

## ارزیابی شوری خاک و عملکرد گندم با استفاده از مدل SALTMED (مطالعه موردی: دشت بوکان)

اسعد سلطانی\*<sup>۱</sup>، سید محمود طباطبایی<sup>۲</sup>، سید جمیل قادری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

۱- دانش آموخته دوره دکتری آبیاری و زه‌کشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۲- استادیار گروه آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۳- استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد مهاباد

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: asad.soltani@gmail.com

### چکیده

دشت بوکان با بیشترین تولید گندم در استان به عنوان انبار غله استان آذربایجان غربی نامیده می‌شود. شوری آب و خاک می‌تواند باعث نقصان محصول گردد. در این تحقیق از مدل کامپیوتری SALTMED برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط شوری‌های مختلف آب آبیاری استفاده گردید. آزمایش‌های صحرایی با پنج تیمار شوری آب آبیاری (۳/۵، ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ دسی‌زیمنس برمتر) و یک تیمار شاهد (آب رودخانه سیمینه‌رود با شوری ۲ دسی‌زیمنس برمتر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. مقادیر  $R^2$ ، NMRSE، CRM و ME در عمق‌های مختلف خاک و برای تیمارهای مختلف محاسبه گردید. بررسی نتایج نشان داد که مدل SALTMED از دقت بالایی برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک و همچنین عملکرد محصول برخوردار است. مقادیر ضریب تعیین برای شبیه‌سازی رطوبت خاک ۰/۸۷، شوری خاک ۰/۸۵ و عملکرد محصول ۰/۹۲ به دست آمد. با توجه به روند نتایج به دست آمده با افزایش سطح شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک افزایش یافت اما خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول کاهش پیدا کرد. نتایج شبیه‌سازی با مدل SALTMED نشان داد که دقت مدل برای عملکرد محصول بهتر از رطوبت خاک و برای رطوبت خاک بهتر از شوری خاک بود.

واژه‌های کلیدی: دشت بوکان، شبیه‌سازی، شوری خاک، عملکرد گندم، نقصان محصول.

## Evaluation of Soil Salinity and Wheat Yield Using the SALTMED Model (Case Study: Bukan Plain)

A Soltani\*<sup>1</sup>, S M Tabatabai<sup>2</sup>, S J Ghadri<sup>3</sup>

Received: November 13, 2019 Accepted: December 8, 2020

<sup>1</sup>PhD, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water & Soil, Univ. of Zabol, Iran

<sup>2</sup>Assis. Prof. Dept. of Water Engineering, Faculty of Water & Soil, Univ. of Zabol, Iran

<sup>3</sup>Assis. Prof. Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric, Azad Univ. of Mahabad, Iran

\* Corresponding Author, Email: asad.soltani@gmail.com

### Abstract

The Bukan plain with its largest wheat production in the province is referred as the West Azerbaijan grain storehouse. Water and soil salinity can cause crop reduction. In this research, a computer model of SALTMED was used to simulate wheat yield under different salinity conditions of irrigation water. Field experiments were conducted for five irrigation water treatments with salinities of 3.5, 4.5, 5.5 and 6.5 dS m<sup>-1</sup> and a control treatment (Simineh Rood water with 2 dS m<sup>-1</sup> salinity) in a completely randomized blocks design. R<sup>2</sup>, NMRSE, CRM and ME values were calculated at different soil depths for different treatments. The results showed that the SALTMED model had a high accuracy in simulation of the soil moisture and salinity as well as the crop yield. The coefficient of determination for simulating soil moisture was 0.87, soil salinity 0.85 and crop yield 0.92. According to the results, with increasing salinity level of irrigation water, the model accuracy in simulation of the soil moisture was increased, but the model error was decreased in simulating of the crop yield. The simulation results of the SALTMED model showed that the accuracy of the model for crop yields was better than that of soil moisture and for soil moisture was better than that of soil salinity.

**Keywords:** Bukan Plain, Product loss, Simulation, Soil salinity, Wheat yield.

### مقدمه

فرآیندهای کلیدی نظیر تبخیر و تعرق، جذب آب توسط گیاه، انتقال آب و املاح تحت سیستم‌ها و استراتژی‌های مختلف آبیاری، کودآبیاری، زهکشی، آب زیرزمینی کم عمق، چرخه نیتروژن و ارتباط بین عملکرد محصول و استفاده از آب می‌باشد. در این مطالعه از نسخه ۳.۰۳.۱۹ مدل SALTMED که در سال ۲۰۱۳ ارائه شده، استفاده گردید. تفاوت آن با نسخه ۲۰۰۹ در محاسبه حجم آب مصرفی است. مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی این مدل صورت گرفته است محمدی و همکاران (۲۰۱۵)، کایا و همکاران (۲۰۱۵) و یازار و اینسکایا (۲۰۱۲) به نتایج مشابهی در استفاده از این مدل در زمینه عملکرد محصول دست یافتند. نتایج حاکی از توانمندی بالای مدل در مناطق مورد استفاده بود. محمدی و همکاران (۲۰۱۵)، آلی و همکاران (۲۰۱۵)، هانی و همکاران (۲۰۱۴)،

بیشتر مدل‌های موجود برای سیستم‌های خاص آبیاری، فرایندهای خاص مثل جابجایی آب و املاح، نفوذ، آبشویی یا برداشت آب بوسیله ریشه گیاه طراحی شده‌اند. مدل مدیریتی SALTMED می‌تواند همزمان سیستم‌های مختلف آبیاری، خاک‌های گوناگون، طبقات خاک گیاهان و درختان مختلف و استراتژی‌های متفاوت مدیریت آب، نیاز آبشویی و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری را مورد توجه قرار دهد. مدل SALTMED با استفاده از سیستم‌های آبیاری مختلف انواع خاک و لایه‌بندی آن، محصولات مختلف، تدابیر مختلف مدیریت آب آبیاری نیاز آب شویی و کیفیت آب این کمبود در طراحی مدل‌های موجود را تا حدی برطرف کرده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی

