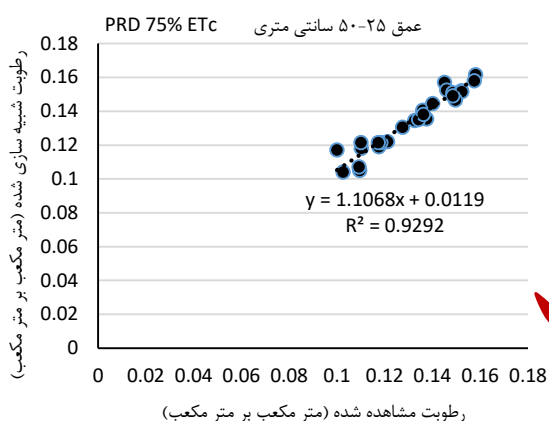
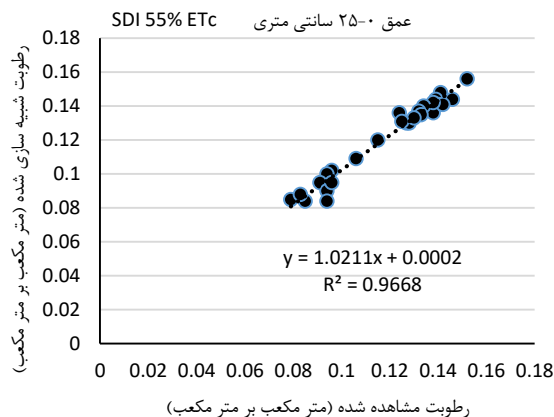
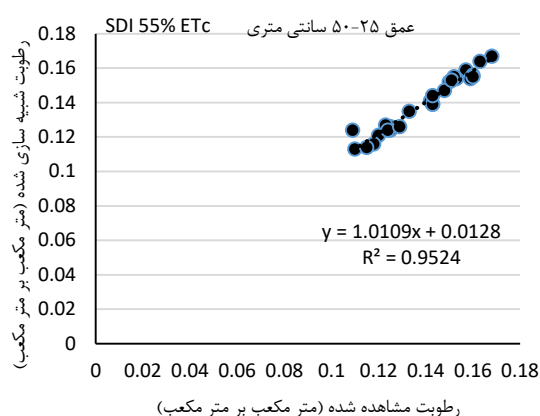




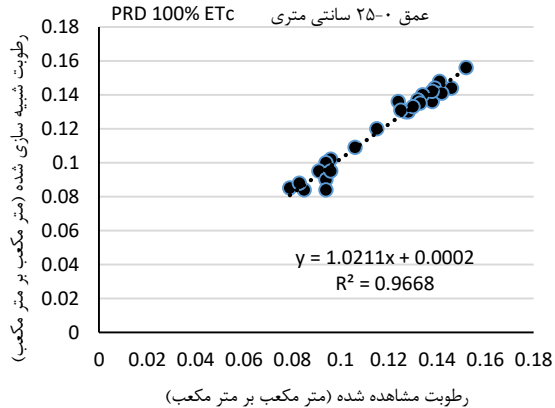
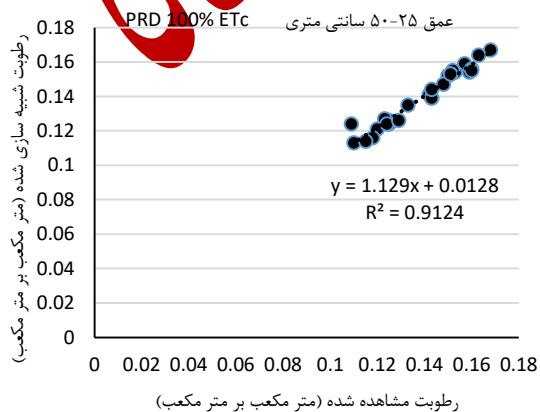
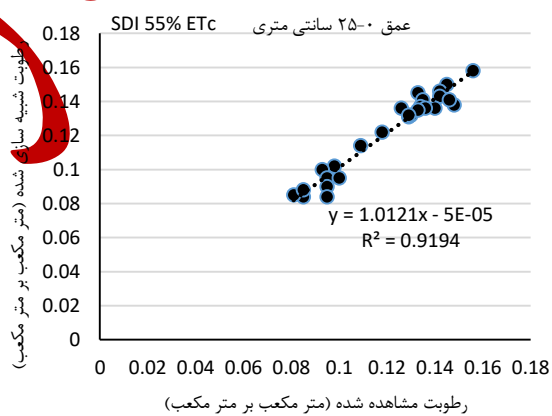
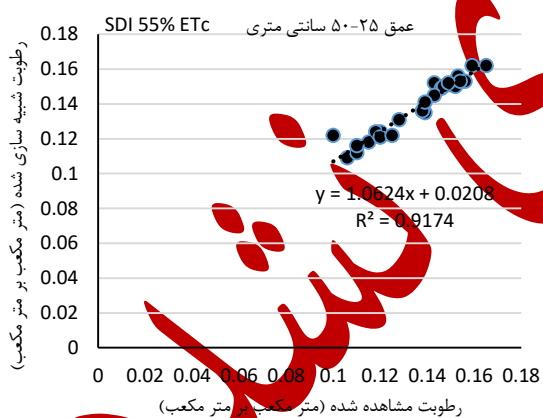
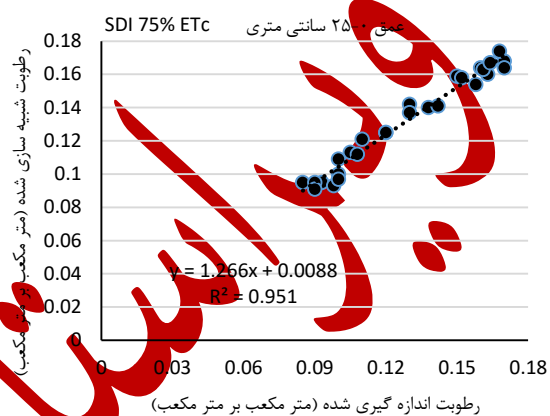
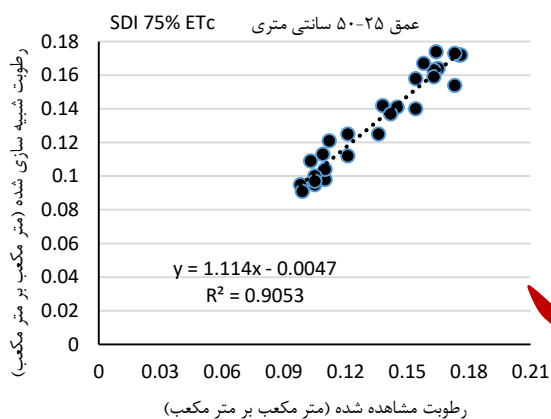
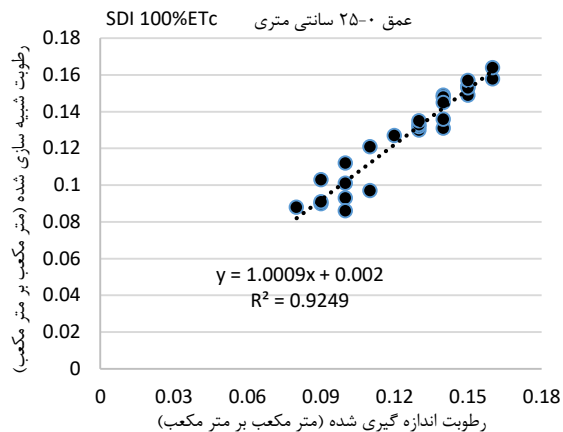
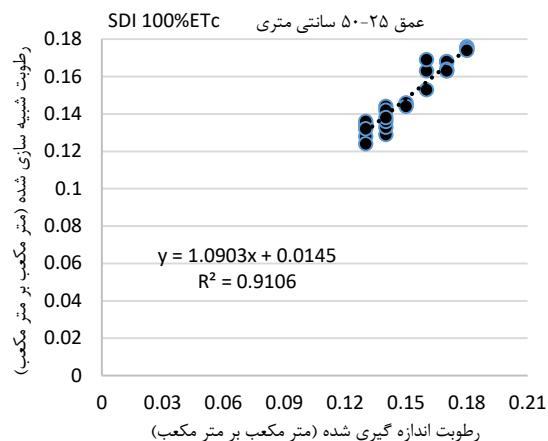
شکل ۵. رطوبت خاک اندازه گیری و شبیه سازی شده (بعد از اعتبار سنجی مدل) برای تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۲۵- و ۵۰- سانتی متری در سال ۱۴۰۲

