

## پیش‌بینی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک با استفاده از مدل AquaCrop در تیمارهای مختلف کم-آبیاری و شوری

مسعود محمدی<sup>۱</sup>، کامران داوری<sup>۲\*</sup>، بیژن قهرمان<sup>۳</sup>، حسین انصاری<sup>۴</sup>، علی شهیدی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۱/۲۹

<sup>۱</sup> دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> استاد، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۵</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kamdavi@um.ac.ir

### چکیده

مدل‌های گیاهی و ریاضی برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک ابزار مناسبی برای بهبود مدیریت آبیاری، افزایش محصول و راندمان آبیاری می‌باشند. به همین منظور در این مطالعه نتایج شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک توسط مدل AquaCrop با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت و شوری در مزرعه مقایسه شد. این آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده به صورت فاکتوریل بود که در آن سه عامل شوری آب آبیاری ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ) به ترتیب معادل ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) در سه سطح به عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم (قدس و روشن) و مقدار آب آبیاری در ۴ سطح ( $I_1$  و  $I_2$ ،  $I_3$ ،  $I_4$ ) به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) به عنوان کرت‌های فرعی اجرا گردید. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل در برآورد رطوبت و شوری به ترتیب به پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) و رطوبت اشباع خاک ( $\theta_{Sat}$ ) حساسیت متوسطی دارد. به‌طور کلی دقت مدل در برآورد رطوبت بیشتر از دقت آن در برآورد شوری نیم‌رخ خاک بود. به‌طوری‌که مقادیر متوسط ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، بیشینه خطای نرمال شده (NME)، شاخص سازگاری (d)، ضریب باقی‌مانده (CRM) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) در رقم روشن برای پیش‌بینی رطوبت به ترتیب ۱۱/۷۲ درصد، ۵۲/۸۱ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۸۷ و ۰/۵۸ به دست آمد. در رقم قدس مقدار این پارامترها برای پیش‌بینی رطوبت به ترتیب ۱۱/۸ درصد، ۲۶/۸۷ درصد، ۰/۷۹، ۰/۵۵ و ۰/۶۱ و برای پیش‌بینی شوری به ترتیب ۲۴/۶ درصد، ۵۲/۹۷ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۹۳ و ۰/۵۷ به دست آمد. همچنین مدل رطوبت لایه‌های عمقی خاک را با دقت بیشتری نسبت به لایه‌های سطحی و شوری لایه‌های سطحی خاک را با دقت بیشتری نسبت به لایه‌های عمقی برآورد نمود. براساس شاخص‌های آماری ارائه شده، دقت مدل AquaCrop در برآورد رطوبت در اعماق و زمان‌های مختلف بیشتر از شوری بود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، مدیریت آبیاری، مدل‌سازی گیاهی، واسنجی مدل

## Prediction of Soil Profile Moisture and Salinity Using AquaCrop Model Under Different Deficit Irrigation and Salinity Treatments

M Mohammadi<sup>1</sup>, K Davary<sup>2\*</sup>, B Ghahraman<sup>3</sup>, H Ansari<sup>4</sup>, A Shahidi<sup>5</sup>

Received: 5 May 2014 Accepted: 18 April 2015

<sup>1</sup>- Ph.D. Student, Water Eng. Depart., Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>2</sup>- Assoc. Prof., Water Eng. Depart., Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>3</sup>- Prof., Water Eng. Depart., Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>4</sup>- Assoc. Prof., Water Eng. Depart., Faculty of Agric., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>5</sup>- Assoc. Prof., Water Eng. Depart., Faculty of Agric., Univ. of Birjand, Iran

\* Corresponding Author, Email: kamdav@um.ac.ir

### Abstract

Agrohydrological models that simulate soil moisture and salinity profile are useful tools for improving irrigation management and increasing irrigation efficiency and crop yield. In this study soil moisture and salinity profile were simulated by AquaCrop software, and compared with field measured soil moisture and salinity data. This study was carried out as split plot design (factorial form). Treatments consisted of three levels of irrigation water salinity (S1, S2, S3 corresponding to 1.4, 4.5, 9.6 dS/m) as main plot, two wheat varieties (Ghods and Roshan) and four levels of irrigation water amount (I1, I2, I3, I4 corresponding to 125, 100, 75, 50% of crop water requirement) as sub plot. Based on the results, soil moisture and salinity profiles were moderately sensitive to volumetric water content at the field capacity ( $\theta_{FC}$ ), and soil water content at the saturation ( $\theta_{Sat}$ ) levels, respectively. Overall, the model accuracy in estimation of the moisture was higher than that in estimation of soil salinity at the soil profile. For Roshan cultivar, the average values of NRMSE, NME, d, CRM and  $R^2$  for the simulated soil water contents were 11.72%, 26.81%, 0.79, 0.045, and 0.62, while for the simulated soil salinity they were 24.2%, 52.81%, 0.72, 0.187, and 0.58, respectively. For Ghods cultivar, the average values of these parameters for simulated soil water contents were 11.8%, 26.87%, 0.79, 0.055, and 0.61, while for the simulated soil salinity they were 24.6%, 52.97%, 0.72, 0.193, and 0.57, respectively. The model estimated soil moisture at the deeper soil layers and salinity at the surface soil layers more accurate than those in the surface and deeper soil layers, respectively. According to the statistical indices, the AquaCrop model's accuracy in estimation of the soil moisture at different depths and times was higher than that in estimation of salinity.

