



Assessment of SALTMED Model for Wheat Irrigation Management with Saline Water

Gh. H. Ranjbar^{1*}, M. H. Rahimian², M. Karimi², H. Gholami³,
H. Beyrami¹, S. A. M Cheraghi⁴, and B. Moravej-Alahkami⁵

1-Associate Prof., National Salinity Research Centre, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. ranjbar71@gmail.com, beyrami.h@hotmail.com

2-Assistant Prof., National Salinity Research Centre, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. mhrahimian@gmail.com, karimi_nsrc@yahoo.com

3-Former Ph.D. student. Ardekan University, Yazd, Iran. gholami7h7@gmail.com

4-Assistant Prof., Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. samcheraghi@gmail.com

5-Assistant Prof., Soil and water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. bita.moravej@gmail.com

Article Info	Abstract
Research Article	To evaluate the accuracy of SALTMED model, data of a two-year experiment on wheat were used. Treatments included three irrigation water salinity levels of 3, 5 and 8 dS.m ⁻¹ , four irrigation methods of flooded and drip irrigation (tape), with 20, 40 and 60 cm lateral spacing. The data of the first year of the experiment were used for calibration and the data of the second year were used for validation of the model. Results showed that, regardless of the irrigation method, the simulated values for wheat biological and grain yields with mean biomass error (MBE) of 29.07 and 14.21 g.m ⁻² , respectively, were in good agreement with the measured values. According to the MBE values, the amounts of grain and biological yield were overestimated compared to the measured values. Based on the standard error of the estimates and the F-test results, although there was a significant difference between the simulated and measured performance values in the 3 dS.m ⁻¹ irrigation water salinity ($P \leq 0.05$), but with increase in irrigation water salinity, no significant difference was observed between the measured and simulated values. The average difference between simulated and measured values for grain yield was around 32 g.m ⁻² . In the case of using r , R^2 , RMSE and NRMSE statistical indicators, this model can satisfactorily predict the soil salinity of 0-30 and 30-60 cm depths; where the model prediction deviations were about 0.64 and 0.88 dS.m ⁻¹ , respectively. The accuracy of the model simulation was weak for soil moisture in different depths. Although, the SALTMED model had a slight overestimation of water productivity parameter (with MBE of 0.03 kg.m ³), but its simulation was acceptable for all salinity and irrigation levels. Based on the results, the SALTMED model can be used to predict wheat yield, water productivity, and managing of soil salinity, especially in the upper soil layers.
Received: April 19, 2026	
Accepted: August 18, 2026	
Keywords: Soil salinity, Soil moisture, Drip irrigation (tape), Water productivity	
Corresponding author's email: ranjbar71@gmail.com	

Cite this article: Ranjbar, Gh. H., Rahimian, M. H., Karimi, M., Gholami, H., Beyrami, H., Cheraghi, S. A. M. and Moravej-Alahkami, B., 2026. Assessment of SALTMED Model for Wheat Irrigation Management with Saline Water. *Journal of Water Research in Agriculture*, 40(1), pp.1-17.





نشریه پژوهش آب در کشاورزی

<https://wra.areeo.ac.ir>

ارزیابی مدل SALTMED برای مدیریت آبیاری گندم با آب شور

غلامحسن رنجبر^{۱*} , محمدحسن رحیمیان^۲، مهدی کریمی^۲، حسن غلامی^۳، حسین بیرامی^۱

سید علی محمد چراغی^۴ و بیتا مروج الاحکامی^۵

۱-دانشیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

ranjbar71@gmail.com
beyrami.h@hotmail.com

۲- استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

mhrachimian@gmail.com
karimi_nsrc@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری سابق دانشگاه اردکان، یزد، ایران. gholami7h7@gmail.com

۴- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران. samcheraghi@gmail.com

۵- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

bita.moravej@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	به منظور ارزیابی دقت مدل سالت مد (SALTMED)، داده‌های یک آزمایش دوساله روی گندم در سه تیمار کیفیت آب آبیاری برابر سه، پنج و هشت دسی‌زیمنس بر متر و چهار روش آبیاری شامل غرقابی و آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با فاصله نوارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر بررسی شد. از داده‌های سال اول آزمایش برای واسنجی و از داده‌های سال دوم برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که بدون در نظر گرفتن روش آبیاری، مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه به ترتیب با خطای اریبی ۲۹/۰۷ و ۱۴/۲۱ گرم در متر مربع گندم هم‌خوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری داشتند؛ هرچند که دارای بیش‌برآورد بود. همچنین، بر اساس نتایج آزمون F و خطای استاندارد اگرچه در تیمار شوری سه دسی‌زیمنس بر متر بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه تفاوت معنی‌دار وجود داشت ($P \leq 0.05$)، ولی با شورت‌تر شدن آب آبیاری این تفاوت مشاهده نشد؛ به‌طوری‌که متوسط تفاضل مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه در حدود ۳۲ گرم در متر مربع بود. با توجه به آماره‌هایی نظیر r^2 ، RMSE و NRMSE مربوط به اعماق ۳۰-۶۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر خاک، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مدل مزبور، شوری خاک این لایه‌ها را به‌صورت رضایت‌بخش برآورد می‌کند؛ به‌طوری‌که متوسط تفاضل مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شوری خاک در این اعماق به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۸۸ دسی‌زیمنس بر متر بوده است. دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق‌های مختلف ضعیف بود. شاخص بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده با مدل دارای اندکی بیش‌برآورد بود (خطای اریبی ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب)، ولی در هر سه تیمار شوری کارایی قابل قبولی داشت. بر اساس نتایج، مدل را می‌توان برای برآورد عملکرد گندم، شاخص بهره‌وری آب و مدیریت شوری خاک، به‌ویژه در لایه‌های بالایی استفاده نمود.
دریافت: ۱۴۰۵/۱/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۷	
واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای نواری، بهره‌وری آب، شوری خاک، رطوبت خاک	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: ranjbar71@gmail.com	

استاد: رنجبر، غلامحسن، رحیمیان، محمدحسن، کریمی، مهدی، غلامی، حسن، بیرامی، حسین، چراغی، سید علی محمد، و مروج الاحکامی، بیتا، ۱۴۰۵.

ارزیابی مدل SALTMED برای مدیریت آبیاری گندم با آب شور. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۴۰ (۱)، صص. ۱-۱۷



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372479.1111>

مقدمه

موضوع استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) به منظور کاهش حجم آب مصرفی مزرعه، کاهش تلفات عمقی آب و افزایش شاخص بهره‌وری آب در گیاهان زراعی مانند گندم همواره مطرح بوده است، هرچند در شرایط شور استفاده از این سامانه‌ها با الزامات و ملاحظات ویژه همراه بوده است. به همین منظور، داشتن یک تصوّر صحیح از پایداری تولید در اثر استفاده از این سامانه‌ها از منظر تغییرات رطوبت و شوری در عمق‌های مختلف خاک، می‌تواند در موفقیت و توسعه این سامانه‌ها تأثیرگذار باشد. یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری و مدیریتی برای شبیه‌سازی و مقایسه اثرات توأم شوری آب آبیاری، حجم آب مصرفی و روش آبیاری بر عملکرد محصول و شاخص بهره‌وری آب، مدل‌های کامپیوتری است (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹؛ سیمونک و همکاران، ۲۰۱۲؛ عصاره و همکاران، ۱۳۹۳). برای مثال، مطالعه انجام‌شده توسط رنجبر و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که مدل Hydrus با توجه به اینکه می‌تواند انتقال رطوبت، توزیع نترات و آمونیوم را در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند، می‌تواند ابزار مفیدی برای مدیریت آب و کود در آبیاری جویچه‌ای گیاه ذرت باشد. زو و زی‌زائو (۲۰۱۹)، در یک اقلیم خشک واقع در کشور چین گزارش کردند که با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمده به روش مدل‌سازی معکوس، می‌توان جریان آب خاک لایه‌های مختلف را در طی فصل رشد محصول در تناوب ذرت-گندم شبیه‌سازی کرد. راموس و همکاران (۲۰۱۲) نیز اقدام به شبیه‌سازی حرکت آب و نیتروژن در مزرعه سورگوم تحت شرایط دو منبع آب آبیاری شور و غیرشور کردند. در این مطالعه، آن‌ها از مدل Hydrus دو بعدی استفاده و میزان رطوبت، شوری آب خاک و فرم‌های مختلف نیتروژن در خاک را با موفقیت شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها این مدل را برای انتخاب بهترین استراتژی‌های مدیریتی برای افزایش جذب نیتروژن و کاهش آبشویی نیتروژن در مزرعه معرفی نمودند.