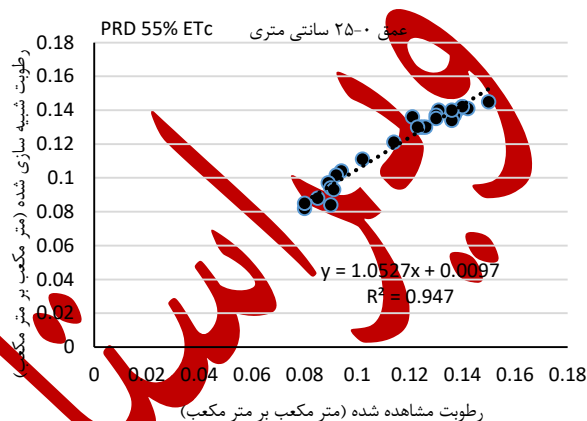
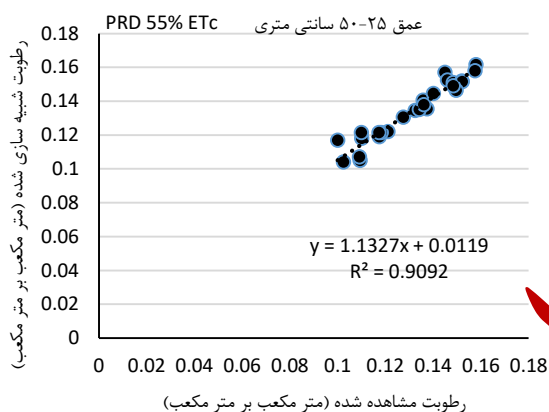
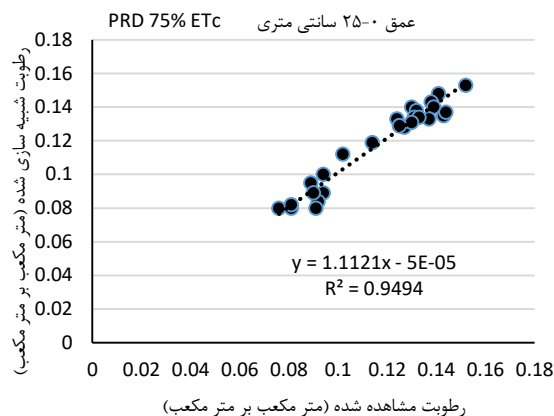
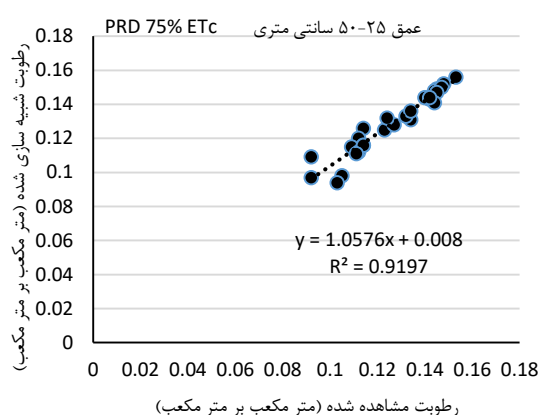
به طور کلی، مدل همبستگی خوبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه سازی شده برای همه تیمارها نشان داد. مطابق اشکال ۶ و ۷ ضریب تعیین در هر دو سیستم آبیاری و با هر میزان آبیاری بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۶۶ قرار داشت که با نتایج سایر محققین همخوانی دارد (Kaya et al., 2015; Ragnab et al., 2015; Afzal et al., 2016; El-Shafaie et al., 2017).





شکل ۶. همبستگی بین رطوبت خاک مشاهده و شبیه سازی شده (بعد از اعتبار سنجی مدل) برای تیمارهای ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۲۵-۰ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری در سال ۱۴۰۱





شکل ۷. همبستگی بین رطوبت خاک مشاهده و شبیه سازی شده (بعد از اعتبار سنجی مدل) برای تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متری در سال ۱۴۰۲

شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE، NSE و CRM در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر RMSE (بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۱۳)، NRMSE (بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۴۸)، NSE (بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۴) و CRM (بین -۰/۰۰۲ تا -۰/۰۳۶) برای هر دو لایه و تمام تیمارهای آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی) تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در هر دو فصل نشان می‌دهد که همبستگی خوبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده وجود دارد. نتایج اعتبارسنجی، همچنین قابلیت و کارایی مدل را برای شبیه‌سازی رطوبت آب خاک تحت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه تأیید کرد.

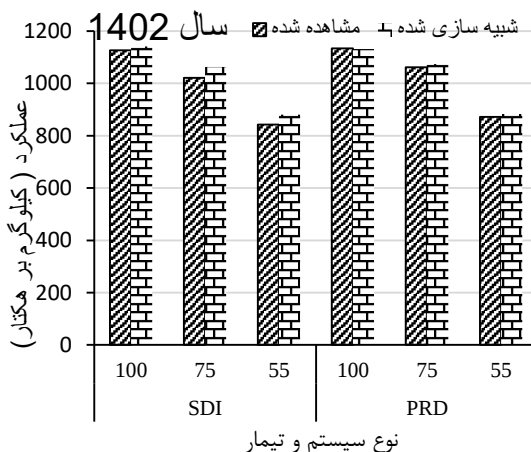
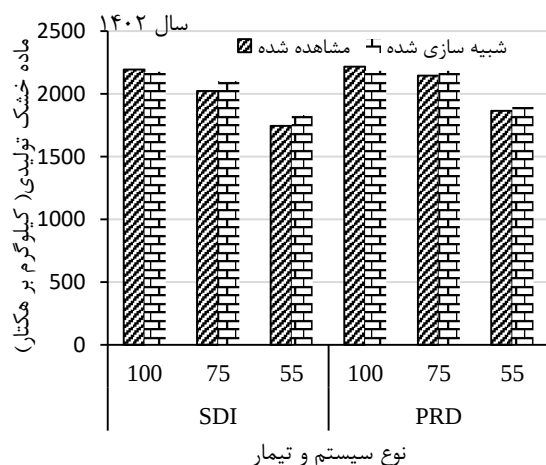
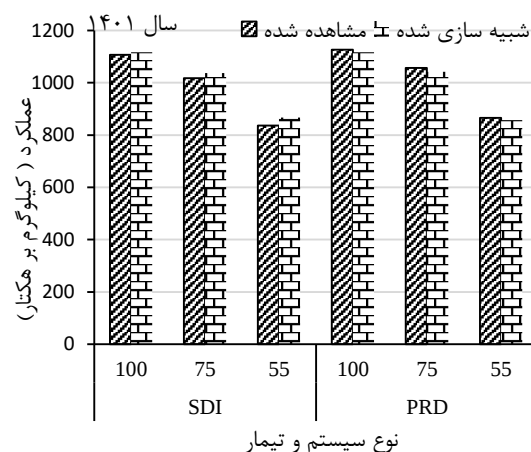
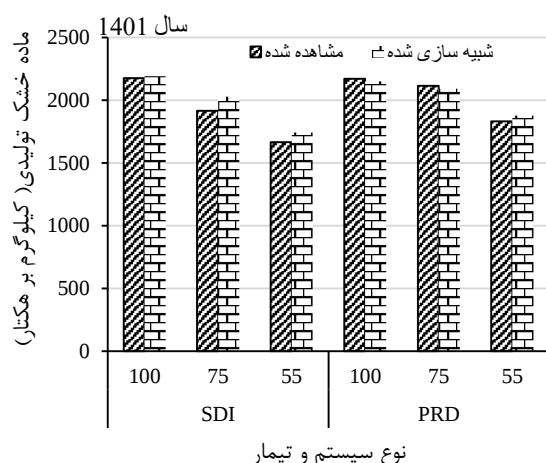
جدول ۴. ضریب همبستگی، RMSE، NRMSE، NSE و CRM برای رطوبت خاک در هر دو لایه و تیمارهای آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