جغرافیایی  $36^{\circ} 32' 63''$  شمالی و ارتفاع ۱۳۸۶ متر از سطح دریا واقع در شمال بوکان (جاده میاندواب) به دست آمد. آزمایش‌های مزرعه‌ای این تحقیق از مهر ماه سال ۱۳۹۷ تا تیر ماه سال ۱۳۹۸ انجام شد. آمار هواشناسی مربوط به این محدوده زمانی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بوکان تهیه گردید (جدول ۱). بارندگی در طول دوره کشت،  $407/95$  میلی‌متر، حداکثر و حداقل دما به ترتیب  $37/6$  و  $2/2-$  درجه سلسیوس در خرداد ماه و دی ماه، مجموع تبخیر- تعرق پتانسیل در طول دوره  $668/3$  میلی‌متر بود. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مزرعه در جدول شماره ۲ ارائه شده است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود که در پنج سطح شوری آب آبیاری بر یک رقم گندم به نام پیشگام اعمال گردید. برای برنامه‌ریزی و تعیین زمان آبیاری، از پارامتر رطوبت خاک استفاده شد. بدین منظور در روزهای قبل از آبیاری از اعماق مختلف خاک نمونه‌برداری، سپس درصد رطوبت خاک اندازه‌گیری و با معیار تامین نیاز آبی گیاه به میزان ۱۰۰ درصد، آبیاری صورت گرفت. برای تعیین کمبود رطوبت خاک از رابطه زیر استفاده گردید (قره‌داغی و همکاران ۲۰۰۵)

جذب سدیم محاسبه و آب آبیاری غیر شور رودخانه، از کنار مزرعه به مخازن ذخیره پمپاژ گردید. برای آب شور نمک خام صنعتی به مقدار لازم با استفاده رابطه  $TDS = EC \times K \times 640$  در آب حل شد. آب شور به کمک سیستم پمپاژ ثانویه به کرت‌ها رسید. در رابطه مذکور TDS مقدار کل نمک‌های محلول در آب (میلی‌گرم در لیتر)، EC هدایت الکتریکی محلول آب شور (دسی‌زیمنس بر متر) و K ضریب خلوص نمک را نشان می‌دهد (برای نمک خالص برابر یک است). با توجه به اطلاعات شوری خاک منطقه طی چند سال گذشته که به طور متوسط هر سال یک واحد به شوری خاک اضافه شده بود، تیمارهای شوری  $S0$  (آب سیمینه رود تیمار شاهد ۲ دسی‌زیمنس بر متر)،  $S1$  ( $3/5$  دسی‌زیمنس بر متر)،  $S2$  ( $4/5$  دسی‌زیمنس بر متر)،  $S3$  ( $5/5$  دسی‌زیمنس بر متر) و  $S4$  ( $6/5$  دسی‌زیمنس بر متر) انتخاب شد. ویژگی‌های کیفی تیمارها در جدول ۳ آورده شده است. گندم پاییزه در ۲۰ مهر

هریچ و همکاران (۲۰۱۱)، کایا و همکاران (۲۰۱۵)، حسن لی و همکاران (۲۰۱۶) و رجب و همکاران (۲۰۰۵) عملکرد مدل را در جهت ارزیابی رطوبت مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از عملکرد خوب مدل در این زمینه بود. طی تحقیقی سیلوا و همکاران (۲۰۱۳) در کشور پرتغال عملکرد دانه و ماده خشک نخود و رطوبت خاک را در دو سال خشک و تر توسط مدل SALTMED شبیه‌سازی کردند. مدل با دقت بالایی پارامترهای مذکور را شبیه‌سازی کرد. با توجه به اینکه کشت غالب منطقه گندم می‌باشد و در زمینه بررسی کارایی مدل SALTMED در دشت بوکان تحقیقی صورت نگرفته است لذا این تحقیق با هدف شبیه‌سازی رطوبت، شوری و عملکرد محصول توسط مدل SALTMED انجام گرفت.

#### مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق برای واسنجی، صحت‌سنجی مدل از مزارع دشت بوکان با طول جغرافیایی  $16^{\circ} 12' 46''$  شرقی، عرض

$$SMD = (W_{fc} - W_i) \cdot \rho_b \cdot D \quad [1]$$

که در آن SMD: کمبود رطوبت خاک (میلی-متر)،  $W_{fc}$  و  $W_i$ : به ترتیب درصد جرمی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و موجود در خاک،  $\rho_b$ : چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و  $D$ : عمق توسعه ریشه (سانتی‌متر) می‌باشد. تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از نرم افزار CROPWAT8.0 (به روش پنمن-مانتیث) و با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه به دست آمد. برای تهیه زمین و کنترل علف‌های هرز، طبق برنامه آبیاری انجام گرفت و پس از مرحله گاورو شدن زمین، در عمق ۲۰-۲۵ سانتی‌متر شخم زده شد. جهت خرد کردن کلوخه‌ها و نرم کردن بستر، دیسک زده شد. آب رودخانه در آزمایشگاه تجزیه و مقادیر هدایت الکتریکی آب، غلظت‌های کلسیم، منیزیم و سدیم تعیین شد و نسبت

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial [k(\theta) \frac{\partial y(z+\Psi)}{\partial x}]}{\partial z} - S_w \quad [2]$$

$$RY = \frac{\sum S(Z,Z,f)}{\sum S_{max}(X,Z,f)} \quad [3]$$

که در آن  $\theta$ : رطوبت خاک در زمان  $t$  و عمق بر  $z$  (درصد حجمی)،  $k(\theta)$ : هدایت هیدرولیکی (سانتی متر بر دقیقه)،  $\Psi$ : پتانسیل ماتریک (سانتی متر) و  $S_w$ : برداشت و یا جذب املاح توسط ریشه (سانتی متر بر دقیقه) و  $RY$ : عملکرد دانه (تن در هکتار) است. داده‌های ورودی مدل شامل ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های گیاه، داده‌های هواشناسی، مدیریت آبیاری و پارامترهای مدل است (رجب و همکاران ۲۰۰۲). در صورت نبود اطلاعات دقیق، پایگاه داده‌های مدل با بیش از دویست نوع گیاه و چهل نوع خاک مختلف موارد پیش فرض را ارائه می‌دهد.