اما یکی از مدل‌های برآورد عملکرد و فاکتورهای تأثیرگذار بر آن، به‌ویژه در شرایط شور، مدل SALTMED هست که توسط رجب (۲۰۰۲ و ۲۰۱۵) توسعه یافته است. پژوهش‌های مختلفی در مناطق مختلف دنیا با استفاده از این مدل در شرایط شور برای برآورد عملکرد گیاهان مختلف زراعی و تغییرات شوری و رطوبت خاک انجام شده است (آلی و همکاران، ۲۰۱۵؛ پولوینتو و همکاران، ۲۰۱۳؛ سیلوا و همکاران، ۲۰۱۳؛ هیریچ و همکاران، ۲۰۱۲).

در ایران نیز نتایج قابل توجهی در مورد استفاده از این مدل گزارش شده است. برای نمونه، نصرالهی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی و ارزیابی مدل SALTMED تحت شرایط مختلف مدیریت‌های آبیاری قطره‌ای با آب شور گزارش کردند که متوسط ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) در شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس به ترتیب ۳/۲۱ و ۲/۳۵ درصد به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل بود. همچنین، شبیه‌سازی توزیع شوری در خاک در مدیریت‌های تناوبی با دقت کمتری (۱۵/۷۱) نسبت به مدیریت اختلاط (۹/۵۷) صورت گرفت.

امداد و تافته (۱۳۹۹)، به منظور شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت شرایط مختلف آبی، در تحقیقی روی گیاه گندم نشان دادند که مدل SALTMED نسبت به ضریب رطوبتی خاک در حالت اشباع (θ_s) بیش از دیگر ضرایب حساس است و با تغییر جزئی مقادیر این ضریب، تغییرات به‌سزایی در خروجی‌های مدل مشاهده شد. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که مدل مقدار رطوبت را کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. مقدار کارایی مدل که نشان‌دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده است بین ۰/۶۷ تا ۰/۹۰ متغیر بود که این نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک است.

در مطالعه نظرنژاد و همکاران (۱۳۹۵)، تغییرات زمانی شوری خاک اراضی حاشیه غربی دریاچه ارومیه در منطقه دیزج دول در دوره چهارساله (۱۳۸۴-۱۳۸۱) با استفاده از مدل SALTMED بررسی شد. با توجه به نتایج

مدل در منطقه مورد مطالعه، میزان شوری خاک در حدود ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر بود و میزان شوری در نواحی انتقالی و آبخوان به ترتیب ۲۵ و ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر برآورد شد که پایین بودن سطح ایستابی یکی از دلایل بالا بودن شوری در ناحیه انتقالی است.

در پژوهش دیگر، رنجبر و همکاران (۲۰۱۵)، در یک مطالعه دو ساله برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SALTMED روی سورگوم تحت شرایط آبیاری با تیمارهای مختلف شوری در استان یزد گزارش کردند که این مدل به خوبی شوری خاک را در اعماق مختلف خاک شبیه‌سازی می‌کند. همچنین دقت نسبتاً خوبی بین ماده خشک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و عملکرد دانه در سطوح مختلف شوری آب وجود داشت.

با توجه به نتایج پژوهش‌های قبلی و برآورد قابل قبول مدل SALTMED در پارامترهای مختلف، رجب (۲۰۰۲) این مدل را به عنوان یک رویکرد جامع یکپارچه برای مدیریت آبیاری، محصول و به‌طور کلی مدیریت مزرعه ارائه داد. بوعدار و همکاران (۱۴۰۳) از این مدل برای مدیریت آبیاری و تعیین مقدار بهینه آب آبیاری سیب‌زمینی استفاده نمودند. ایشان با برآوردهای مدل نتیجه گرفتند که با تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی می‌توان به عملکرد مطلوب و بهره‌وری آب بالا دست یافت. استفاده از مدل SALTMED همچنین به عنوان ابزاری کارآمد برای آبیاری و زهکشی مزارع (گلابی و همکاران، ۲۰۰۹)، استراتژی‌های کم آبیاری (هیریچ و همکاران، ۲۰۱۲) و مدیریت آبیاری محصولات مختلف زراعی تحت شرایط شوری مختلف آب‌وخاک (رجب و همکاران، ۲۰۰۵ و a و b) گزارش شده است.

به‌طور کلی نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که مدل SALTMED به خوبی عملکرد و شوری خاک را تحت شرایط شور برآورد می‌نماید. با توجه به استفاده از روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) در تولید گندم، به‌ویژه با استفاده از آب‌های با کیفیت پایین، هدف از این پژوهش، بررسی توانایی مدل برای تخمین عملکرد و

همچنین شبیه‌سازی و برآورد تغییرات شوری و رطوبت خاک به منظور مدیریت مناسب‌تر آبیاری در شرایط شور بود.

مواد و روش‌ها

روش اجرای پژوهش

این پژوهش در مزرعه تحقیقات شوری مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در استان یزد، طی دو سال زراعی متوالی (۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸) انجام شد. میانگین بارندگی سالانه ۶۹ میلی‌متر، میانگین تبخیر سالانه ۳۰۹۰ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بیشینه و کمینه مطلق دمای سالانه منطقه به ترتیب ۴۴ و ۶/۵- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

در این پژوهش سه سطح شوری آب آبیاری C₁، C₂ و C₃ به عنوان فاکتور اصلی (به ترتیب برابر با شوری‌های سه، پنج و هشت دسی‌زیمنس بر متر) و چهار روش آبیاری به نام‌های F، D₂₀، D₄₀ و D₆₀ به عنوان فاکتورهای فرعی (به ترتیب شامل آبیاری غرقابی و آبیاری قطره‌ای نواری با فاصله نوار تیپ ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر) مدنظر بودند که به صورت آزمایش اسپلیت پلات (کرت‌های خرد شده) در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و با سه تکرار طی دو سال متوالی روی گیاه گندم رقم نارین انجام شد.

انتخاب سطوح شوری یادشده با در نظر گرفتن کیفیت فراهمی منابع آب کشاورزی استان یزد که در حال حاضر حدود ۵/۲ دسی‌زیمنس بر متر است (رحیمیان و غلامی، ۱۴۰۱) و همچنین حد آستانه تحمل به شوری گندم بوده؛ بطوریکه تیمار C₂ به عنوان تیمار حد واسط و تیمارهای C₁ و C₃ نیز به ترتیب به عنوان تیمارهای کمتر از حد آستانه (بیانگر شرایط غیر شور برای گندم) و بیشتر از حد آستانه (بیانگر شرایط شور برای گندم) انتخاب گردیده‌اند. قبل از شروع فصل از سه عمق خاک (۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتیمتر) به منظور شوری خاک، تعیین بافت، چگالی ظاهری، حد ظرفیت زراعی (FC) و نقطه

پژمردگی دائم (PWP) نمونه‌برداری شد (جدول ۱). همچنین، ویژگی‌های شیمیایی تیمارهای شوری آب آبیاری با سطوح C₁، C₂ و C₃ به شرح جدول ۲ است. ضمناً سطوح شوری مورد نظر برای این آزمایش از طریق اختلاط دو منبع آب شور و غیرشور موجود در مزرعه تحقیقاتی تأمین شده است.

جدول ۱ - ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی در زمان کاشت

Table 1- Soil physical properties of experimental field at planting date

لایه خاک Soil layer (cm)	بافت Texture	شوری خاک Soil salinity (dS m ⁻¹)	چگالی ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	محتوی آب خاک اشباع Saturated soil water content (m ³ m ⁻³)	محتوی آب خاک در ظرفیت مزرعه FC soil water content (m ³ m ⁻³)	محتوی آب خاک در نقطه پژمردگی PWP soil water content (m ³ m ⁻³)
0-30		12.23	1.39	56.5	42.9	7.7
30-60	لوم شنی Sandy loam	8.98	1.37	61.2	45.4	4.8
60-90		11.72	1.45	56.4	36.9	5.9

جدول ۲ - ویژگی‌های شیمیایی تیمارهای آب آبیاری

Table 2- Chemical properties of irrigation water treatments

SI	RSC	SAR	(meq l ⁻¹)							pH	تیمار Treatment
			SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		(dS m ⁻¹)
0.89	-8.98	7.94	4.55	22.78	1.53	0.17	18.35	5.99	4.70	8.39	3
0.95	-13.48	12.37	12.84	34.73	1.53	0.17	34.08	9.35	5.84	8.35	5
1.07	-21.12	16.32	9.17	67.24	1.83	0.00	55.29	15.24	7.72	8.23	8