فصل	نوع سیستم	ET _c (%)	عمق لایه‌ها (سانتی‌متر)									
			۲۵-۵۰					۰-۲۵				
			CRM	NSE	NRMSE	RMSE	R ²	CRM	NSE	NRMSE	RMSE	R ²
۱۴۰۱	SDI	۱۰۰	-۰/۰۱۳	۰/۶۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	۰/۹۲	-۰/۰۱۶	۰/۶۵	۰/۰۲۳	۰/۰۰۷	۰/۹۲۵
		۷۵	-۰/۰۱۶	۰/۶۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۹۲۷	-۰/۰۱۱	۰/۶۳	۰/۰۴۲	۰/۰۱۵	۰/۹۵۰
		۵۵	-۰/۰۰۲	۰/۶۹	۰/۰۲۰	۰/۰۰۷	۰/۹۵۲	-۰/۰۱۲	۰/۶۸	۰/۰۴۸	۰/۰۱۷	۰/۹۶۶
	PRD	۱۰۰	-۰/۰۰۲	۰/۷۱	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸	۰/۹۳۵	-۰/۰۲۵	۰/۶۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۷	۰/۹۷۱
		۷۵	-۰/۰۰۲	۰/۷۰	۰/۰۲۳	۰/۰۰۸	۰/۹۲۹	-۰/۰۲۳	۰/۷۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۵۷
		۵۵	-۰/۰۰۲	۰/۶۹	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۵	-۰/۰۳۶	۰/۶۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶	۰/۹۳۴
۱۴۰۲	SDI	۱۰۰	-۰/۰۶۳	۰/۶۹	۰/۰۲۷	۰/۰۱	۰/۹۱	-۰/۰۲۴	۰/۶۴	۰/۰۲۹	۰/۰۱	۰/۹۲۵
		۷۵	-۰/۰۰۲	۰/۷۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۹۰۵	-۰/۰۲۱	۰/۶۵	۰/۰۳۶	۰/۰۱۳	۰/۹۵۱
		۵۵	-۰/۰۰۶	۰/۷۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰۸	۰/۹۱۷	-۰/۰۰۵	۰/۶۱	۰/۰۲۹	۰/۰۰۲	۰/۹۱۹
	PRD	۱۰۰	-۰/۰۳۲	۰/۷۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۱۲	-۰/۰۲۳	۰/۷۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰۸	۰/۹۶۶

۰/۰۱۷	۰/۷۴	۰/۰۳۷	۰/۰۰۹	۰/۹۱۹	۰/۰۰۳	۰/۷۳	۰/۰۲۸	۰/۰۰۹	۰/۹۵۰	۷۵		
۰/۰۲۱	۰/۷۰	۰/۰۲۷	۰/۰۱	۰/۹۰۹	۰/۰۳۲	۰/۷۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰/۹۴۷	۵۵		

عملکرد عدس و ماده خشک

شکل ۸ عملکرد و ماده خشک تولیدی عدس را در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه نشان می‌دهد. مطابق این شکل تأثیر سیستم آبیاری و تیمارهای آبیاری روی عملکرد و ماده خشک تولیدی در هر دو فصل یکسان می‌باشد. بیشترین مقدار عملکرد و ماده خشک تولیدی در ۱۰۰ درصد نیاز آبی (بدون کم آبیاری) و کمترین مقادیر مربوط به ۵۵ درصد نیاز آبی (۴۵ درصد کم آبیاری) در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه به دست آمد. بیشترین مقدار عملکرد ۱/۲۳۷ و ۱/۲۴۴ تن در هکتار و بیشترین مقدار ماده خشک تولیدی ۲/۲۷۲ و ۲/۳۱۷ تن در هکتار در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و در روش آبیاری بخشی ریشه برای فصول ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ بود؛ در حالی که کمترین مقدار عملکرد و ماده خشک تولیدی ۰/۸۳۶ و ۱/۶۶۷ تن در هکتار در سال اول و ۰/۸۴۲ و ۱/۷۴۴ تن در هکتار در سال دوم در تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی و در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. کاهش عملکرد و ماده خشک تولیدی در اثر اعمال تیمارها مربوط به کمبود رطوبت خاک است که سبب کاهش فتوسنتز و در نهایت عملکرد گیاه می‌شود.



شکل ۸. عملکرد و ماده خشک تولیدی عدس در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه و تیمارهای آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی گیاه در سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، مدل همبستگی خوبی در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بین عملکرد مشاهده شده و عملکرد شبیه سازی شده با انحرافات کم در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه نشان داد. علاوه بر این، در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بین ماده خشک تولیدی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در دو سیستم انحراف کمی در هر دو سال زراعی

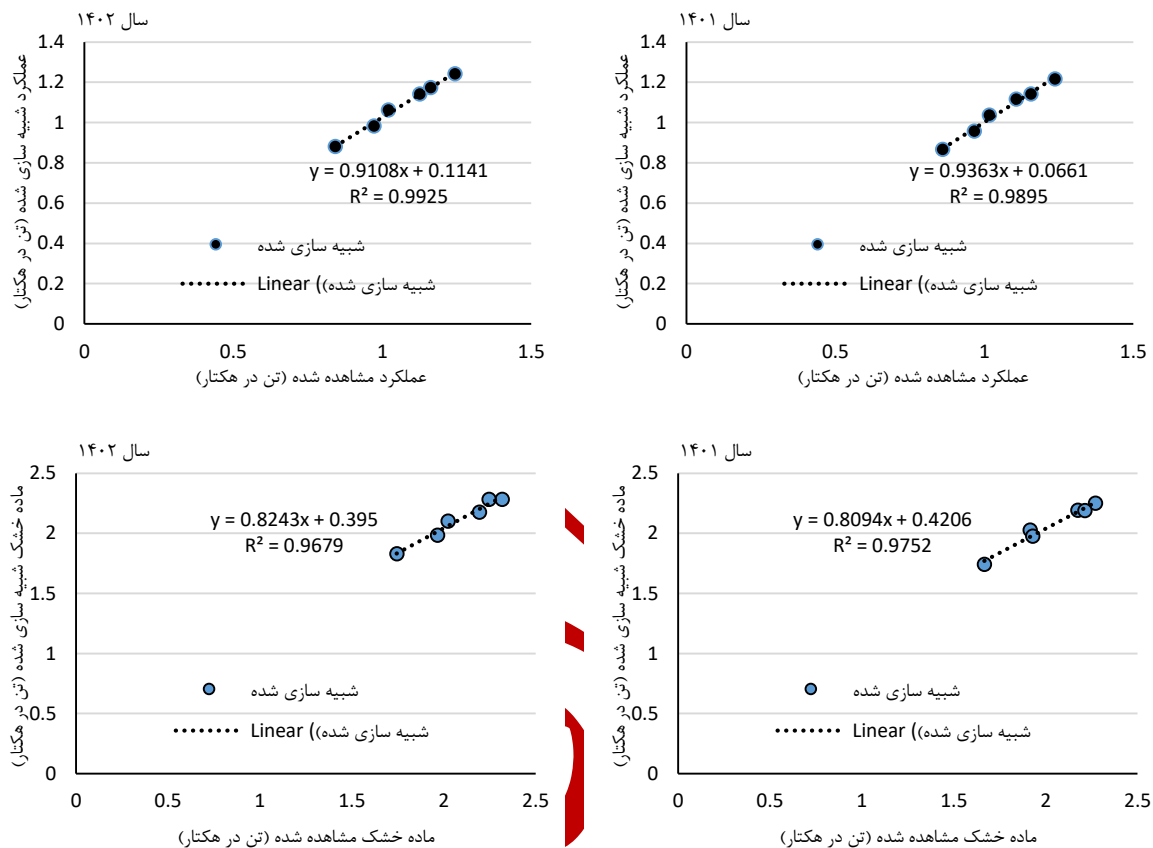
وجود داشت. جدول ۵ تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده عملکرد و ماده خشک را برای تمام تیمارهای آب اعمال شده تحت هر دو سیستم آبیاری برای فصل های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نشان می دهد.