### واسنجی مدل

برای واسنجی مدل SALTMED ابتدا اطلاعات مربوط به خاک از مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی به مدل داده شد. داده‌های هواشناسی و اطلاعات اقلیمی سال ۹۷-۹۸ نیز از ایستگاه هواشناسی بوکان تهیه گردید مقادیر رطوبت و شوری اولیه خاک که تا عمق ۱۰۰ سانتی متر اندازه‌گیری شده بود به مدل داده شد. به منظور واسنجی مدل برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه از ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده تیمار شاهد ( $S_0$ ) استفاده شد. بدین ترتیب از داده‌های تاریخ ۱۳۹۷/۷/۲۰ تا ۱۳۹۸/۳/۳ استفاده گردید. مدل برای تیمار شاهد اجرا، سپس مقایسه رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های فوق‌الذکر انجام شد و مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_{sat}$ )، محتوای نسبی آب<sup>۱</sup>، فشار هیگروسکوپیک<sup>۲</sup> و ضریب لاندا<sup>۳</sup> ( $\lambda$ ) تغییر یافت تا آنجا بیشترین تطابق بین داده‌های واقعی رطوبت و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل حاصل گردید مقادیر پیش‌فرض و نهایی پارامترها استفاده شده در واسنجی مدل در جدول ۵ آورده شده است. صحت‌سنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های باقی مانده تیمار شاهد (۱۳۹۸/۳/۱۷ تا ۱۳۹۸/۴/۲۰) انجام گرفت. بدین منظور رطوبت خاک با

ماه سال ۱۳۹۸ با فاصله ردیف ۱۲ سانتی متر، فاصله بوته حدود ۳ سانتی متر و عمق حدود ۴ سانتی متر کشت شد. مساحت هر کرت حدود ۹ متر مربع، فاصله بین کرت‌ها یک متر بود. مبارزه با علف‌های هرز در مرحله خوشه‌دهی با دست انجام گرفت. به منظور شیوع بیماری زنگ زرد، در ۳۰ اردیبهشت از قارچ‌کش تبوکنازول استفاده گردید. عملکرد بوته‌های گندم واقع در هر کرت سطح برداشت و توسط خوشه‌کوب آزمایشگاهی، عملکرد دانه با رطوبت ۱۲ درصد اندازه‌گیری شد (حسینی و همکاران ۲۰۱۳). برداشت به صورت کف‌بر و پس از حذف یک خط حاشیه پلات و نیم‌متر از طرفین انجام گرفت. برای رسیدن به اهداف این تحقیق، در طول دوره رشد ۸ مرحله نمونه برداری (جدول ۴) از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متر صورت گرفت و رطوبت به صورت درصد حجمی تعیین شد.

### مدل SALTMED

اکثر مدل‌های طراحی شده برای یک سیستم آبیاری خاص یا یک فرایند خاص مثل حرکت آب و املاح، نفوذ، آبشویی جذب آب توسط ریشه، یا ترکیبی از این‌ها طراحی شده است. مدل SALTMED شامل معادلات تبخیر-تعرق، جذب آب توسط گیاه، انتقال آب و املاح تحت سیستم‌های مختلف آبیاری، زهکشی و ارتباط بین عملکرد محصول و مصرف آب است. در این مدل تبخیر-تعرق با معادله پنمن-مانتیت اصلاح شده محاسبه می‌شود (آلن و همکاران ۱۹۹۸). در این مدل در صورت نداشتن داده‌های هواشناسی (مانند دما، تابش، سرعت باد)، می‌توان از داده‌های تبخیر از تشت کلاس A برای محاسبه تبخیر-تعرق با توجه به روش ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ استفاده کرد. برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از معادله ۲ و برای عملکرد دانه از معادله ۳ استفاده می‌شود.

3-Lambda

1-Residual Water Content

2 -Bubling Pressure

مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. آماره NRMSE نشان می‌دهد که اختلاف بین هر یک از متغیرهای مشاهده‌ای و مقدار متناظر پیش‌بینی شده تا چه حد می‌باشد. هرچه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر این مدل است. NRMSE هم‌بعد با پارامترهای مورد بررسی است. ضریب تعیین نسبت پراکندگی را بین مقادیر اندازه-گیری و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. ضریب باقیمانده نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برابر باشند مقادیر پارامترهای خطای نرمال شده، ضریب باقی مانده و حداکثر خطا برابر صفر و مقدار آماره ضریب تعیین برابر یک خواهد بود.

استفاده از مدل واسنجی شده شبیه‌سازی شد. ارزیابی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب باقیمانده (CRM) و حداکثر خطا (ME)، به کمک روابط ۴ تا ۷ انجام گرفت (محمدی و همکاران ۲۰۱۵).

$$NRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad [4]$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad [5]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad [6]$$

$$ME = \max |P_i - O_i| \quad [7]$$

که در آن‌ها:  $P_i$  داده‌های برآورد شده به وسیله مدل،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $\bar{O}$  میانگین داده‌های

جدول ۱- میانگین آمار ماهانه هواشناسی منطقه مورد آزمایش در طول سال زراعی ۹۸-۹۷.

ماه	حداقل دما (°C)	حداکثر دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (m day <sup>-1</sup> )	میانگین ساعات آفتابی (hr)	بارندگی (mm)	تبخیر تعرق پتانسیل (mm day <sup>-1</sup> )
مهر	۹/۲	۲۲/۴	۴۷/۴	۲/۲	۳/۸	۲۹/۰۲	۱۰۷/۲
آبان	۳/۹	۱۲/۵	۶۸/۵	۱/۸	۳/۸	۵۴/۰۱	۳۶/۸
آذر	۰/۴	۹/۴	۶۹/۷	۲/۲	۳/۵	۸۹/۸۰	۷/۴
دی	-۲/۲	۷/۷	۶۸/۶	۲	۳/۱	۵۱/۷۱	۲
بهمن	-۱/۵	۹/۹	۶۶/۲	۱/۶	۳/۲	۳۳/۶۰	۰
اسفند	۱/۲	۱۱	۶۷/۷	۲/۱	۳/۳	۶۶/۰۰	۵
فروردین	۵/۱	۱۵/۹	۶۴/۱	۲/۲	۶	۴۹/۲۰	۷۲/۱
اردیبهشت	۱۰/۴	۲۵/۶	۴۹/۲	۱/۷	۷	۳۴/۶۰	۱۰۲/۳
خرداد	۱۵/۱	۳۷/۶	۳۲/۵	۱/۴	۸	۰/۰۰	۱۴۷/۷
تیر	۱۹/۷	۳۳/۸	۲۲/۹۵	۲/۵	۸	۰/۰۱	۱۸۷/۸

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

عمق خاک (cm)	بافت	چگالی ظاهری (g cm <sup>-3</sup> )	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (%)	رطوبت حجمی پژمردگی (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
۲۰-۰	Clay loam	۱/۴۲	۲۴	۱۵	۵/۸	۲۵/۴	۶۸/۸
۴۰-۲۰	Clay loam	۱/۴۳	۲۳	۱۵	۵/۸	۲۳/۴	۷۰/۸
۶۰-۴۰	Clay loam	۱/۴۹	۲۳	۱۵	۵/۸	۲۵/۴	۶۸/۸
۸۰-۶۰	Clay loam	۱/۴۹	۲۲	۱۵	۵/۸	۲۳/۴	۷۰/۸
۱۰۰-۸۰	Clay loam	۱/۵۰	۲۲	۱۵	۷/۸	۱۹/۴	۷۲/۸

جدول ۳- ویژگی‌های کیفی آب آبیاری در تیمارهای مختلف.