باران مؤثر در طول فصل رشد نیز از روش فائو و به کمک نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد. سپس نیاز آبخوئی به کمک شوری آب آبیاری در هر تیمار (C₁، C₂ و C₃) و حد آستانه تحمل به شوری گندم و به روش آیرز و وستکات (۱۹۸۹) محاسبه و روی تبخیر و تعرق گندم اعمال شد؛ بنابراین، به دلیل نیازهای آبخوئی متفاوت در هر یک از فاکتورهای اصلی (C₁، C₂ و C₃)، حجم آب مورد نیاز در تیمارهای C₁، C₂ و C₃ متغیر بوده است؛ به‌طوری که برای تیمارهای C₃ بیشترین و برای تیمارهای C₁ کمترین حجم آب مورد نیاز گندم محاسبه شده است. سپس آب مورد نیاز هر یک از فاکتورهای فرعی (F، D₂₀، D₄₀ و D₆₀) با احتساب راندمان آبیاری ۶۵ درصد برای روش غرقابی و ۹۰ درصد برای روش‌های آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) محاسبه شد. همچنین سعی شد که دوره‌های آبیاری

از مهم‌ترین اقدامات اجرای پژوهش آماده‌سازی زمین برای اجرای پروژه، تهیه زیرساخت‌های لازم (لوله‌گذاری) برای تأمین سطوح مختلف شوری آب آبیاری، اجرای روش آبیاری تیپ در مزرعه، نصب کنتور حجمی برای هر تیمار برای کنترل آب ورودی به کرت‌ها، اجرای عملیات متداول کاشت، داشت و برداشت گندم در هر یک از تیمارهای تحقیقاتی، نمونه‌برداری‌های آب و خاک در طول فصل رشد، تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌های آب و خاک و بررسی تغییرات شوری و رطوبت خاک در هر تیمار از بود. کرت‌های آزمایشی به مساحت ۲۷ متر مربع (۹×۳ متر) و شامل ۱۵ ردیف کاشت گندم به فاصله ۲۰ سانتی‌متر و به طول ۹ متر و تراکم ۵۰۰ بوته در متر مربع بود. برای برنامه‌ریزی آبیاری، ابتدا تبخیر و تعرق گندم از طریق آمار درازمدت هواشناسی و ضریب گیاهی گندم برآورد شد.

با در نظر گرفتن عرف محل، بازدیدهای مزرعه‌ای در طول فصل رشد و در نظر گرفتن شرایط حاکم بر مزرعه انجام شود. جدول ۳، برآوردهای صورت گرفته برای آب مورد نیاز گندم تحت تأثیر فاکتورهای اصلی و فرعی این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در طول فصل رشد گندم

منطقه مطالعاتی (نیمه آبان تا پایان اردیبهشت)، تبخیر تعرق مرجع ۶۳۰ میلی‌متر، تبخیر تعرق پتانسیل گندم ۵۵۰ میلی‌متر و بارش مؤثر محاسبه‌شده به روش فائو ۱۲ میلی‌متر بوده است.

جدول ۳- برآورد نیاز آبیاری گندم در تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری

Table 3- Estimating irrigation water requirements of wheat in different irrigation water salinity treatments

آب مورد نیاز (میلی‌متر) Irrigation water requirement (mm)		نیاز آبتشویی Leaching requirement (%)	شوری آب آبیاری Irrigation salinity level (dS m ⁻¹)
روش غرقابی Flood method	روش قطره‌ای نواری (تیپ) Drip method (Tape)		
737	589	9	3
795	636	15	5
923	738	27	8

پس از برآورد آب مورد نیاز برای هر تیمار، سعی شد که در هنگام آبیاری‌ها این مقادیر مد نظر قرار گرفته و در مزرعه نیز اعمال شوند. با توجه به نصب کنتور حجمی در ابتدای هر کرت، حجم آب کاربردی تیمارها پس از هر نوبت آبیاری اندازه‌گیری و ثبت می‌شدند. به دلیل فواصل متفاوت نوارهای تیپ در تیمارهای D₂₀، D₄₀ و D₆₀ و تأثیر این مسئله بر زمان خروج حجم آب مدنظر از سامانه، تیمار D₂₀ دارای کمترین مدت زمان آبیاری و تیمار D₆₀ دارای بیشترین مدت زمان آبیاری بوده است. در هر فصل، ۹ نوبت آبیاری انجام و اعمال تیمارهای شوری از اولین آبیاری صورت گرفت. به منظور بررسی تغییرات نیم‌رخ شوری و رطوبت خاک، در لایه‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی-متری خاک نمونه‌گیری انجام و پارامترهای رطوبت و شوری عصاره اشباع (ECe) آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. در انتهای فصل رشد، عملکرد محصول گندم به صورت عملکرد کل (بیولوژیک) و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

کیفیت‌های مختلف آب مانند آب غیر شور، آب شور، فاضلاب و آب زهکش هست (رجب، ۲۰۱۵). در این مدل، تبخیر و تعرق با استفاده از رابطه پنمن-ماتیس و بر اساس نسخه تغییر یافته فائو-۵۶ به صورت زیر محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن: ET_o تبخیر تعرق مرجع (mm day⁻¹)، R_n تشعشع خالص (MJ m⁻² day⁻¹)، G؛ چگالی جریان حرارتی خاک (MJ m⁻² day⁻¹)، T؛ متوسط دمای روزانه در ارتفاع ۲ متری (°C)، Δ؛ شیب منحنی فشار بخار اشباع (kPa °C⁻¹)، γ؛ ثابت سایکرومتری (Pa °C⁻¹)، e_s؛ فشار بخار اشباع در دمای محیط (kPa)، e_a؛ فشار بخار واقعی (kPa) و U₂؛ سرعت باد در ارتفاع دو متری (m s⁻¹) است؛ بنابراین تبخیر-تعرق گیاه زراعی (ET_c) نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ET_c = ET_o (K_{cb} + K_e) \quad (2)$$

که در آن: K_{cb} ضریب تعرق گیاه زراعی و K_e ضریب تبخیر از خاک است. همچنین در این مدل، میزان جذب آب واقعی

تشریح مدل

مدل SALTMED یک مدل عمومی توسعه یافته برای انواع سامانه‌های آبیاری، انواع خاک، محصولات و درختان، راهبردهای آبیاری، کاربردهای مختلف نیتروژن و

مختلف رشد گیاه و ...)، داده‌های شوری و رطوبت خاک در طول فصل رشد در اعماق و فواصل مختلف از نوارهای آبیاری تیپ، برنامه آبیاری (عمق آب و تاریخ آبیاری)، ضرایب گیاهی و پارامترهای انتقال املاح است که اندازه‌گیری و یا برآورد شده‌اند. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش آبیاری نواری تیپ استفاده شده، در نرم‌افزار SALTMED گزینه آبیاری قطره‌ای به صورت توزیع رطوبت از طریق منبع خطی انتخاب شده است.

برای واسنجی مدل، از مقادیر اندازه‌گیری شده و یا تخمینی پارامترهای گیاه، خاک، آب و اقلیم مربوط به سال اول پژوهش استفاده شد. با توجه به اینکه شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته، طول مراحل رشد، شاخص برداشت، دانه و ماده خشک در هر دو سال در مزرعه اندازه‌گیری شد، از همین مقادیر نیز در مدل استفاده شد. همچنین محتوای آب خاک مزرعه در شرایط اشباع، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی در آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری گردیدند. در مورد ضرایب گیاهی (K_c , K_{cb} , $\pi 50$) و کسر پوشش گیاهی (F_c)، از مقادیر ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) استفاده شد. طی مرحله واسنجی، مقدار بازده فتوسنتزی پیش فرض مدل اصلاح شد. همچنین، برخی پارامترهای مورد نیاز خاک شامل شاخص توزیع اندازه خلل و فرج، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع و فشار حباب در نقطه ورود هوا به خاک با کمک ویژگی بافت خاک مزرعه و با نرم‌افزار RETC (وانگنختن و همکاران، ۱۹۹۱) برآورد شد و برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۴، مقادیر استفاده شده برای هر یک از پارامترهای مورد نیاز واسنجی مدل ارائه گردیده است.