جدول ۵. عملکرد و ماده خشک تولیدی عدس در سیستم آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در اثر اعمال تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی

سال	نوع سیستم	ET _c (%)	عملکرد (تن در هکتار)			ماده خشک تولیدی (تن در هکتار)		
			مشاهده شده	تنبیه سازی شده	اختلاف نسبی (درصد)	مشاهده شده	تنبیه سازی شده	اختلاف نسبی (درصد)
۱۴۰۱	SDI	۱۰۰	۱/۱۰۷	۱/۱۱۷	-۰/۸۹۵	۲/۱۷۶	۲/۱۹۲	-۰/۷۲۹
		۷۵	۱/۰۱۷	۱/۰۳۷	-۱/۹۲۸	۱/۹۱۷	۲/۰۲۷	-۵/۴۲۶
		۵۵	۰/۸۳۶	۰/۸۶۷	-۳/۵۷۵	۱/۶۶۷	۱/۷۴۲	-۴/۳۰۵
	PRD	۱۰۰	۱/۲۳۷	۱/۲۱۷	۱/۶۴۳	۲/۲۷۲	۲/۲۵۱	۰/۹۳۲
		۷۵	۱/۱۵۷	۱/۱۴۲	۱/۳۱۳	۲/۲۱۴	۲/۱۹۱	۱/۰۴۹
		۵۵	۰/۹۶۶	۰/۹۵۷	۰/۹۴۰	۱/۹۳۱	۱/۹۷۷	-۲/۳۲۶
RMSE (تن بر هکتار)			۰/۰۱۹			۰/۰۱۹		
NRMSE (بدون بعد)			۰/۰۹۹			۰/۰۵۳		
NSE (بدون بعد)			۰/۷۶			۰/۷۸		
CRM (بدون بعد)			-۰/۰۰۲۶۸			-۰/۰۱۶۶۷		
R ² (بدون بعد)			۰/۹۹۴۷			۰/۹۸۷۵		
۱۴۰۲	SDI	۱۰۰	۱/۱۲۶	۱/۱۴۱	-۱/۳۱۴	۲/۱۹۴	۲/۱۷۶	۰/۸۲۷
		۷۵	۱/۰۲۱	۱/۰۶۳	-۳/۹۵۱	۲/۰۲۳	۲/۱۰۳	-۳/۸۰۴
		۵۵	۰/۸۴۲	۰/۸۸۱	-۴/۴۲۶	۱/۷۴۴	۱/۸۳۱	-۴/۷۵۱
	PRD	۱۰۰	۱/۲۴۴	۱/۲۴۲	۰/۱۶۱	۲/۳۱۷	۲/۲۸۵	۱/۴۰۰
		۷۵	۱/۱۶۲	۱/۱۷۴	-۱/۰۲۲	۲/۲۴۶	۲/۲۸۴	-۱/۶۶۳
		۵۵	۰/۹۷۲	۰/۹۸۳	-۱/۱۱۹	۱/۹۶۶	۱/۹۸۶	-۱/۰۰۷
RMSE (تن بر هکتار)			۰/۰۱۷۷			۰/۰۵۳۴		
NRMSE (بدون بعد)			۰/۰۵۵			۰/۰۹۳		
NSE (بدون بعد)			۰/۷۵			۰/۷۷		
CRM (بدون بعد)			-۰/۰۱۸۳۷			-۰/۰۱۴۰۱		
R ² (بدون بعد)			۰/۹۹۶۲			۰/۹۸۳۸		

مدل همبستگی خوبی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده نشان داد. عملکردهای شبیه سازی شده در تمام تیمارها در سیستم آبیاری قطره ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه نزدیک به مقادیر مشاهده شده بود. در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، ضریب همبستگی عملکرد ۰/۹۹۴۷ و ۰/۹۹۶۲ و ماده خشک تولیدی ۰/۹۸۷۵ و ۰/۹۸۳۸ بود (شکل ۹). اختلاف نسبی بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده عملکرد و ماده خشک تولیدی در سال های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب بین ۱/۳۱۳ و -۴/۴۲۶ درصد برای عملکرد و ۰/۸۲۷ و -۴/۷۵۱ درصد برای ماده خشک بود. علاوه بر این، RMSE نشان داد که درجه بسیار خوبی از تطابق بین داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده وجود دارد. در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، RMSE به ترتیب برای عملکرد ۰/۰۱۹ و ۰/۰۱۷ و برای ماده خشک تولیدی ۰/۰۱۹ و ۰/۰۵۳۴ بود. در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، NRMSE به ترتیب برای عملکرد ۰/۰۹۹ و ۰/۰۵۵ و برای ماده خشک تولیدی ۰/۰۵۳ و ۰/۰۹۳ بود؛ که همگی کمتر از ۱۰ درصد بودند که بیانگر این است که صحت مدل Saltmed در شبیه سازی عملکرد در دسته عالی قرار دارد. در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، NSE به ترتیب

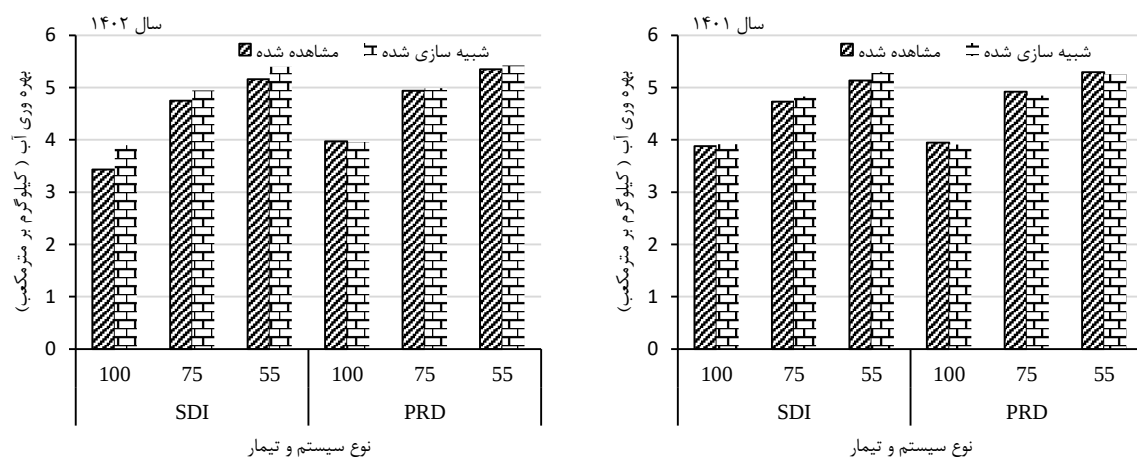
برای عملکرد ۰/۷۶ و ۰/۷۵ و برای ماده خشک تولیدی ۰/۷۷ و ۰/۷۸ بود؛ که نشان دهنده کارایی خوب مدل می‌باشد. CRM نشان می‌دهد که مدل مقادیر مشاهده شده را ۰/۰۰۲۶۸- و ۰/۰۱۸۳۷- برای عملکرد و ۰/۰۱۶۶۷- و ۰/۰۱۴۰۱- برای ماده خشک را به ترتیب در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ کمی کمتر برآورد کرده است. با این حال، مقادیر CRM نشان می‌دهد این اختلاف ناچیز است؛ که با نتایج Pulvento و همکاران (۲۰۱۳)، Afzal و همکاران (۲۰۱۶)، Cosic و همکاران (۲۰۱۷) و El-Shafie و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی بالایی دارد.