تیمار					پارامتر
S <sub>4</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	
۱۳/۴۵	۱۰/۲۳	۰/۵۳	۸/۸۳	۹/۸۲	سولفات (me L <sup>-1</sup> )
۴۸/۱۵	۳۹/۵۶	۳۸/۱۲	۳۴/۷۶	۱۲/۵۱	کلرید (me L <sup>-1</sup> )
۳/۳۶	۳/۷۶	۳/۴۵	۳/۲۳	۳/۵۴	بی کربنات محلول در آب (me L <sup>-1</sup> )
۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۹	پتاسیم (me L <sup>-1</sup> )
۲۷/۷۸	۲۴/۵۳	۲۱/۷۸	۲۰/۲۳	۱۲/۹۸	سدیم (me L <sup>-1</sup> )
۱۲/۳۲	۱۰/۴۳	۹/۶۷	۷/۴۵	۳/۸۹	منیزیم (me L <sup>-1</sup> )
۲۵/۱۹	۲۰/۱۹	۱۷/۸۹	۱۶/۰۱	۸/۵۶	کلسیم (me L <sup>-1</sup> )
۷/۴۳	۶/۴۵	۶/۳۲	۵/۹۶	۵/۴۵	نسبت جذب سدیم
۷/۵۰	۷/۴۵	۷/۳۰	۷/۴۰	۷/۴۵	pH
۶/۵۰	۵/۵۰	۴/۵۰	۳/۵۰	۲/۰۰	هدایت الکتریکی آب (dS m <sup>-1</sup> )

جدول ۴- تاریخ نمونه برداری.

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
تاریخ	۲۰/۷/۷۹	۲۸/۷/۷۹	۱۸/۷/۷۹	۲۰/۷/۷۹	۲۳/۷/۷۹	۳۱/۷/۷۹	۱۳/۳/۷۹	۸/۳/۷۹

جدول ۵- مقادیر پارامترهای اولیه و نهایی مربوط به خاک مورد مطالعه در مرحله واسنجی مدل SALTMED.

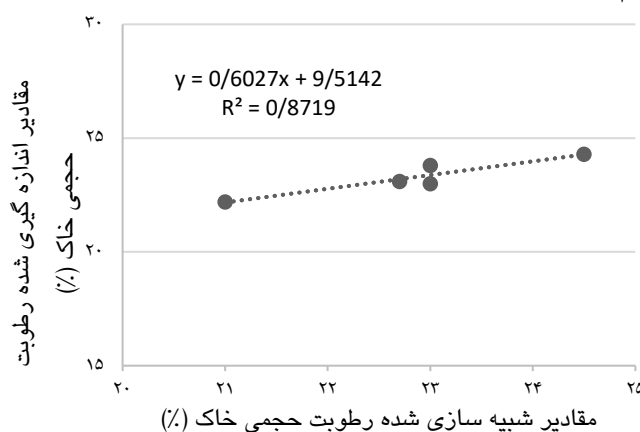
پارامتر	فشار هیگرسکوپیک (cm)	هدایت هیدرولیکی اشباع (mm day <sup>-1</sup> )	محتوای نسبی آب (%)	λ
مقدار اولیه	۱۶/۷	۵۵۷	۰/۰۱	۰/۵۳
مقدار نهایی	۱۰۰	۱۴۱	۰/۰۵	۰/۱۶

## نتایج و بحث

### رطوبت

نتایج یازار و انیسکایا (۲۰۱۲) مطابقت داشت. ضریب تعیین داده‌ها ۰/۹۰ به دست آمد که با توجه به شرایط آزمایش در مقیاس مزرعه‌ای تطابق مطلوبی بین رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد (جدول ۶).

پیش از واسنجی و صحت‌سنجی تحلیل حساسیت مدل صورت گرفت. نتایج نشان داد مدل بیشترین حساسیت را به شوری و میزان آب آبیاری دارد. در مرحله واسنجی مدل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل بسیار به هم نزدیک بوده که با



شکل ۱- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک توسط مدل SALT MED برای تیمارهای آزمایش.

جدول ۶- مقادیر شاخص های آماری به دست آمده در مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل SALT MED.

شاخص	NRMSE	R <sup>2</sup>	ME	CRM
مرحله واسنجی	۶/۳۴	۰/۹۰	۴/۳۲	۰
مرحله صحت سنجی	۴/۴۶	۰/۹۲	۳/۱۶	۰

منجر به اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌شود. در تیمار S<sub>4</sub> مطابق شاخص ضریب باقی‌مانده، در دو لایه ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ سانتی‌متر مدل رطوبت را تقریباً برابر با رطوبت اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نموده است. بهترین کارایی مدل در عمق ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. با توجه به شکل ۱ که مقایسه رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده برای تمام تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد، مقدار ضریب تعیین ۰/۸۷ می‌باشد که در مقایسه با نتایج خالوندی و همکاران (۲۰۱۸) در خاک لوم شنی، بهتر بود. لازم به ذکر است که در این نمودار مقادیر متوسط در کل عمق خاک (۱۰۰-۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت لایه‌های خاک افزایش یافت که با نتایج قره داغی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت داشت. دلیل احتمالی این روند، افزایش خطای تجمعی معادلات در این مدل است.