(S , mm day^{-1}) در شرایط شور نیز بر اساس روش کاردون و لئی (۱۹۹۲) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S(z, t) = \left[\frac{S_{\max}(t)}{1 + \left(\frac{a(t)h + \pi}{\pi_{50}(t)} \right)^3} \right] \lambda(z, t) \quad (3)$$

که در آن:

$$\lambda(z) = \frac{5}{3}L \text{ for } z \leq 0.2L, \frac{25}{12}L * (1 - \frac{z}{L}) \text{ for } 0.2L < z \leq L \text{ and } 0.0 \text{ for } z > L$$

با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین جذب آب به وسیله گیاه، تولید زیست توده و در نهایت عملکرد محصول وجود دارد، در نهایت عملکرد نسبی گیاه (RY) بر اساس مجموع آب جذب شده در طول فصل رشد تقسیم بر حداکثر جذب آب در شرایطی که تنش خشکی و شوری وجود ندارد به صورت زیر تخمین زده شده می‌شود:

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{\max}(x, z, t)} \quad (4)$$

که در آن: x و z به ترتیب مقدار افقی و عمودی هر رشته ریشه است و t عمق ریشه است. عملکرد واقعی (AY) نیز به وسیله رابطه ساده زیر به دست می‌آید:

$$AY = RY \times Y_{\max} \quad (5)$$

در این معادله، عملکرد حداکثر ($Y_{\max}$) میزان عملکردی است که در شرایط مطلوب و بدون تنش قابل حصول هست.

اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل

اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل شامل داده‌های هواشناسی، اطلاعات خاک (مانند لایه بندی، بافت، شوری اولیه، منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی، چگالی ظاهری)، اطلاعات زراعی (تاریخ کاشت و برداشت، تراکم کاشت، عملکرد محصول، عمق ریشه، تاریخ مراحل

جدول ۴- پارامترهای استفاده شده برای واسنجی مدل

Table 4- Parameters used for model calibration

Amount مقدار	Parameter	پارامتر	
0.7, 1.15, 0.4	Kc for initial, mid. and at the end of growth (from left to right, respectively)	Kc مربوط به ابتدا، وسط و انتهای فصل رشد (به ترتیب از چپ به راست)	پارامترهای گیاهی Plant parameters
0.6, 1.1, 0.3	Kcb for initial, mid. and at the end of growth (from left to right, respectively)	Kcb مربوط به ابتدا، وسط و انتهای فصل رشد (به ترتیب از چپ به راست)	
0.8	Plant height at mid stage (m)	ارتفاع بوته در اواسط رشد (متر)	
5	Leaf area meter at mid stage	شاخص سطح برگ در اواسط رشد	
1994	Growth degree day (°C)	درجه روز برای رشد، GDD (درجه سلسیوس)	
195	Growing period length (day)	طول دوره رشد (روز)	
0.58	Soil moisture content at saturat point (m ³ m ⁻³)	رطوبت خاک در نقطه اشباع (m ³ m ⁻³)	پارامترهای خاکی Soil parameters
0.42	Soil moisture content at field capacity point (m ³ m ⁻³)	رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی (m ³ m ⁻³)	
0.06	Soil moisture content at wilting point (m ³ m ⁻³)	رطوبت خاک در نقطه پژمردگی (m ³ m ⁻³)	
0.53	pore size distribution index (Lambda)	شاخص توزیع اندازه ذرات (لاندا)	
0.01	Residual soil moisture content (m ³ m ⁻³)	رطوبت خاک باقیمانده (m ³ m ⁻³)	
575	Saturated hydraulic conductivity (mm day ⁻¹)	هدایت هیدرولیکی اشباع (mm day ⁻¹)	
16.67	Bubbling pressure (cm)	فشار حبابی در نقطه ورود هوا (cm)	

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad (۶)$$

$$r = \frac{100 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2) (\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2)}} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۸)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۹)$$

که در آن‌ها: منظور از S_i میزان برآورد شده توسط مدل و O_i مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه است، و $\bar{O}$ و $\bar{S}$ مربوط به میانگین حسابی آن‌هاست. علاوه بر آماره‌های خطا، رابطه رگرسیون بین مشاهدات و برآوردها در دوره اعتبارسنجی مدل بررسی شد و با ترسیم خط یک به یک و انجام آزمون معنی‌داری مقایسه واریانس فیشر (F)، ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و برآورد شده همه پارامترها نیز مورد آزمون و تفسیر قرار گرفت.

نتایج

آماره‌های ارزیابی مدل

نتایج اعتبارسنجی مدل به کمک آماره‌های میانگین خطای اریب، ضریب همبستگی پیرسون، مجذور

ارزیابی مدل
به منظور برآورد عملکرد و محاسبه شاخص بهره‌وری آب و همچنین شبیه‌سازی شوری و رطوبت خاک با استفاده از مدل SALTMed، از اطلاعات سال اول برای واسنجی و از اطلاعات سال دوم برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی شده با مدل استفاده شد. برای این منظور، ابتدا به کمک مدل واسنجی‌شده، مقادیر عملکرد محصول، شاخص بهره‌وری آب، شوری و رطوبت خاک برای سال دوم برآورد شد و سپس با مقادیر مشاهداتی عملکرد محصول، شاخص بهره‌وری آب، رطوبت و شوری خاک مزرعه در سال دوم مقایسه شدند. مقایسه‌ها از طریق آماره‌های میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب همبستگی پیرسون (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) صورت گرفت (ساسکیا، ۲۰۱۹؛ جیمز و همکاران، ۲۰۱۳). معادلات (۶) تا (۹) نحوه محاسبه این آماره‌ها را نشان می‌دهند. با توجه به ماهیت فرمول محاسبه آماره MBE، در صورت بیش‌برآورد مقادیر به کمک مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای، این آماره مثبت (+) و در صورت کم برآورد، این آماره منفی (-) خواهد بود.

بر اساس نتایج این جدول، با توجه به آماره میانگین خطای اریب، مدل SALTMED در برآورد عملکرد دانه و بیولوژیک و همچنین شاخص بهره‌وری آب دارای بیش‌برآورد بوده است.

میانگین مربعات خطا و مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده نشان داد که به‌طور کلی و بدون در نظر گرفتن شوری آب آبیاری و یا روش‌های مختلف آبیاری، مقادیر شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه گندم قرابت و هم‌خوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری دارند (جدول ۵).

جدول ۵- ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد گندم، بهره‌وری آب، شوری و رطوبت خاک

Table 5- Evaluation of simulated values of wheat yield, water productivity, soil salinity and moisture

ویژگی	میانگین خطای اریب	ضریب همبستگی پیرسون	مجدور میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده
Property	Mean bias error	Pearson correlation coefficient	Root mean square error	Normalized root mean square error
عملکرد بیولوژیک (g m^{-2})	29.07	0.85	77.56	0.08
عملکرد دانه	14.21	0.80	35.16	0.08
بهره‌وری آب (kg m^{-3})	0.03	0.91	0.06	0.09
شوری خاک	-0.58	0.89	0.75	0.13
Soil salinity	-0.31	0.91	0.96	0.15
(dS m^{-1})	-1.97	0.66	2.66	0.52
رطوبت خاک	0.02	0.83	0.03	0.24
Soil moisture	0.03	0.79	0.04	0.28
($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-0.01	0.32	0.06	0.43

تحت شرایط آبیاری با آب پنج دسی‌زیمنس بر متر متفاوت بود. برازش مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه (شکل ۱) نیز نشان داد که مدل از کارایی خوبی برای شبیه‌سازی این ویژگی‌ها برخوردار است. هر چند تحلیل دقیق‌تر شکل ۱ نشان می‌دهد که مدل در برآورد عملکرد دانه و بیولوژیک گندم دارای اندکی بیش برآورد است. به عبارت دیگر کمتر از یک بودن شیب خطوط مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهد که مدل در مقادیر کمتر عملکرد دانه و بیولوژیک (سطوح شوری بالاتر)، مقدار بیش برآورد آن بیشتر است. این موضوع، تأییدکننده خطای اریب مثبت در جدول ۵ بوده و می‌تواند ناشی از تأثیر شوری بر کارایی مدل باشد؛ زیرا آن دسته از نقاط نمودار که به خط یک به یک نزدیک‌ترند مربوط به سطوح پائین شوری در آزمایش مزرعه‌ای بوده و در این نقاط بیشترین انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و بیولوژیک مشاهده می‌شود.