شکل ۹. همبستگی بین عملکرد (تن بر هکتار) و ماده خشک تولیدی (تن بر هکتار) در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

۳-۳. بهره‌وری آب عدس

بهره‌وری آب به صورت مقدار عملکرد قابل فروش بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب آب آبیاری مصرفی بیان می‌شود. شکل ۱۰ بهره‌وری آب عدس را برای دو فصل ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. بهره‌وری آب عدس در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در سه تیمار ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

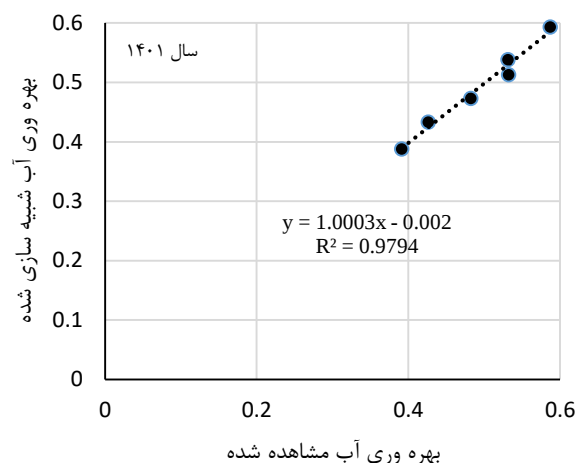
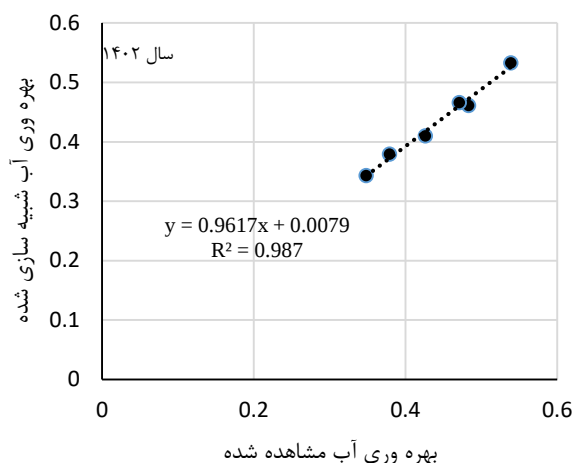
بهره‌وری آب در دو فصل آزمایش روند مشابهی را دنبال کرد. تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی بیشترین مقدار و پس از آن تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و سپس تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی کمترین مقدار را در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه داشت. عملکرد و بهره‌وری آب در روش آبیاری بخشی ریشه کمی بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی در هر دو فصل بود. جدول ۶ بهره‌وری آب آبیاری مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و اختلاف نسبی آن و شاخص‌های آماری را در هر دو فصل نشان می‌دهد.

جدول ۶. بهره‌وری آب آبیاری مشاهده و شبیه‌سازی شده (کیلوگرم بر متر مکعب) عدس در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

سال ۱۴۰۲				سال ۱۴۰۱				ETc (%)	سیستم آبیاری
اختلاف نسبی (درصد)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)		مقدار آبیاری (مترمکعب)	اختلاف نسبی (درصد)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)		مقدار آبیاری (مترمکعب)		
	مشاهده شده	شبیه سازی شده			مشاهده شده	شبیه سازی شده			
-۱/۴۳۷	۰/۳۴۸	۰/۳۴۳ ^d	۳۲۸۰	-۰/۷۶۷	۰/۳۹۱	۰/۳۸۸ ^d	۲۸۵۶	۱۰۰	SDI
-۳/۷۵۶	۰/۴۲۶	۰/۴۱۰ ^c	۲۴۹۳	-۱/۸۶۷	۰/۴۸۲	۰/۴۷۳ ^c	۲۱۵۰	۷۵	
-۴/۵۵۵	۰/۴۸۳	۰/۴۶۱ ^b	۱۸۲۵	-۳/۵۷۱	۰/۵۳۲	۰/۵۳۱ ^b	۱۶۳۰	۵۵	
۰	۰/۳۷۹	۰/۳۷۹ ^c	۳۲۸۰	۱/۶۴۳	۰/۴۲۶	۰/۴۳۳ ^c	۲۸۵۶	۱۰۰	PRD
-۱/۰۶۲	۰/۴۷۱	۰/۴۶۶ ^b	۲۴۹۳	۱/۳۱۸	۰/۵۳۱	۰/۵۳۸ ^b	۲۱۵۰	۷۵	
-۱/۱۱۳	۰/۵۳۹	۰/۵۳۳ ^a	۱۸۲۵	۱/۰۲۲	۰/۵۸۷	۰/۵۹۳ ^a	۱۶۳۰	۵۵	
۰/۰۱۱۷۳				۰/۰۰۹۸۷				RMSE (تن بر هکتار)	
۰/۰۶۱۷				۰/۰۴۸۱				NRMSE (بدون بعد)	
۰/۸۰				۰/۸۳				NSE (بدون بعد)	
-۰/۰۲۰۸۳				-۰/۰۰۳۷۴				CRM (بدون بعد)	
۰/۹۸۷				۰/۹۷۹				R ² (بدون بعد)	

حروف کوچک انگلیسی بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد بین تیمارها می‌باشد.

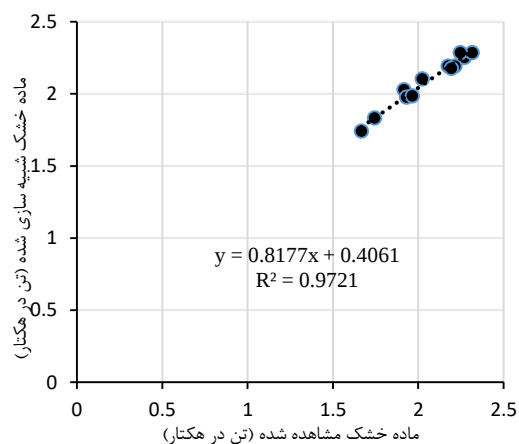
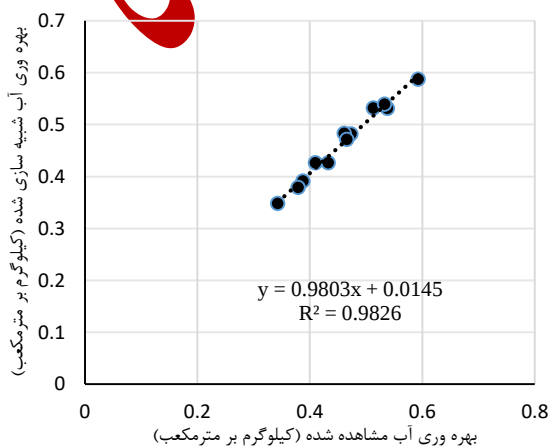
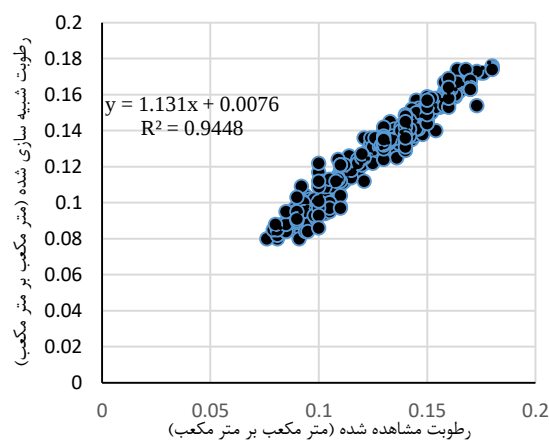
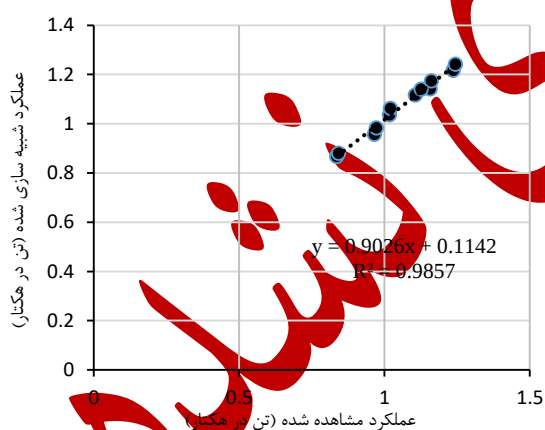
در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی، بهره‌وری آب آبیاری مشاهده شده برای عدس در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سال ۱۴۰۱، به ترتیب ۰/۳۸۸، ۰/۴۷۳ و ۰/۵۳۱ و در سال ۱۴۰۲ به ترتیب ۰/۳۴۳، ۰/۴۱۰ و ۰/۴۶۱ کیلوگرم مترمکعب بود. در حالی که مقادیر بهره‌وری آب آبیاری مشاهده شده در سیستم آبیاری بخشی ریشه در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در سال ۱۴۰۱، به ترتیب ۰/۴۳۳، ۰/۵۳۸ و ۰/۵۹۳ و در سال ۱۴۰۲، به ترتیب ۰/۳۷۹، ۰/۴۶۶ و ۰/۵۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر با نتایج با Abd El-Mageed و همکاران (۲۰۱۶)، عبدالواحد و همکاران (۲۰۱۷) و ال‌عمران و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. به طور کلی، بهره‌وری آب آبیاری در رابطه با نوع سیستم آبیاری نشان داد که بهره‌وری آب آبیاری روش آبیاری بخشی ریشه بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد همبستگی خوبی بین مقادیر بهره‌وری آب آبیاری مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد نشان می‌دهد. مطابق جدول ۶ مقدار RMSE در طول دو فصل ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب برابر ۰/۰۰۹۸۷ و ۰/۰۱۱۷۳ بود که نشان از اختلاف کم بهره‌وری آب آبیاری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل دارد. بررسی آماره NRMSE نشان داد که صحت مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب (در سال اول ۰/۰۴۸۱ و در سال دوم ۰/۰۶۱۷) در دسته عالی قرار دارد. در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، NSE به ترتیب برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب ۰/۸۳ و ۰/۸۰ که نشان دهنده کارایی خوب مدل در پیش‌بینی بهره‌وری آب می‌باشد. مقدار CRM نشان می‌دهد مدل مقدار بهره‌وری آب آبیاری را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. مقدار CRM در سال اول و دوم به ترتیب برابر ۰/۰۳۷۴ و -۰/۰۲۰۸۳ می‌باشد.