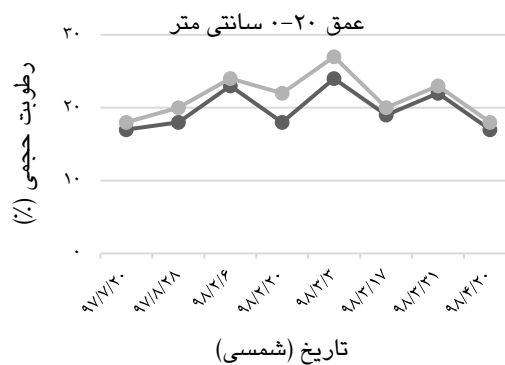
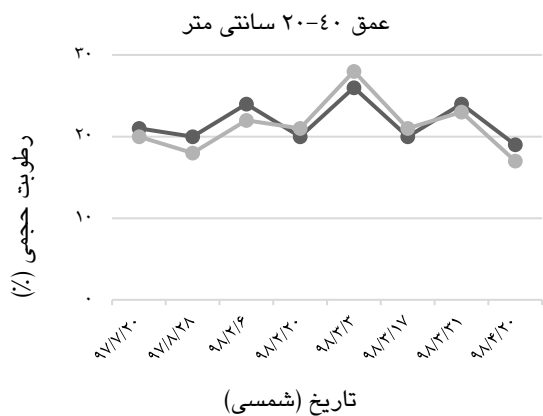
### شوری

نتایج آنالیز نمونه‌های شوری نشان داد که شوری خاک در اثر آبیاری با آب شور نسبت به آب رودخانه افزایش پیدا کرده است. همچنین شوری خاک با افزایش عمق خاک، افزایش پیدا کرده است ( $P < 0/05$ ). این افزایش به علت شسته شدن املاح خاک از عمق‌های بالاتر و انتقال آن به عمق‌های پایین‌تر می‌باشد. اثر تیمارهای لو ۴۰-۲۰ سانتی‌متری یکسان نبوده و هر دو افزایش معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) بر شوری خاک دارند ولی این اثر در عمق ۱۰۰-۴۰ ( $P < 0/05$ ) معنی‌دار نبود. بنابراین با

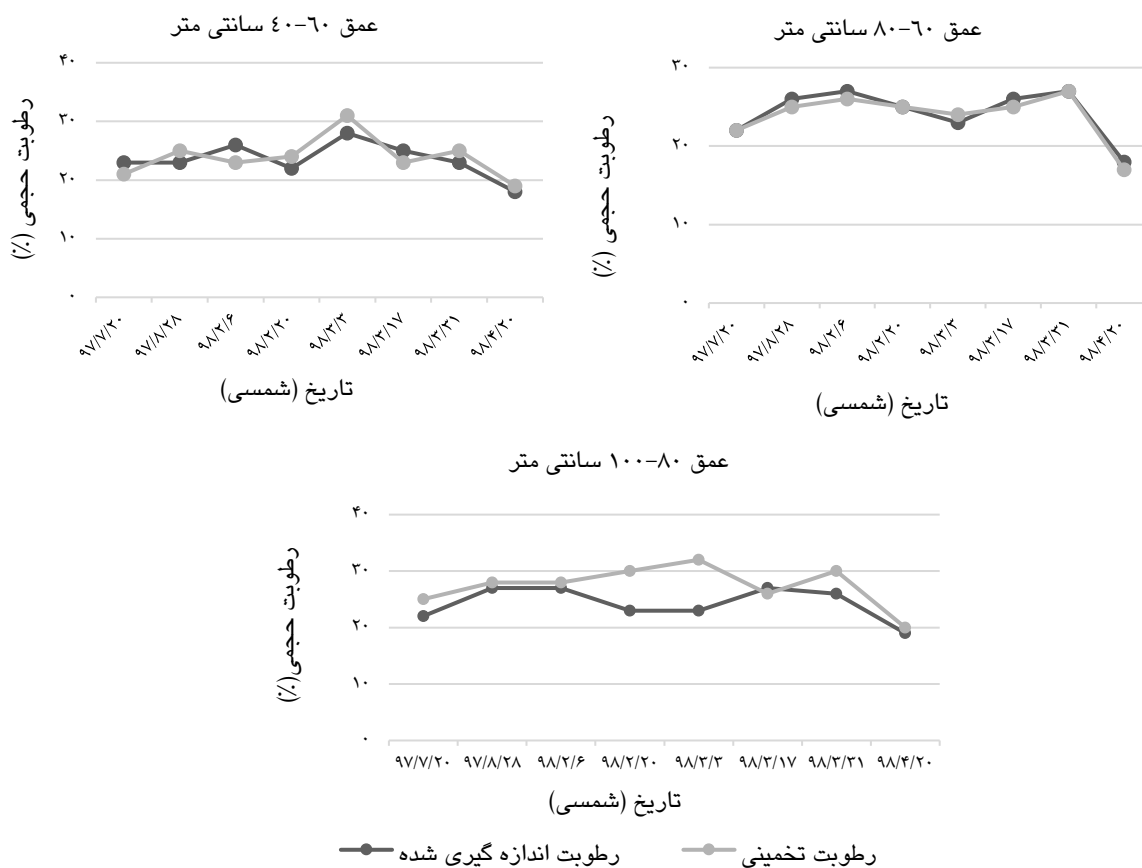
با توجه به جدول ۷ ضریب تعیین برای اعماق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر خاک برای تیمار S<sub>1</sub> به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۸۹، ۰/۹۰، ۰/۹۳ و ۰/۸۵ تعیین گردید. مقدار آماره NRMSE برای اعماق فوق این تیمار به ترتیب ۸/۶۰، ۸/۵۰، ۳/۳، ۲/۱۸ و ۱۱/۸۷ تعیین گردید که برای تمامی لایه‌های خاک مقادیر قابل قبولی است. در این زمینه حسینی و همکاران (۲۰۱۳)، خالوندی و همکاران (۲۰۱۸) و قره‌داغی و همکاران (۲۰۱۷) به نتایج مشابهی دست پیدا کرده بودند. مقدار شاخص ضریب باقیمانده برای اعماق فوق به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۰۴، ۰/۰۲، ۰/۰۵ و ۰/۱۱- محاسبه گردید. مدل رطوبت خاک را در ۲۰-۰ و ۱۰۰-۸۰ بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده و در اعماق ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نموده است. مدل رطوبت اعماق خاک را در تیمار S<sub>1</sub> با دقت خوبی پیش‌بینی نمود و بهترین عملکرد آن در عمق ۸۰-۶۰ و سپس ۴۰-۶۰ سانتی‌متر است. با توجه به متشابه بودن نمودارها و جداول سایر تیمارها با تیمار S<sub>1</sub>، از آوردن آنها خودداری شده و نتایج آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. برای تیمار S<sub>2</sub> مدل در عمق‌های ۲۰-۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر رطوبت را بیش‌برآورد و در عمق ۸۰-۶۰ سانتی‌متر کم‌برآورد، انجام داده است. مدل رطوبت خاک را در تیمار S<sub>3</sub> به خوبی شبیه‌سازی نموده و بهترین عملکرد در عمق ۸۰-۶۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. در تیمار S<sub>3</sub> بهترین عملکرد مدل در عمق ۸۰-۶۰ و سپس در ۴۰-۶۰ سانتی‌متر به دست آمد. علت آن تاثیر تبخیر و عوامل محیطی بر میزان رطوبت خاک در لایه سطحی است که در نهایت