شبیه‌سازی عملکرد محصول

در جدول ۶، مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک و میانگین تفاضل‌ها در تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری و روش آبیاری (روش غرقابی در مقایسه با روش تیپ) ارائه شده است. با توجه به میزان خطای استاندارد و نتایج آزمون F اگرچه در شرایط استفاده از آب با کیفیت سه دسی‌زیمنس بر متر بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد تفاوت معنی‌دار وجود داشت ($F \leq 0.05$)، اما با افزایش شوری، تفاوت بین عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده معنی‌دار نبود (جدول ۶). نتیجه مشابهی در مورد مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف مشاهده شد (جدول ۷). به‌طور کلی، دامنه میانگین تفاضل عملکرد دانه از ۱۵/۸۴ گرم در متر مربع در تیمار فاصله تیپ ۲۰ سانتی‌متر تحت شرایط آب آبیاری هشت دسی‌زیمنس بر متر تا ۵۴/۱۲ گرم در متر مربع در تیمار تیپ ۴۰ سانتی‌متر

جدول ۶- نتایج آزمون F و خطای استاندارد تفاوت‌های بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد بیولوژیک گندم با استفاده از

مدل SALTMED

Table 6- Results of F-test and standard error of differences between measured and simulated values of wheat biological yield using the SALTMED model

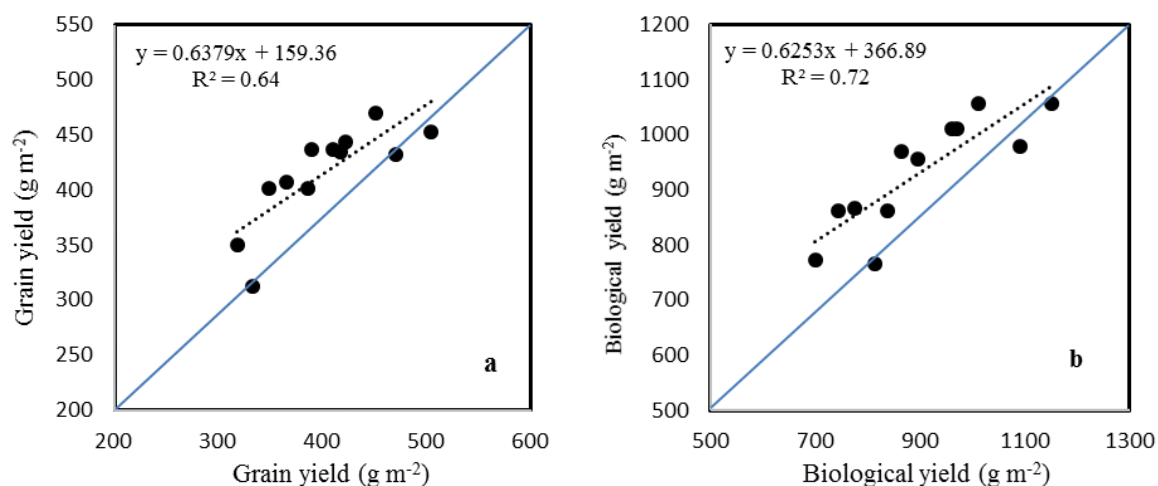
مقدار P	ضریب F	خطای استاندارد	میانگین تفاضل‌ها	مقدار شبیه‌سازی شده	مقدار اندازه‌گیری شده	روش آبیاری	شوری آب آبیاری
(F≤0.05) P	F coefficient	standard error	mean difference (g m ⁻²)	Simulated value (g m ⁻²)	Measured value (g m ⁻²)	Irrigation method	Irrigation water salinity
0.04	11.41	66.34	-93.82	1057.12	1150.94	F	C ₁ = 3 dS m ⁻¹
		35.10	49.65	1009.95	960.30	D ₂₀	
		28.38	40.14	1011.73	971.59	D ₄₀	
		75.29	106.48	970.5	864.02	D ₆₀	
0.17	3.30	31.59	44.68	1056.62	1011.94	F	C ₂ = 5 dS m ⁻¹
		78.81	-111.46	979.53	1090.99	D ₂₀	
		81.98	115.95	860.84	744.89	D ₄₀	
		65.50	91.22	867.32	776.10	D ₆₀	
0.44	0.84	42.48	60.08	955.78	895.70	F	C ₃ = 8 dS m ⁻¹
		15.59	22.06	860.84	838.78	D ₂₀	
		51.43	72.74	772.91	700.17	D ₄₀	
		34.56	-48.88	765.37	814.25	D ₆₀	

جدول ۷ - نتایج آزمون F و خطای استاندارد تفاوت‌های بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم با استفاده از مدل

SALTMED

Table 7- Results of F-test and standard error of differences between measured and simulated values of wheat grain using the SALTMED model yield

مقدار P	ضریب F	خطای استاندارد	میانگین تفاضل‌ها	مقدار شبیه‌سازی شده	مقدار اندازه‌گیری شده	روش آبیاری	شوری آب آبیاری
(F≤0.05) P	F coefficient	standard error	mean difference (g m ⁻²)	Simulated value (g m ⁻²)	Measured value (g m ⁻²)	Irrigation method	Irrigation water salinity
0.004	14.64	27.09	-38.32	432.15	470.47	F	C ₁ = 3 dS m ⁻¹
		15.51	21.94	443.26	421.32	D ₂₀	
		12.15	17.19	434.33	417.14	D ₄₀	
		33.87	47.91	436.72	388.81	D ₆₀	
0.11	4.78	14.07	19.90	470.41	450.51	F	C ₂ = 5 dS m ⁻¹
		36.35	-51.41	452.83	504.24	D ₂₀	
		38.26	54.12	401.92	347.80	D ₄₀	
		30.34	42.91	407.73	364.82	D ₆₀	
0.35	0.62	19.41	27.45	436.79	409.34	F	C ₃ = 8 dS m ⁻¹
		11.20	15.84	401.92	386.08	D ₂₀	
		23.30	32.96	350.51	317.55	D ₄₀	
		14.09	-19.94	312.19	332.13	D ₆₀	

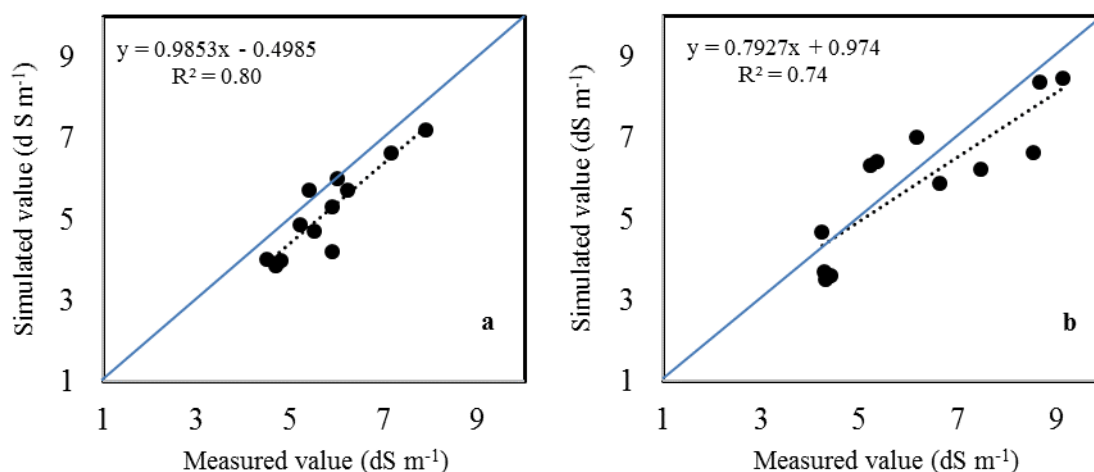


شکل ۱- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه (a) و بیولوژیک (b) گندم
Figure 1- Correlation between the measured and simulated grain yield (a) and biological yield (b) of wheat

ضعیفی از شوری خاک در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک داشت. میانگین تفاضل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شوری خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری بین صفر تا ۰/۸۵ (به‌طور متوسط ۰/۶۴ واحد) بود. این مقدار برای عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک بین ۰/۴۳ تا ۱/۰ دسی‌زیمنس بر متر (به‌طور متوسط ۰/۸۸ واحد) بود (جدول ۸). اگرچه در مورد تیمار تیپ با فاصله ۶۰ سانتی‌متر و تحت شرایط آبیاری با آب با شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر، مقدار شوری خاک شبیه‌سازی شده مدل در حدود دو واحد کمتر از شوری خاک اندازه‌گیری شده بود (جدول ۸).