شکل ۱۱ همبستگی بین بهره‌وری آب آبیاری مشاهده و شبیه سازی شده (کیلوگرم بر مترمکعب) در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

عملکرد کلی مدل

شکل ۱۲ ضریب کلی تعیین را برای تمام مقادیر عملکرد عدس، ماده خشک، بهره‌وری آب آبیاری و رطوبت خاک در تمام لایه‌های خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه و کلیه تیمارهای آبیاری نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تعیین نشان داد که مدل SALTMED قادر به شبیه سازی عملکرد محصول عدس، ماده خشک و رطوبت خاک در هر دو فصل می‌باشد که این مقدار برای رطوبت خاک، عملکرد، ماده خشک و بهره‌وری آب به ترتیب ۰/۹۴۴۸، ۰/۹۸۵۷، ۰/۹۷۲۱ و ۰/۹۸۲۵ بود. نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر به پیش‌بینی دقیق میزان رطوبت خاک، عملکرد، ماده خشک و بهره‌وری آب آبیاری برای محصولات زراعی کشت شده تحت سطوح مختلف کم آبیاری در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه می‌باشد.



شکل ۱۲. همبستگی کلی بین رطوبت مشاهده و شبیه سازی شده، عملکرد، ماده خشک تولیدی و بهره‌وری آب آبیاری عدس در سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲

نتیجه گیری و پیشنهادات

بیشترین عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بدست آمد. تفاوت در عملکرد بین دو تیمار ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی معنی‌دار نبود؛ بنابراین آبیاری با ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در ناحیه ریشه سبب ایجاد تنش آبی به گیاه عدس کافی نمی‌شود. بنابراین می‌توان ۲۵ درصد صرفه جویی در آب آبیاری را بدون کاهش قابل توجهی در عملکرد به دست آورد.

در سال زراعی ۱۴۰۱، عملکرد گیاه در روش آبیاری بخشی ریشه به میزان ۱۱/۷۴۳ درصد برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۱۳/۷۶ درصد برای تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۱۵/۵۵ درصد برای تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی از عملکرد گیاه در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بیشتر بود. میانگین عملکرد گیاه در هر سه تیمار در روش آبیاری بخشی ریشه حدود ۱۳/۵۹ درصد بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. در فصل دوم، عملکرد گیاه در روش آبیاری بخشی ریشه به میزان ۱۰/۴۷ درصد برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۱۳/۸۰ درصد برای تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۱۵/۴۳ درصد برای تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی از عملکرد گیاه در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بیشتر بود. میانگین عملکرد گیاه در هر سه تیمار در روش آبیاری بخشی ریشه حدود ۱۳/۰۵ درصد بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. با در نظر گرفتن هر دو سال، عملکرد گیاه در روش آبیاری بخشی ریشه، ۱۳/۳۲ درصد بیشتر از عملکرد در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود.

بهره‌وری آب در روش آبیاری بخشی ریشه بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. زیرا در روش آبیاری بخشی ریشه، آب به مدت طولانی در ناحیه ریشه نگه داشته می‌شود تا ریشه‌های گیاه کمتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی تحت تنش رطوبتی قرار گیرد و به همین دلیل عملکرد و بهره‌وری افزایش می‌یابد.

در طول فصل اول، بهره‌وری آب روش آبیاری بخشی ریشه به میزان ۱۱/۵۹ درصد برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۱۳/۷۴ درصد برای تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۱۵/۵۹ درصد برای تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. در تمام تیمارها بهره‌وری روش آبیاری بخشی ریشه به طور میانگین ۱۳/۷۵ درصد بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. در حالی که در سال دوم بهره‌وری آب روش آبیاری بخشی ریشه به میزان ۱۰/۴۹ درصد برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۱۳/۶۵ درصد برای تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۱۵/۶۱ درصد برای تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. در تمام تیمارها بهره‌وری روش آبیاری بخشی ریشه به طور میانگین ۱۳/۶۱ درصد بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بود. با در نظر گرفتن هر دو سال، بهره‌وری آب در روش آبیاری بخشی ریشه، ۱۳/۶۸ درصد بیشتر از بهره‌وری آب در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی می‌باشد.

نتایج فوق نشان می‌دهد که روش آبیاری بخشی ریشه عملکرد و بهره‌وری آب کمی بالاتر از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی می‌باشد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که سود اصلی صرفه جویی ۲۵ درصدی آب در صورت آبیاری محصول با ۷۵ درصد نیاز آبی است. مدل SALTMED رطوبت خاک، ماده خشک تولیدی و عملکرد را برای عدس تحت سه تیمار ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی در دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه در منطقه مورد مطالعه با دقت خوبی شبیه‌سازی کرد. بنابراین، مدل SALTMED را می‌توان برای شبیه سازی و پیش‌بینی تولید محصول، بهره‌وری آب و رشد محصول تحت سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار داد. آزمایش مزرعه‌ای و مطالعه مدل سازی با نرم افزار SALTMED نشان داد که هیچ گونه تغییرات زیادی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه سازی شده در رطوبت خاک تمام لایه های خاک وجود ندارد. تغییرات رطوبت خاک در هر دو لایه به دلیل آبیاری مکرر بسیار کم بود که بر این اساس رطوبت خاک را بالا نگه می‌داشت. تیمارهای آبیاری بر عملکرد و کل ماده خشک تولیدی تأثیر داشتند. سیستم آبیاری با تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، عملکرد و ماده خشک تولیدی نسبتاً بالاتری داشت و کمترین عملکرد در تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و روش آبیاری بخشی ریشه مشاهده شد. بالاترین مقادیر بهره‌وری آب در تیمار ۵۵ درصد نیاز آبی و پس از آن تیمار ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بود.

۱- وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۳، دفتر آمار و فناوری اطلاعات. «آمارنامه محصولات زراعی سال ۱۴۰۱ (سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰)، جداول ۲-۱۷ و ۳-۲ (سطح، تولید و عملکرد حبوبات به تفکیک استان).