خودداری شده است. نتایج در سایر تیمارهای S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> یکسان بود. برای نشان دادن عملکرد مدل در زمینه ارزیابی شوری خاک نمودار شکل ۴ آورده شد که در آن از میانگین مقادیر شوری خاک در کل عمق خاک (۰-۱۰۰ سانتی‌متر) استفاده گردید و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده رسم شد. با توجه به مقدار R<sup>2</sup> به دست آمده، نشان از توانای مدل در شبیه‌سازی شوری پروفیل خاک می‌باشد. مدل SALTMED شوری خاک را در بیشتر موارد کم برآورد نموده است همچنین نتایج عمق‌های ۸۰-۴۰ سانتی متر بهتر از عمق ۰-۲۰ بوده است. به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت مدل SALTMED ابزاری مفید برای مدیریت و پیش‌بینی اثرات تنش شوری است و این مدل به خوبی توانست جریان آب در خاک در اثر آبیاری، انتقال نمک در خاک در شرایط تنش شوری، در فصل رشد را شبیه‌سازی کند.

افزایش عمق خاک تاثیر شوری آب در افزایش شوری خاک کاهش یافته است. شوری خاک در اثر آبیاری با آب شور و آب رودخانه پس از یک فصل زراعی نسبت به وضعیت اولیه‌شان کاهش معنی‌داری (P < ۰/۰۵) داشته است. این کاهش در اثر آبیاری با آب رودخانه به دلیل شوری کمتر، بیشتر بود (شکل ۳). با توجه به نتایج شبیه‌سازی مدل SALTMED برای شوری خاک در مورد تیمار S<sub>1</sub> مقادیر R<sup>2</sup> برای عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر ۰/۸۲ و برای عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متر ۰/۸۹ به دست آمد. با توجه به جدول ۸ و شکل ۴ مدل در عمق ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متر برآورد بیشتر و در عمق ۰-۸۰ سانتی‌متر برآورد کمتری داشته است. همچنین با توجه به مقادیر NRMSE در جدول ۸ بهترین عملکرد مدل در جهت تخمین شوری در عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متر بوده است. برای سایر تیمارها نمودارهای تخمین شوری و جدول تعیین شد که به علت متشابه بودن نتایج از آوردن آنها



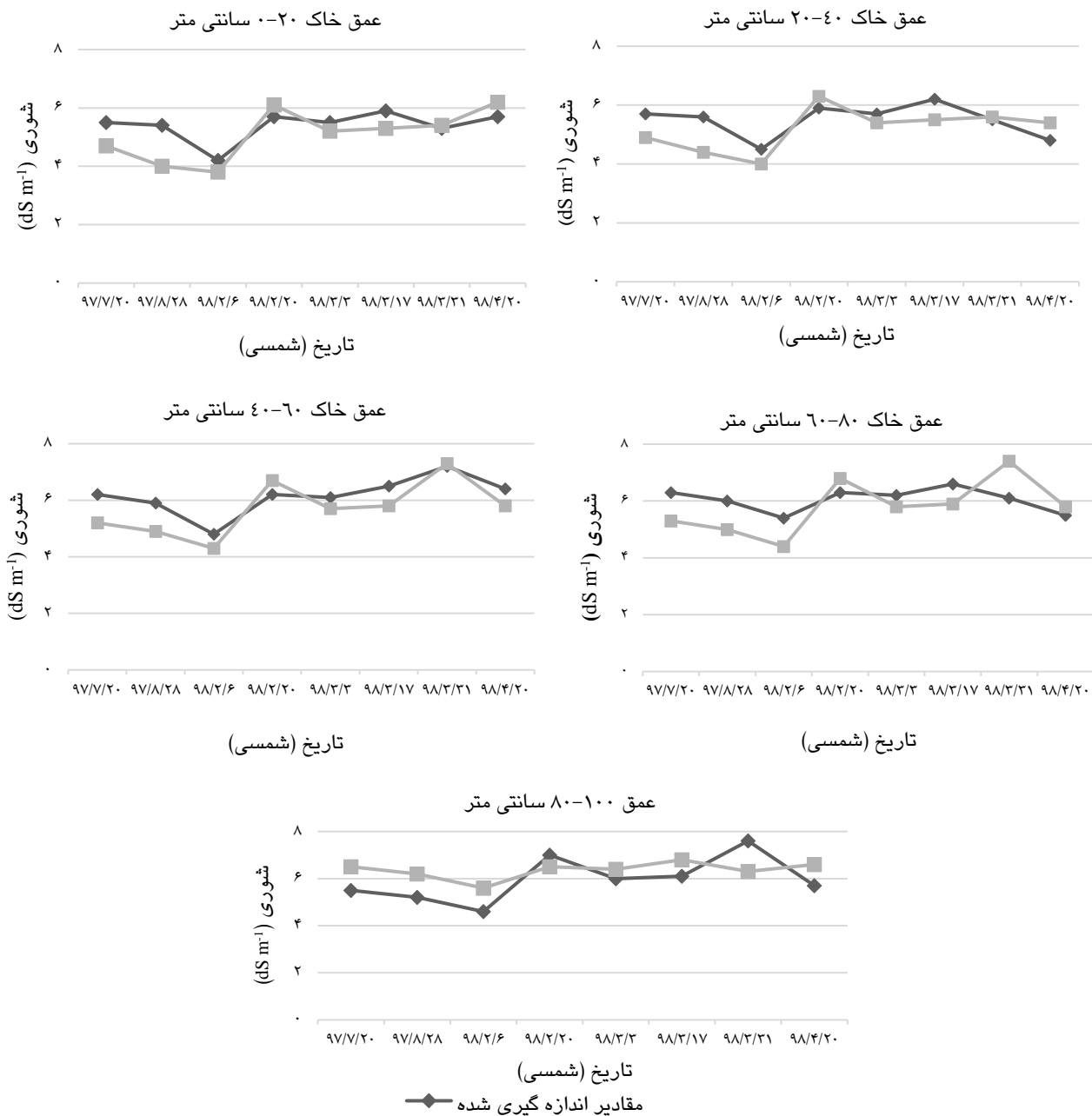




شکل ۲- مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمار S<sub>1</sub>.