شبیه‌سازی شوری خاک

نتایج شبیه‌سازی شوری خاک با بررسی شاخص‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون، مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده نشان داد که مدل تحت شرایط آزمایش حاضر میزان شوری خاک در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری خاک را با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۵). همبستگی بالای مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری خاک در این دو عمق در شکل ۲ نیز در تأیید این موضوع است. هرچند با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۵، مدل شبیه‌سازی



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر (a) و عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر (b)
Figure 2- Correlation between the measured and simulated soil salinity at 0-30 cm (a) and 30-60 cm (b) depth

جدول ۸- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری خاک

Table 8- Measured and simulated values of salinity at soil depths of 0-30 and 30-60 cm

میانگین تفاضل‌ها	مقدار شبیه‌سازی شده	مقدار اندازه‌گیری شده	میانگین تفاضل‌ها	مقدار شبیه‌سازی شده	مقدار اندازه‌گیری شده	روش آبیاری	شوری آب آبیاری
mean difference	Simulated value	Measured value	mean difference	Simulated value	Measured value	Irrigation method	Irrigation water salinity
(dS m ⁻¹)							
30-60 cm				0-30 cm			
0.43	4.66	4.23	-0.85	3.85	4.70	F	C ₁ = 3 dS m ⁻¹
-0.82	3.49	4.31	-0.81	3.99	4.80	D ₂₀	
-0.80	3.61	4.41	-0.50	4.00	4.50	D ₄₀	
-0.60	3.68	4.28	-0.35	4.85	5.20	D ₆₀	
-0.78	5.86	6.64	-1.70	4.20	5.90	F	C ₂ = 5 dS m ⁻¹
1.09	6.32	5.23	-0.59	5.31	5.90	D ₂₀	
1.07	6.42	5.35	0.00	6.00	6.00	D ₄₀	
0.84	7.01	6.17	0.33	5.73	5.40	D ₆₀	
-1.25	6.20	7.45	-0.80	4.70	5.50	F	C ₃ = 8 dS m ⁻¹
-0.31	8.35	8.66	-0.53	6.62	7.15	D ₂₀	
-0.70	8.44	9.14	-0.70	7.20	7.90	D ₄₀	
-1.90	6.62	8.52	-0.50	5.73	6.23	D ₆₀	

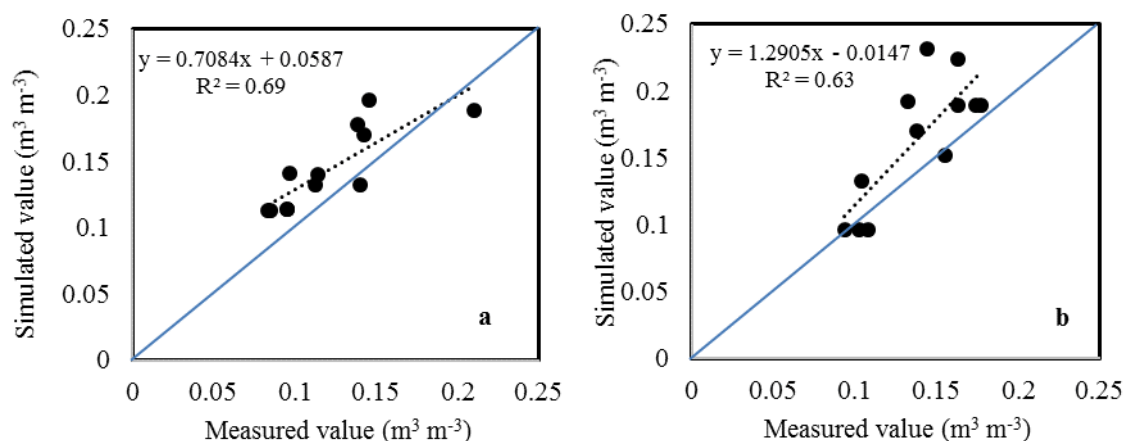
شبیه‌سازی رطوبت خاک

نتایج واسنجی مدل نشان داد که به‌جز در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متری خاک، در دو عمق دیگر میزان رطوبت حجمی خاک شبیه‌سازی شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، با توجه به مثبت بودن مقادیر میانگین خطای اریب، بیش‌برآورد شده است (جدول ۵). با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون، مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، با افزایش عمق خاک، شبیه‌سازی میزان رطوبت حجمی خاک با مدل ضعیف بود. به‌طوری‌که مقدار عددی ضریب همبستگی پیرسون از ۰/۸۳ در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری به ۰/۷۹ و ۰/۳۲ به ترتیب در عمق‌های ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری کاهش یافته است (جدول ۵).

در شکل ۳ نیز به‌وضوح دیده می‌شود که مدل در برآورد رطوبت خاک از دقت بالایی برخوردار نبود. در واقع در این شکل مدل دو رفتار متفاوت برای رطوبت خاک نشان می‌دهد. در حالیکه در عمق بالاتر و نزدیک به سطح خاک، مدل در برآورد مقادیر کم رطوبت دارای بیش‌برآورد است، ولی در عمق پایین‌تر، مدل در برآورد مقادیر کم رطوبت دارای کم‌برآورد و برای مقادیر بالای رطوبت

دارای بیش‌برآورد است. این موضوع از روی شیب خط برازش شده بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیز مشهود است؛ به عبارت دیگر کمتر از یک بودن شیب خط در شکل ۳-الف نشان‌دهنده بیش‌برآورد در مقادیر کمتر رطوبت خاک و کم‌برآورد در مقادیر بالاتر این پارامتر است. به عکس در شکل ۳-ب شیب خط بیشتر از یک است که این نشان‌دهنده کم‌برآورد در مقادیر کمتر رطوبت خاک و بیش‌برآورد در مقادیر بالای این پارامتر است؛ بنابراین مدل رفتار یکسانی در برآورد ندارد و نمی‌توان در ارتباط با رطوبت خاک به نتایج آن کاملاً استناد نمود. با توجه به همبستگی پایین بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متر، نمودار این قسمت گزارش نشد. البته در تحلیل کارآمدی مدل برای برآورد رطوبت خاک، می‌توان به درصد مورد انتظار رطوبت در هر عمق خاک نیز اشاره کرد. به‌عنوان مثال، در عمق ۶۰-۳۰ سانتیمتر (شکل ۳-ب)، مدل انتظار رطوبت‌های ۱۷ تا ۲۳ درصد حجمی برای برخی تیمارها داشته است، در حالیکه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بیانگر وجود رطوبت‌های ۱۳ تا ۱۶ درصد حجمی در عمق مذکور بوده و مدل به

خوبی نتوانسته است مقادیر واقعی رطوبت خاک تحت تأثیر تیمارهای شوری و روش آبیاری را برآورد کند.



شکل ۳- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر (a) و عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متر (b)
Figure 2- Correlation between the measured and simulated soil water content at 0-30 cm (a) and 30-60 cm (b) depth

رگرسیون وجود ندارد. پس مدل با دقت بسیار بالا و با در نظر گرفتن تمامی تغییرات برآورد بسیار مناسبی دارد و در بحث مدیریت آب و بهره‌وری آن قابل استفاده است.

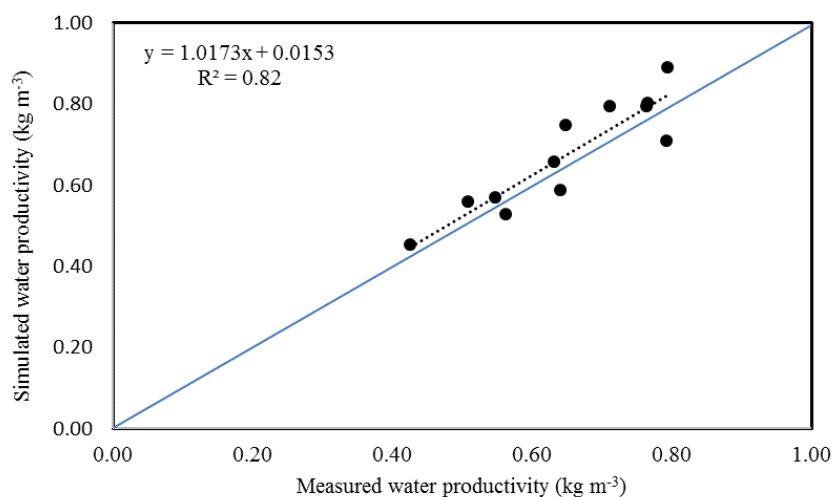
در تحلیل کارایی مناسب مدل برای شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری آب (که دو عبارت مختلف یعنی حجم آب مصرفی و عملکرد دانه در آن نقش دارند)، امکان رجوع به شکل ۱ نیز وجود دارد؛ جایی که مدل در برآورد عملکرد گندم دارای بیش‌برآورد است؛ لیکن در شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری آب موفق‌تر بوده و دارای کمترین خطای اریبی و انحراف نسبت به خط یک به یک هست. دلیل این مسئله کاربرد حجم‌های مختلف آب آبیاری برای تیمارهای مختلف این آزمایش بوده و چنانچه حجم ثابت آب برای همه تیمارها در نظر گرفته می‌شد، شکل‌های ۴ و ۱ شباهت‌های بیشتری با همدیگر داشتند و کارایی مدل در شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری همانند کارایی این مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول به‌دست می‌آمد.

شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری آب

همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون، مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، کارآمدی مدل در شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری مناسب ارزیابی شد لیکن با توجه به منفی بودن میانگین خطای اریب، این مدل دارای اندکی بیش‌برآورد بوده است (جدول ۵). موضوع بیش‌برآورد مدل از طریق محاسبه میانگین تفاضل‌ها در هر یک از تیمارهای C_1 ، C_2 یا C_3 نیز قابل استنباط است (جدول ۹). همچنین، تفاوت مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شاخص بهره‌وری در هیچ کدام از سطوح شوری C_1 ، C_2 یا C_3 معنی‌دار نبوده است که بیانگر کارایی این مدل در برآورد شاخص بهره‌وری آب هست. این مسئله در شکل ۴ نیز به‌خوبی مشهود است. در این شکل، اختلاف بین شیب خط با مدل مبنا و عرض از مبدأ بسیار اندک است و احتمالاً تفاوت معنی‌داری بین دو مدل

جدول ۹- نتایج آزمون F و خطای استاندارد تفاوت‌های بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شاخص بهره‌وری آب گندم
Table 9- Results of F-test and standard error of differences between measured and simulated values of wheat water productivity

شوری آب آبیاری	روش آبیاری	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار شبیه‌سازی شده	میانگین تفاضل‌ها	خطای استاندارد	ضریب F	P (F<=0.05)
Irrigation water salinity	Irrigation method	Measured value (kg m ⁻³)	Simulated value (kg m ⁻³)	Mean difference (kg m ⁻³)	Standard error	F coefficient	P (F≤0.05)
C ₁ = 3 dS m ⁻¹	F	0.64	0.59	0.05	0.037	0.11	0.10
	D ₂₀	0.76	0.80	-0.04	0.028		
	D ₄₀	0.79	0.82	-0.03	0.022		
	D ₆₀	0.79	0.89	-0.10	0.069		
C ₂ = 5 dS m ⁻¹	F	0.55	0.57	-0.02	0.017	1.14	0.46
	D ₂₀	0.79	0.71	0.08	0.057		
	D ₄₀	0.65	0.75	-0.10	0.071		
	D ₆₀	0.71	0.80	-0.08	0.059		
C ₃ = 8 dS m ⁻¹	F	0.43	0.45	-0.03	0.020	1.06	0.48
	D ₂₀	0.63	0.66	-0.03	0.018		
	D ₄₀	0.51	0.56	-0.05	0.037		
	D ₆₀	0.56	0.53	0.03	0.024		



شکل ۴- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب
Figure 4- Correlation between the measured and simulated water productivity

در سطح مزرعه با دقت بالایی برآورد نمود. مقدار ضریب تبیین برای عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و بهره‌وری آب به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۰ و ۰/۹۱ بود که نشان از دقت بالای مدل دارد. در مقایسه، نتایج ضریب تبیین در آزمایش حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) در مورد برآورد عملکرد ذرت ۰/۸۴ گزارش شده است.

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که با واسنجی دقیق، مدل SALTMED می‌تواند عملکرد محصول، بهره‌وری آب و شوری خاک را برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) و غرقابی با دقت مناسب برآورد کند. در آزمایش حاضر نیز مدل میزان عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و بهره‌وری آب را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده

امداد و تافته (۱۳۹۹) با بررسی کارایی مدل SALTMed در شبیه‌سازی عملکرد گندم در سه منطقه دشت آزادگان استان خوزستان با شوری‌های متفاوت خاک گزارش کردند که این مدل از کارایی و دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد گندم برخوردار است. در آزمایش دیگر، عبدالرئوف و همکاران (۲۰۲۱) نتیجه گرفتند که مدل SALTMed تحت شرایط کم‌آبیاری دقت خوبی در برآورد وزن ماده خشک و عملکرد دانه ارقام گندم دارد. کارآمدی این مدل در شبیه‌سازی میزان عملکرد محصولات مختلف در شرایط شور نظیر ذرت (نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۵)، نیشکر (گلایی و همکاران، ۲۰۰۹)، کینوا (رزاقی و همکاران، ۲۰۱۱) و سورگوم (رنجبر و همکاران، ۲۰۱۵) نیز گزارش شده است.

دقت بالای مدل در برآورد عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه با ضرایب تبیین بیش از ۰/۸۰ بیانگر قابلیت استفاده از مدل در شرایط مزرعه است. با این حال، مشاهده‌ی اندکی بیش‌برآورد در برآورد عملکرد محصول (خطای اریب حدود ۱۴ گرم بر مترمکعب) نشان‌دهنده‌ی وجود عدم قطعیت‌های ساختاری مدل است. این بیش‌برآورد که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده (حسن‌لی و همکاران، ۱۳۹۴؛ آلی و همکاران، ۲۰۱۵؛ رامش واران و همکاران، ۲۰۱۴؛ پولویتو و همکاران، ۲۰۱۳)، احتمالاً ناشی از عدم لحاظ ترکیب شیمیایی آب آبیاری، ساده‌سازی روابط فیزیولوژیک گیاه در مدل و حساسیت بالای مدل به پارامترهای تنش شوری است. برای نمونه، حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) در آزمایش خود این موضوع را به قلیایی بودن آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش نسبت دادند؛ چرا که مدل SALTMed نمی‌تواند قلیاییت آب آبیاری را در نظر بگیرد.

بر اساس نتایج واسنجی انجام‌شده، تحت شرایط آزمایش، مدل به‌خوبی توانست میزان شوری خاک را تا عمق ۶۰ سانتی‌متری شبیه‌سازی کند. این عمق معادل ناحیه‌ای است که بیشترین فعالیت ریشه گندم در این قسمت انجام می‌گیرد؛ بنابراین، مطابقت مدل با داده‌های

میدانی بیانگر صحت عملکرد فیزیکی معادلات انتقال نمک مدل در لایه‌های سطحی-میانی خاک هست. میزان ضریب همبستگی (r) بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شوری خاک در عمق‌های ۰-۳۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۹۱ بود. علاوه بر این، شاخص توافق ویلموت (d) بین مقادیر شبیه‌سازی و واقعی شوری در اعماق مختلف بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۶ به‌دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل بوده است (رنجبر و همکاران، ۲۰۱۵).

با این حال، با افزایش عمق خاک، کارآمدی مدل برای برآورد میزان شوری به‌ویژه در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متر کاهش یافت. با توجه به اینکه در روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ)، گیاهان معمولاً تمایل دارند تا ناحیه ریشه خود را در ناحیه بالایی توسعه دهند، بنابراین در این منطقه فرایندهایی مانند تبخیر و جذب با گیاه به دلیل فعالیت بیشتر در لایه‌های سطحی پویاتر و سریع‌تر انجام می‌پذیرد (تانجی، ۱۹۹۰). لذا به نظر می‌رسد این موضوع یکی از دلایل دقت کمتر مدل در برآورد شوری لایه‌های پایین‌تر خاک به دلیل فعالیت ریشه‌ای کمتر گیاه در آن اعماق باشد. علاوه بر تخمین مناسب شوری خاک با مدل، اصولاً تخمین خوب رطوبت خاک نیز پیامدهای کاربردی در مدیریت آبیاری مزرعه به کمک مدل‌سازی کامپیوتری خواهد داشت. این بدین معنی است که در صورت تخمین مناسب رطوبت خاک، SALTMed قادر خواهد بود مقدار آب آبیاری مورد نیاز را برای رساندن نیمرخ رطوبت خاک از یک رطوبت معین به رطوبت مورد نظر محاسبه کند؛ میزان رطوبتی از خاک که معمولاً در حد مطلوب تخلیه مجاز برای گیاه است (هیریچ و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر، مدل نتوانست به‌خوبی رطوبت خاک در عمق‌های مختلف را شبیه‌سازی کند. البته انطباق متفاوت مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط مدل SALTMed در آزمایش‌های دیگر محققین نیز گزارش شده است (امداد و تافته، ۱۳۹۹؛ سیلوا و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج شبیه‌سازی مزرعه سورگوم تحت تنش شوری در نواحی خشک (رنجبر و همکاران، ۲۰۱۵)

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت واسنجی موفق، مدل SALT MED این توانایی را دارد که عملکرد محصول، بهره‌وری آب و شوری خاک را برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) و غرقابی با دقت مناسبی برآورد کند. بر اساس نتایج اعتبارسنجی مدل و با توجه به اینکه هرچه مجذور میانگین مربعات خطا و مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کمتر و از سوی دیگر ضریب همبستگی پیرسون بیشتر باشد، کارآمدی مدل در شبیه‌سازی بیشتر است؛ مدل میزان عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و بهره‌وری آب را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده با دقت بالایی تخمین زده است. همچنین، از دیدگاه کاربردی و با توجه به قابلیت‌های مختلف آن، مدل SALT MED می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب و مؤثر برای اطلاع از تغییرات شوری خاک به‌منظور پایش شوری خاک، مدیریت مناسب‌تر آبیاری و همچنین آشنایی خاک‌های شور مورد استفاده قرار گیرد.