- 2- Abd El-Mageed, T.A., Semida, W.M. and Abd El-Wahed, M.H. (2016). Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil. *Agricultural Water Management*, 173, 1–12
- 3- Abd El-Wahed, M.H., Baker, G.A., Ali, M.M. and Abd El-Fattah, F. A. (2017). Effect of drip deficit irrigation and soil mulching on growth of common bean plant, water use efficiency and soil salinity. *Scientia Horticulturae*, 225, 235–242.
- 4- Abdelraouf, R.E. and Ragab, R. (2018). Applying Partial Root Drying drip irrigation in presence of organic mulching. Is that the best irrigation practice for arid regions? Field and Modelling Study Using SALTMed model. *Irrigation and Drainage*, 67, 491–507.
- 5- Abdelraouf, R.E., El Habbasha, S.F., Taha, M.H. and Refaie, K.M. (2013). Effect of irrigation water requirements and fertigation levels on growth, yield and water use efficiency in wheat. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 16(4), 441–450.
- 6- Adu, M. O., Yawson, D. O., Armah, F. A., Asare, P. A., & Frimpong, K. A. (2018). Meta-analysis of crop yields of full deficit and partial root-zone drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 197, 79–90.
- 7- Afzal, M., Battilani, A., Solimando, D. and Ragab, R. (2016). Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: Field and modelling study. *Agricultural Water Management*, 176, 40–54.
- 8- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- 9- Al-Omran, A., Louki, I., Alkhasha, A., Abd ElWahed, M.H., & Obadi, A. (2020). Water saving and yield of potatoes under partial root zone drying drip irrigation technique: field and modelling study using SALTMed model in Saudi Arabia. *Agronomy*, 10(12). doi:10.3390/agronomy10121997
- 10- Cosi c, M., Stric'evic, R., Djurovic, N., Moravc'evic, D., Pavlovic, M. and Todorovic, M. (2017). Predicting biomass and yield of sweet pepper grown with and without plastic film mulching under different water supply and weather conditions. *Agricultural Water Management*, 188, 91–100.
- 11- Duncan, D.B. (1955) Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11, 1–42.
- 12- El-Metwally, I., Abdelraouf, R.E., Ahmed, M., Mounzer, O., Alarcón, J. and Abdelhamid, M. (2015). Response of wheat (*Triticum aestivum* L.) crop and broad-leaved weeds to different water requirements and weed management in sandy soils. *Agriculture*, 61(1), 22–32.
- 13- El-Noemani, A.A., Aboamera, M.A.H. and Dewedar, O.M. (2015a). Determination of crop coefficient for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under drip irrigation system. *International Journal of ChemTech Research*, 8(12), 203–214.
- 14- El-Noemani, A.A., Aboellil, A.A.A. and Dewedar, O.M. (2015b). Influence of irrigation systems and water treatments on growth, yield, quality and water use efficiency of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *International Journal of ChemTech Research*, 8(12), 248–258.
- 15- El-Shafie, A.F., Osama, M.A., Hussein, M.M., El-Gindy, A.M. and Ragab, R. (2017). Predicting soil moisture distribution, dry matter, water productivity and potato yield under a modified gated pipe irrigation system: SALTMed model application using field experimental data. *Agricultural Water Management*, 184, 221–233.
- 16- English, M.J, Musick, J.T., Murty, V.V.N., 1990. Deficit irrigation. In: Management of farm irrigation systems (Hoffman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H., Editors). ASAE Monograph no. 9. American Society of Agricultural Engineers publisher, 1020p.
- 17- FAOSTAT. 2020. Crops and livestock products. [Available online at <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>].
- 18- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). FAOSTAT Statistical Database. Rome, Italy. <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (accessed March 2019).
- 19- Gardner, W.H. (1986) Water content. In: Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. pp. 493–544.
- 20- Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986) Particle-size analysis 1. In: Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. pp. 383–411.

- 21- Gençoglan, C., Altunbey, H. and Gençoglan, S. (2006) Response of green bean (*P. vulgaris* L.) to subsurface drip irrigation and partial rootzone-drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 84(3), 274–280.
- 22- Gholipour M, Sinclair TR, Raza MAS, Loffler C, Cooper M, Messina CD (2013) Maize hybrid variability for transpiration decrease with progressive soil drying. *J Agron Crop Sci* 199:23–29
- 23- Golabi, M., Albaji. M. and Naseri, A. A. (2013). The Feasibility application of drainage water on irrigation and drainage networks covered by Karkhe and Shavoor Exploitation Company using SALTMED model. *Journal of Iran Water Research*, 12(7), 111-119. (In Farsi)
- 24- Hasan, M. K., Sarkar, M. A. R., & Hossain, M. S. (2024). Impact of drought and heat stress on photosynthetic efficiency and yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1403922.
- 25- Hirich, A., Choukr-Allah, R., Ragab, R., Jacobsen, S.-E., El Youssfi, L. and El Omari, H. (2012) The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 3(2), 342–359.
- 26- Iqbal R, Raza MAS, Valipour M, Saleem MF, Zaheer MS, Ahmad S, Nazar MA (2020) Potential agricultural and environmental benefits of mulches-a review. *Bull Natl Res Cent* 44:1–16
- 27- Jabro J, Leib B, Jabro A (2005) Estimating soil water content using site specific calibration of capacitance measurements from Sentek EnviroSCAN systems. *Appl Eng Agric* 21:393–399
- 28- James, L.G. (1988) Principles of farm irrigation system design. Vol. 73. Washington, USA: John Wiley & sons. Inc., Washington State University. pp. 152–153 350–351.
- 29- Kader MA, Singha A, Begum MA, Jewel A, Khan FH, Khan NI (2019) Mulching as water-saving technique in dry-land agriculture. *Bull Nat Res Cent* 43:1–6.
- 30- Katerji, N., Hoorn, J.W., Hamdy, A. and Mastrorilli, M. (2003). Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Journal of agricultural water management*. 62, 37-66.
- 31- Kaya, Ç.I., Yazar, A. and Sezen, S.M. (2015) SALTMED model performance on simulation of soil moisture and crop yield for quinoa irrigated using different irrigation systems, irrigation strategies and water qualities in Turkey. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 108–118.
- 32- Klute, A. and Dirksen, C. (1986) Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. city, USA. pp. 687–734.
- 33- Malash, N., Abdel Gawad, G., Arslan, A. and Ghaibeh, A. (2005a) 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.
- 34- Malash, N., Gawad, G.A., Arslan, A. and Ghaibeh, A. (2005b) A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 2. The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78(1–2), 89–107.
- 35- Marwa, M.A., Abdelraouf, R.E., Wahba, S.A., El-Bagouri, K.F. and El-Gindy, A.G. (2017). Scheduling Irrigation using automatic tensiometers for pea crop. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Special issue, 174–183.
- 36- Marwa, M.A., El-Shahie, A.F., Dewedar, O.M., Molina-Martinez, J. M. and 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.
- 37- Ministry of Jihad-e-Agriculture, (2023). Office of agriculture statistics analysis and information. Available at web (<https://biamar.maj.ir/ManagementReport/powerbi/DataBank/AgriBiReport?rs:embed=true>).
- 38- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* 27(3), 282–290.
- 39- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., D'andria, R. and Ragab, R. (2013). SALTMED model to simulate yield and dry matter for quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in south Italy. *Irrigation and Drainage*, 62(2), 229–238.
- 40- Ragab R. (2020). A special issue combines 17 research papers on SALTMED model. 'SALTMED Publications in Irrigation and Drainage. Virtual Issues First published: 20 May 2020 Last updated: 20 May 2020. Wiley on line Library'.
- 41- Ragab, R. (2002). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17(4), 345–361.
- 42- Ragab, R. (2015) Integrated Management tool for water, crop, soil and N-Fertilizers: The SALTMED model. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 1–12

- 43- Ragab, R., Battilani, A., Matovic, G., Stikic, R., Psarras, G. and Chartzoulakis, K. (2015) SALTMed model as an integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizer water management strategies and productivity: field and simulation study. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 13–28.
- 44- Ragab, R., Evans, J.G., Battilani, A. and Solimando, D. (2017). Towards accurate estimation of crop water requirement without the crop coefficient: New approach using modern technologies. *Irrigation and Drainage*, 66, 469–477.
- 45- Ragab, R., Malash, N., Gawad, G.A., Arslan, A. and Ghaibeh, A. (2005a). 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), 67–88.
- 46- Ragab, R., Malash, N., Gawad, G.A., Arslan, A. and Ghaibeh, A. (2005b) A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 2. The SALTMed model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78(1), 89–107.
- 47- Raza, M. A., Ahmad, S., Saleem, M. F., Khan, I. H., Iqbal, R. ... Ali, M. (2017). Physiological and biochemical assisted screening of wheat varieties under partial rhizosphere drying. *Plant Physiology & Biochemistry: PPB / Societe Francaise de Physiologie Vegetale*, 116, 150–166.
- 48- Schahbazian N, Iran-Nejad H (2006). The effects of different mulch types and irrigation intervals on cotton yield. *Die Boden* 57:765–766
- 49- Sentek (2001) Calibration of sentek pty ltd soil moisture sensors. A report published by Sentek Pty Ltd, Stepney, p 60
- 50- Sezen, S.M., Yazar, A., Akyildiz, A., Dasgan, H.Y. and Gencel, B. (2008). Yield and quality response of drip irrigated green beans under full and deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 117(2), 95–102.
- 51- Sezen, S.M., Yazar, A., Canbolat, M., Eker, S. and Çelikel, G. (2005) Effect of drip irrigation management on yield and quality of field grown green beans. *Agricultural Water Management*, 71 (3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.09.004>
- 52- Tawfik RS, El-Mouhamady ABA (2019) Molecular genetic studies on abiotic stress resistance in sorghum entries through using half diallel analysis and inter simple sequence repeat (ISSR) markers. *Bull Natl Res Cent* 43:117
- 53- Wahba, S.A., El-Gindy, A.M., El-Bagouri, K.F. and Marwa, M.A. (2016) Response of green peas to Irrigation automatic scheduling and potassium fertigation. *International Journal of ChemTech Research*, 9(3), 228–237.
- 54- Wilhite, D. A., & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: understanding the natural and social context. *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*, 3, 29.
- 55- Youssef, E.A., El-Baset, M.M.A., El-Shafie, A.F. and Hussien, M.M. (2018). The applications of water deficiency levels and ascorbic acid foliar on growth parameters and yield of summer squash plant (*Cucurbita pepo* L.). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(5), 147–158.