جدول ۷- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک برای تیمار S<sub>1</sub>.

عمق (cm)	R <sup>2</sup>	NRMSE	CRM	ME
۲۰-۰	۰/۸۱	۸/۶۰	-۰/۰۶	۳/۱۴
۴۰-۲۰	۰/۸۹	۸/۵۰	۰/۰۴	۲/۵۶
۶۰-۴۰	۰/۹۰	۳/۳۰	-۰/۰۲	۱/۸۷
۸۰-۶۰	۰/۹۳	۲/۱۸	۰/۰۵	۲/۵۴
۱۰۰-۸۰	۰/۸۵	۱۱/۸۷	-۰/۱۱	۶/۳۴



شکل ۳- مقایسه شوری خاک اندازه‌گیری شده با شوری خاک پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمار S<sub>1</sub>.

جدول ۸- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شوری خاک برای تیمار S<sub>1</sub>.

عمق (cm)	R <sup>2</sup>	NRMSE	CRM	ME
۰-۲۰	۰/۸۲	۷/۶۰	۰/۰۷	۳/۲۴
۲۰-۴۰	۰/۸۶	۸/۵۰	۰/۰۴	۳/۵۶
۴۰-۶۰	۰/۸۹	۲/۳۰	۰/۰۱	۱/۳۴
۶۰-۸۰	۰/۹۰	۳/۱۸	۰/۰۶	۲/۷۴
۸۰-۱۰۰	۰/۸۴	۱۲/۱۷	-۰/۱۰	۵/۶۵

جدول ۹- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی.

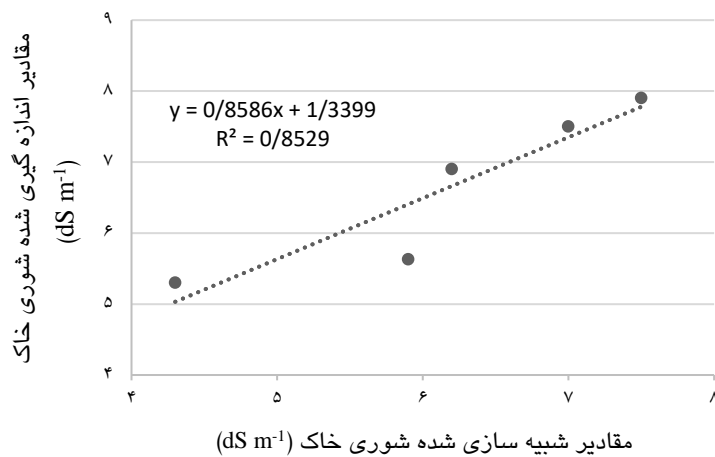
تیمار	شاخص			
	ME	CRM	NRMSE	R <sup>2</sup>
S <sub>1</sub>	۰/۱۹	-۰/۱۵	۳/۷۸	۰/۹۳
S <sub>2</sub>	۱/۶۹	۰/۰۹	۴/۲۱	۰/۹۰
S <sub>3</sub>	۱/۵۵	۰/۰۶	۳/۳۵	۰/۸۶
S <sub>4</sub>	۰/۷۸	۰/۱۲	۳/۶۵	۰/۸۱

### عملکرد محصول

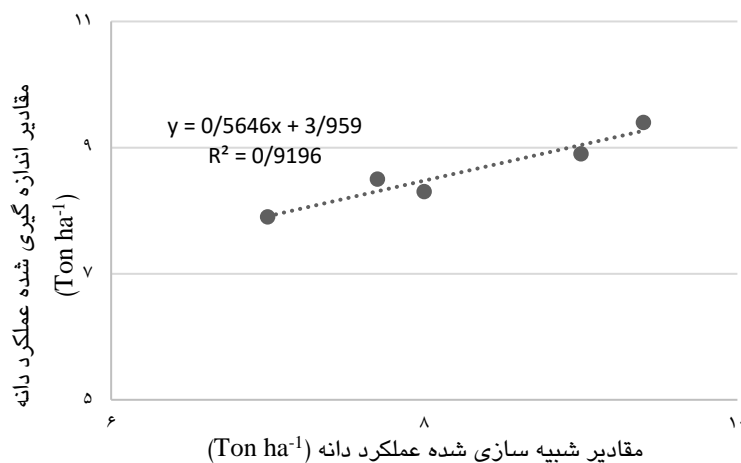
همچنان که از جدول ۱۰ و شکل ۶ به دست می‌آید عملکرد محصول با افزایش تنش شوری کاهش می‌یابد. ضریب باقی‌مانده نشان می‌دهد مدل عملکرد دانه را کمتر از عملکرد اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نموده است و میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه است. شاخص حداکثر خطا نشان می‌دهد که میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه برآورد بهتری از عملکرد دانه است. بر این اساس تیمار شاهد دارای بیشترین عملکرد و تیمار S<sub>4</sub> دارای کمترین عملکرد محصول بودند. مقدار ضریب تعیین در عملکرد دانه ۰/۹۲ به دست آمد (شکل ۵) که نشان می‌دهد مدل عملکرد دانه را با دقت بالا شبیه‌سازی نموده است. مقادیر R<sup>2</sup> در جدول ۹ نشان می‌دهد که مدل SALTMED با افزایش شوری خاک از دقت آن کاسته شده است و مقادیر شبیه‌سازی را کم برآورد نموده است. مقادیر R<sup>2</sup> متفاوتی برای عملکرد محصول با استفاده از SALTMED در شرایط تنش شوری گزارش شده است. مقدار R<sup>2</sup> گزارش شده توسط رامشوران و همکاران (۲۰۱۳) از ۰/۸۱ تا ۰/۹۳ متغییر بود. اکبری فضلی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از این مدل تحت شرایط اعمال زهاب در مراحل پایانی رشد گندم مقدار R<sup>2</sup> برابر ۰/۹۹ را برای عملکرد دانه گزارش کردند. همانگونه که از جدول ۹ مشخص است مدل در تیمار S<sub>1</sub> دارای بهترین مقدار R<sup>2</sup> (۰/۹۳) است.