نیز نشان داد که رطوبت خاک در اعماق مختلف بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شد و با افزایش شوری این اختلاف بیشتر شد. کاهش نسبی دقت در تخمین رطوبت در عمق‌های پایین‌تر می‌تواند ناشی از عدم فعالیت ریشه در این عمق به‌خاطر تجمع زیاد نمک به دلیل نقش جریان عمقی (تانجی، ۱۹۹۰) باشد که در مدل به‌صورت ساده‌سازی شده لحاظ شده است. این موضوع نیازمند بررسی‌های بیشتر با استفاده از مدل‌های ترکیبی و یا توسعه مدل حاضر هست.

همچنین، بر اساس نتایج آزمایش حاضر، میزان ضریب تبیین بالاتر برای بهره‌وری آب (۰/۹۱) نسبت به نتایج گزارش شده برای سایر محصولات نشان می‌دهد که این مدل در پاسخ به تغییرات مصرف آب، حساس‌تر از ذرت (نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۵) و نیشکر (گلایی و همکاران، ۲۰۰۹) عمل می‌کند که مزیتی مهم برای مدیریت آبیاری در مناطق با محدودیت منابع آب به شمار می‌رود.

فهرست منابع

۱. امداد، محمدرضا و تافته، آرش، ۱۳۹۹. بررسی کارایی مدل SALT MED در شبیه‌سازی عملکرد گندم و شوری در شرایط خاک شور و غیر شور. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۴(۴)، صص. ۹۴۶-۹۳۳.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v34i4.84734>
۲. بوعدار، ناجی، اگدرنژاد، اصلاان و برومندنسب، سعید، ۱۴۰۳. بررسی کارایی مدل SALT MED در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری در شهرکرد. مدل‌سازی و مدیریت آب‌وخاک، ۴(۳)، صص. ۲۴۰-۲۳۹.
۳. حسن‌لی، محمد، افراسیاب، پیمان و ابراهیمیان، حامد، ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALT MED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. نشریه تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۴۶، صص. ۴۹۸-۴۸۷.
[10.22059/ijswr.2015.56738](https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.56738)
۴. رحیمیان، محمدحسن و غلامی، حسن، ۱۴۰۱. تحلیلی بر وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی، نشریه آب و توسعه پایدار، ۶(۳)، صص. ۱۱۶-۱۰۷.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i3.2204.1135>
۵. رنجبر، آرش، رحیمی‌خوب، علی، ابراهیمیان، حامد و وراوی‌پور، مریم، ۱۳۹۶. شبیه‌سازی توأمان انتقال توأمان رطوبت، نیترا و آمونیوم در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D در آبیاری جویچه‌ای ذرت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۳۱(۲)، صص. ۲۷۶-۲۵۹.
[10.22092/jwra.2017.113169](https://doi.org/10.22092/jwra.2017.113169)

۶. عصاره، علی، درخشان‌نژاد، زهرا، سلطانی محمدی، امیر و گوشه، محی‌الدین، ۱۳۹۳. شبیه‌سازی رطوبت خاک با مدل HYDRUS-1D در شرایط کشت گندم. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷(۱)، صص. ۸۱-۹۲.
۷. نصرالهی، علی‌حیدر، برومند نسب، سعید، هوشمند، عبدالرحیم و حیدری‌نیا، مولود، ۱۳۹۵. ارزیابی مدل SALTMED تحت شرایط مختلف مدیریت‌های آبیاری قطره‌ای با آب‌شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی/ایران)، ۴۷(۳)، صص. ۵۶۷-۵۶۱. **Doi/10.22059/ijswr.2016.59326**
۸. نظرنژاد، حبیب، میریعقوب‌زاده، میرحسن و عیشویی، ادیت، ۱۳۹۵. بررسی تغییرات شوری خاک در حاشیه غربی دریاچه ارومیه با استفاده از مدل SALTMED. پژوهش در اکوسیستم‌های زراعی، ۳، صص. ۳۳-۴۱.
9. Abdelraouf R.E., El-Shawadfy M.A., Dewedar O.M., and Hozayn M., 2021. Field and modelling study for deficit irrigation strategy on roots volume and water productivity of wheat. *Journal of Water and Land Development*, 49(IV-VI), pp.129-138. **Doi/10.24425/jwld.2021.137105**
10. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, 56, FAO, Rome, Italy.
11. Aly, A. A., Al-Omran, A. M., and Khasha, A. A., 2015. Water management for cucumber: Greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(1), pp.1-11.
12. Ayers, R. S. and Westcot, D. W., 1989. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage Paper*, 29. FAO. Rome. Italy.
13. Cardon, G. E., and Letey, J., 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society of American Journal*, 56, pp.1876-1880. **<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060038x>**
14. Golabi, M., Naseri, A. A., and Kashkuli, H. A., 2009. Evaluation of SALTMED model performance in irrigation and drainage of sugarcane farms in Khuzestan province of Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), pp.874-880.
15. Hirich, A., Choukr-Allah, R., Ragab, R., Jacobsen, S.E., El Youssefi, L., and El Omari, H., 2012. The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, 3, pp.342-359.
16. James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R., 2013. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Vol. 2. Springer, New York.
17. 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, pp.229-238. **Doi/10.1002/ird.1727**
18. Ragab R., 2015. Integrated management tool for water, crop, soil and N- fertilizers: The Saltmed Model. *Irrigation and Drainage*, 64(1), pp.1-12. **10.1002/ird.1907**
19. Ragab, R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17(4), pp.345-361. **Doi/10.1016/S1364-8152(01)00079-2**
20. 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, pp.67-88. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.022>**
21. 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, pp.89-107. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.023>**
22. Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A., and Ragab, R., 2014. The effect of saline irrigation water on the yield of pepper: experimental and modeling study. Wiley Online Library: Retrieved February 18, 2015, from [http:// onlinelibrary. Wiley. com/](http://onlinelibrary. Wiley. com/) **Doi/ 10. 1002/ird.1867/abstract**

23. Ramos, T. B., Šimůnek, J., Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Prazeres, A., and Pereira, L. S., 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111, pp.87-104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.007>
24. Ranjbar, G. H., Ghadiri, H., Razzaghi, F., Sepaskhah, A. R., and Edalat, M., 2015. Evaluation of the SALTMed model for sorghum under saline conditions in an arid region. *International Journal of Plant Production*, 9(3), pp.373-392. **Doi/10.22069/ijpp.2015.2222**
25. Razzaghi, F., Plauborg, F., Ahmadi, S.H., Jacobsen, S.E., Andersen, M.N., and Ragab, R., 2011. Simulation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) response to soil salinity using the Saltmed model. In IICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage. Tehran, Iran.
26. Saskia, 2019. How to normalize the RMSE. Retrieved June 18, 2021 from: <https://www.marinedatascience.co/blog/2019/01/07/normalizing-the-rmse/#>
27. Silva, L.L., Ragab, R., Duarte, I., Lourenço, E., Simões, N., and Chaves, M.M., 2013. Calibration and validation of SALTMed model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. *Irrigation Science*, 31, pp.651-659. **Doi/10.1007/s00271-012-0341-5**
28. Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M. Th., 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
29. Simunek, J., van Genuchten, M. Th., and Sejna, M., 2012. HYDRUS: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55 (4), pp.1263-1274. **Doi/10.13031/2013.42239**
30. Tanji, K.K. (1990). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE. Publication. 619 p.
31. Van Genuchten, M.T., Leij, F.J. and Yates, S.R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. EPA Report, 600/2-91/065, *USA Salinity Laboratory*, USDA.
32. Zhou, H., and zhi Zhao, W., 2019. Modeling soil water balance and irrigation strategies in a flood-irrigated wheat-maize rotation system. A case in dry climate, China. *Agricultural Water Management*, 221, pp.286-302. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.011>