Improving Water Productivity Through Deficit Irrigation Using the SALTMED Model

Abstract

Increasing water demand due to population growth and climate change has led to the depletion of agricultural water resources in water-scarce regions. Accordingly, a field experiment was conducted over two consecutive seasons (2022 and 2023) at the Medicinal Plants Research Center, Islamic Azad University, Shahr-e Qods Branch. The objective of this study was to evaluate the effects of surface drip irrigation (SDI) and partial root zone drying (PRD), combined with three irrigation treatments (100%, 75%, and 55% of crop evapotranspiration), on lentil yield, and to assess the SALTMED model's performance in simulating soil moisture, total dry matter, and yield. Although the highest yields were obtained under full irrigation (100% ETC), no significant difference was observed between the 100% and 75% treatments. This suggests that a 25% reduction in water use can be achieved without compromising yield. Yield and water productivity under PRD were slightly higher than those under SDI as PRD maintained soil moisture in the root zone for a longer period without exposing the crop to water stress. The SALTMED model accurately simulated soil moisture, total dry matter, yield, and water use efficiency. Therefore, it can serve as a valuable tool for crop, water, and land management under Iran's climatic conditions.

Keywords: Deficit irrigation, Partial root-zone drying, SALTMED model, water productivity, yield

پژوهش‌های کشاورزی

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water scarcity is one of the major challenges facing agriculture today. This study evaluated the effects of surface drip irrigation (SDI) and partial root-zone drying (PRD) under different irrigation levels (100%, 75%, and 55% of crop evapotranspiration) on lentil growth, yield, and water productivity. The SALTMed model was used to simulate soil moisture, dry matter, and yield. Results aimed to identify a water-saving, cost-effective irrigation strategy suitable for drought-prone regions.

Material and methods

Field experiments were conducted during the 2022 and 2023 growing seasons at the research farm of Islamic Azad University, Shahre Ghods Branch, under a hot and dry climate. Soil samples were collected to 60 cm depth, and irrigation treatments were applied using surface drip and partial root-zone drying methods with three irrigation levels (100%, 75%, and 55% of crop water requirement) in a randomized complete block design. Meteorological data were recorded by a nearby weather station and ET_0 was calculated using the FAO Penman-Monteith equation. Lentil was sown in mid-September and harvested in early December. Soil moisture was measured using calibrated EnviroSCAN sensors, and crop yield and water productivity were assessed. Irrigation scheduling was based on a 3-day interval using climatic data, soil properties, and FAO recommendations for effective rainfall and leaching requirements. The SALTMed model was calibrated using observed soil moisture, dry matter, and yield under full irrigation, then validated using remaining treatments. Model performance was evaluated using R^2 , RMSE, NRMSE, NSE, and CRM indices. Statistical analysis was conducted using SPSS and Duncan's test.

Result and Discussion

A strong correlation was observed between measured and simulated soil moisture in both 0.00–0.25 m and 0.25–0.50 m layers under full irrigation with surface drip and PRD methods, with simulated values closely matching the observed data. A high agreement was observed between measured and simulated soil moisture in both 0–25 cm and 25–50 cm layers under surface drip and partial root-zone drying irrigation. The minimal variation in soil moisture was attributed to frequent irrigation events that maintained high moisture levels in the root zone. Statistical performance indicators confirmed the model's accuracy and calibration quality, indicating its suitability for validation and application in soil water dynamics modeling under different irrigation strategies. Yield and total dry matter were successfully calibrated in both surface drip and PRD systems by adjusting crop growth parameters, showing strong agreement between observed and simulated values. Model validation for other treatments confirmed its accuracy, with good alignment between simulated and measured soil moisture, yield, and biomass. Soil moisture was lower in the upper layer due to surface evaporation, and PRD maintained higher moisture levels than surface drip across both seasons, likely due to reduced wetted area and lower evaporation losses. Statistical indices confirmed a strong correlation between observed and simulated soil moisture across all irrigation treatments and soil layers under both surface drip and PRD systems. The validation results demonstrated the model's reliability and effectiveness in simulating soil water content under different irrigation methods. The irrigation system and water treatment levels had consistent effects on lentil yield and total dry matter in both seasons. The highest values were observed under full irrigation, while the lowest occurred under severe deficit irrigation in both surface drip and PRD systems. Yield and biomass reductions were mainly due to soil moisture deficiency, which limited photosynthesis and overall plant performance. In the 2022 and 2023 growing seasons, the model showed a strong correlation between observed and simulated yield and total dry matter under full irrigation for both surface drip and PRD systems, with minimal deviations. Across all irrigation treatments, simulated values closely matched observed data, indicating high

model accuracy. Statistical indicators confirmed excellent agreement and low error rates, placing the model's performance in yield and biomass simulation within a highly reliable range. Water productivity, defined as crop yield per unit of irrigation water, showed similar trends across two seasons. The highest water productivity occurred under deficit irrigation treatments, with the partial root-zone drying method outperforming surface drip irrigation. Statistical analyses confirmed a strong correlation between observed and simulated water productivity, with low error margins and good model efficiency. Overall, the SALTMED model accurately simulated soil moisture, yield, dry matter, and water productivity for lentil under different irrigation levels in both irrigation systems.

Conclusion

The highest yield was obtained under the 100% crop water requirement treatment. However, the difference in yield between the 100% and 75% treatments was not statistically significant, indicating that irrigation with 75% of the plant's water requirement does not impose significant water stress on lentil. Therefore, a 25% reduction in irrigation water can be achieved without a notable decline in yield. In the 2022–2023 growing season, partial root-zone drying (PRD) irrigation increased yield by 11.743%, 13.76%, and 15.55% compared to surface drip irrigation for the 100%, 75%, and 55% water requirement treatments, respectively, with an average increase of 13.59%. In the second season, PRD irrigation resulted in 10.47%, 13.80%, and 15.43% higher yields under the same treatments, averaging 13.05% higher than surface drip irrigation. Overall, across both years, PRD improved yield by an average of 13.32%. Water productivity under PRD was also higher, as water remained longer in the root zone, reducing moisture stress and enhancing yield. In the first season, water productivity in PRD improved by 11.59%, 13.74%, and 15.59% for the 100%, 75%, and 55% treatments, respectively, with a mean increase of 13.75%. In the second season, it increased by 10.49%, 13.65%, and 15.61%, respectively, with an average improvement of 13.61%. Over both years, water productivity under PRD was 13.68% higher than under surface drip irrigation. Although PRD slightly outperformed surface drip in yield and water productivity, the main benefit lies in saving 25% of irrigation water by applying 75% of the crop water requirement. The SALTMED model accurately simulated soil moisture, dry matter production, and yield under all three treatments and both irrigation systems. It proved effective for predicting crop growth, yield, and water productivity under various scenarios, with minimal differences between observed and simulated data. The highest water productivity occurred under the 55% treatment, followed by the 75% and 100% treatments.

Author Contributions

Conceptualization, M.A. and A.N.GH.; methodology, M.A. and A.N.GH.; software, M.A. and A.N.GH.; validation, M.A. and A.N.GH.; formal analysis, M.A. and A.N.GH.; investigation, M.A. and A.N.GH.; resources, M.A. and A.N.GH.; data curation, M.A.; writing-original draft preparation, M.A. and A.N.GH.; writing-review and editing, M.A. and A.N.GH.; visualization, M.A. and A.N.GH.; supervision, M.A. and A.N.GH.; project administration, M.A. and A.N.GH.; funding acquisition, M.A. and A.N.GH. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ویراستاری نشده