بهترین مقدار شاخص NRST مربوط به تیمار S<sub>3</sub> و بهترین عملکرد مدل با توجه به شاخص ME مربوط به تیمار S<sub>1</sub> می‌باشد. مدل در تیمارهای S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> برآورد کمتر و در تیمار S<sub>1</sub> برآورد بیشتری داشته است. یکی از علت‌هایی که مدل در تخمین عملکرد محصول بیش‌برآورد داشته احتمالاً قلیایی بودن آب آبیاری است زیرا مدل قادر نیست قلیائیت آب آبیاری را در نظر بگیرد به همین دلیل مقدار اندازه‌گیری شده عملکرد محصول بیشتر از مقادیر شبیه‌سازی شده بود. پولونتو و همکاران (۲۰۱۳) و الی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل SALTMED بیش-برآورد را در عملکرد محصول، گزارش کردند.

شکل ۵ نشان‌دهنده همبستگی مناسبی بین مقادیر تخمینی و مشاهداتی برای مدل SALTMED است. طوری که مقدار ضریب تعیین برای عملکرد محصول برابر با ۰/۹۲ به دست آمد. شکل ۶ گویای این است که مدل SALTMED در شوری‌های پایین‌تر دقت بیشتری در شبیه‌سازی عملکرد محصول دارد. که با نتایج خالوندی و همکاران (۲۰۱۶) مطابق داشت. با توجه به اینکه مدل در شرایط تنش شوری از معادلات و روابط بیشتری برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند، دلیل احتمالی دقت کم شبیه‌سازی در تیمارهای دارای تنش شوری بالا، خطای تجمعی مدل بعد از استفاده از روابط مختلف است.



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده شوری خاک (dS m<sup>-1</sup>) توسط مدل SALTMED برای تیمارهای آزمایش.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول توسط مدل SALTMED برای تیمارهای مطالعه شده.



شکل ۶- میزان عملکرد محصول در تیمارهای مختلف آزمایشی.

رطوبت خاک افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای شاخص‌های ارزیابی، مدل رطوبت خاک را با دقت بالایی پیش‌بینی کرده است. ضریب تعیین برای برآورد رطوبت ۰/۸۹، شوری ۰/۸۵ و عملکرد دانه ۰/۸۷ به‌دست آمد که نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی این پارامترها در منطقه دشت بوکان دارد.

#### سپاسگزاری

این پژوهش با پشتیبانی و حمایت دانشگاه زابل و آزمایشگاه آب و خاک روژهلات به انجام رسیده است که بدین وسیله تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

#### نتیجه‌گیری کلی

این تحقیق با هدف شبیه‌سازی رطوبت خاک، شوری خاک و عملکرد محصول در شرایط استفاده از آب آبیاری شور از مدل SALT MED استفاده شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، رطوبت برای تیمارهای  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  پیش‌بینی و با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مقایسه گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی

#### منابع مورد استفاده

- Akbari Fazli R, Gholami A, Andarzian B, Ghoosheh M and Darvishpasand Z, 2013. Investigating the effect of applying drained water on wheat yield using SALT MED model. *Journal of Novel Applied Sciences* 2:1003-1011.
- Allen RG Pereira L S, Raes D and Smith M, 1998. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, Roma, FAO.
- Aly AA, Al-Omran AM and Khasha A, 2015. Greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALT MED model. *Soil and Water Conservation Journal* 70:1-11.
- Gharadaghi M, Tabatabai SM and Hasanli M, 2017. Soil salinity simulation and yield of maize under saline water application using SWAP and SALT MED models. *Journal of Water Research in Agriculture* 30 (1): 51-64. (In Persian with English abstract)
- Hani M, El-Noemani AS and Pepars SK, 2014. Validation of SALT MED model under different conditions of drought and N fertilizer for Snap Bean. *ATLNERs Conference Paper Series WAT: 2014, Summer Athens*.
- Hasanli M, Afrasyab P and Ebrahimiyan H, 2016. Evaluation of AquaCrop model and SALT MED model in estimating the yield of maize and soil salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46 (3): 487-498. (In Persian with English abstract)
- Hirich A, Choukr Allah R, Ragab R, Jacobsen E, El Youssfi L and El-Omari H, 2011. The SALT MED model calibration and validation using field data from morocco. *Materials Environmental Science Journal* 3:342-359.
- Hosaini E and Maralian H, 2013. Evaluation of SALT MED model in the estimation of wheat crop content in Moghan region, National Agricultural Congress 2-17 Feb. University of Mohaghegh Ardebil. (In Persian with English abstract)
- Kaya CI, Yazar A and Metin Sezen S, 2015. SALT MED 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 Journal* 4:108-118.
- Khalvandi N, Soltani A and Bromandnasab S, 2018. Soil moisture simulation and yield of maize in irrigation conditions with saline water with SALT MED model. *Journal of Irrigation Science and Engineering* 40 (1): 231-246. (In Persian with English abstract)
- Mohamadi E, Hasanli M, Gharadaghi M and Mohamadi M, 2015. Soil moisture and salinity assessment using SALT MED model in Sistan climatic conditions. 2nd Iranian Conference on Agricultural Soil and Water Management, 20-21 May, Karaj, Iran. (In Persian with English abstract)
- Pulvento C, Riccard M, Lavini A, Dandria R and Ragab R, 2013. SALT MED model to simulate yield and dry mater for Quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in South Italy. *Irrigation and Drainage Journal* 62:229-238.

- Ragab R, Malash N, Abdel Gawad G, Arslan A and Ghaibeh A, 2005. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management Journal* 78:89-107.
- Rameshwaran P, Tepe A, Yazar A and Ragab R, 2013. SALTMED 2013 model application using greenhouse experiment data from Turkey. Pp 144-149, International Conference on: Sustainable Water Use for Securing Food Production in the Mediterranean Region under Changing Climate, March, Agadir, Morocco.
- Silva LL, Ragab R, Duarte I and Lourenco E, 2012. Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. *Centre for Ecology and Hydrology Topics and Objectives. Irrigation Science* 31:651-659
- Yazar A and Incekaya C, 2012. SALTMED model testing for Quinoa in Turkey. SALTMED model to simulate yield and dry mater for Quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in south Italy. Swup-med project Sustainable Water Use Securing Food Production in Dry Areas of the Mediterranean Region. *Irrigation and Drainage* 62: 229-238.