**Keywords:** Irrigation management, Model calibration, Plant modeling, Sensitivity analysis

### مقدمه

نمی‌باشد. در مناطق فاریاب، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده بهینه از آب ضروری به نظر می‌رسد. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفاده بهینه از آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاربرد مدل‌های ریاضی و گیاهی امکان‌پذیر می‌باشد. در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به-

کمبود آب به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک امنیت غذایی را برای میلیون‌ها انسان تهدید می‌کند. با توجه به اینکه بیشتر نقاط کشورمان در کمربند خشک و نیمه‌خشک واقع شده است، تولید محصول بدون در نظر گرفتن آبیاری امکان‌پذیر

توانسته است رطوبت ناحیه ریشه را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید؛ به‌طوری که مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)،  $R^2$  و شاخص سازگاری (d) برای شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب ۳/۵ درصد، ۰/۸۶ و ۰/۸۴ و برای شرایط کم‌آبیاری به‌ترتیب ۴ درصد، ۰/۹۵ و ۰/۹۳ به‌دست آمدند. زلک و همکاران (۲۰۱۱) پس از ارزیابی مدل AquaCrop گزارش کردند که مدل مقادیر رطوبت خاک را در عمق ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری در بیشتر مواقع در طول فصل رشد بیش برآورد می‌کند. اما روند تغییرات رطوبت خاک را در این اعماق به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید. نتایج حسین و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که مدل AquaCrop در روزهای آبیاری و بین دو آبیاری با دقت مناسبی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی می‌نماید. اما به‌طور کلی مدل مقادیر رطوبت را بیش برآورد می‌کند. خابلا و بولاک (۲۰۱۲) پس از شبیه‌سازی رطوبت تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک با استفاده از مدل AquaCrop در کانادا گزارش کردند که مقادیر  $R^2$ ، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، d و بیشینه خطای مطلق (MAE) به‌ترتیب ۰/۹، ۴۹ mm، ۰/۹۹ و ۴۰ mm بدست آمدند. همچنین عنوان کردند مدل AquaCrop ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد و ویژگی آن نیاز به پارامترهای ورودی کم و قابل دسترس می‌باشد. می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) مدل AquaCrop را در منطقه پنسیلوانیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل توانسته است با دقت بالایی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی کند. به‌طوری که مقادیر NRMSE برای برآورد رطوبت ۶ عمق خاک از ۱/۵ تا ۹/۸ درصد نوسان داشت. اقبال و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام دادند. مقدار RMSE برای عملکرد دانه ۰/۵۸ تن در هکتار، تبخیر-تعرق واقعی ۳۳/۲ میلی‌متر و رطوبت حجمی خاک بین ۲۴/۵ تا ۳۷/۶ میلی‌متر بود. نتایج کلی نشان داد AquaCrop، مدل معتبری است و می‌توان از آن برای بهینه‌سازی تولید عملکرد دانه گندم زمستانه و نیاز آبی در دشت شمالی چین استفاده کرد. با توجه به بررسی

عنوان ابزاری نوین برای برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری، روز به روز در حال توسعه است (جلینی و همکاران ۱۳۸۴). یکی از این مدل‌ها، مدل AquaCrop است که مدلی قدرتمند و ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد. سادگی، نیاز به کم‌ترین داده ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد. این مدل پس از بازسازی و ارزیابی مجدد نشریه فائو ۳۳ برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی توسعه یافت (رائس و همکاران ۲۰۱۲). مدل AquaCrop یک توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. استخوان‌بندی فکری و اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده در نرم افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شده است. AquaCrop یک مدل فراگیر است، به این معنی که می‌تواند برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ای، روغنی و غده‌ای به‌کار رود. مدل AquaCrop با فراهم کردن پارامترهای ثابت، امکان استفاده برای کاربران مبتدی (آبیاران) را فراهم می‌کند. در این مدل به‌منظور محاسبه تعرق و تفکیک تبخیر از سطح خاک با تعرق، به‌جای استفاده از شاخص سطح برگ از پوشش تاجی (Cover Canopy) که سطح زمین را می‌پوشاند، استفاده می‌شود. مدل AquaCrop اخیراً نسبت به تأثیر شوری آب آبیاری بر عملکرد و توزیع شوری در نیم‌رخ خاک اصلاح شده است (رائس و همکاران ۲۰۱۲). در مورد شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک، فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) در ارزیابی مدل AquaCrop در شرایط کم-آبیاری و آبیاری کامل گزارش کردند که مدل با دقت نسبتاً بالایی روند تغییرات رطوبت در نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی می‌کند. آنها همچنین اعلام کردند در تیمارهای کم‌آبیاری مدل مقادیر رطوبت نیم‌رخ خاک را بیش برآورد کرده و دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت در اعماق مختلف خاک متفاوت است. نتایج اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) در ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک نشان داد که مدل

ترتیب معادل ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) به- عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم (قدس و روشن) و چهار سطح آبیاری ( $I_1, I_2, I_3$  و  $I_4$ ) به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد تخلیه آب خاک) به عنوان کرت- های فرعی در سه تکرار اجرا گردید. روش کاشت به صورت دستی و در تاریخ ۲۳ آبان‌ماه ۱۳۸۴ و برداشت محصول در تاریخ ۲۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۵ انجام شد. به‌منظور حصول یکنواختی در اعمال تنش شوری از روش آبیاری کرتی استفاده شد. ابعاد کرت‌ها ۳×۴ (متر×متر) و فاصله کرت‌های فرعی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های اصلی ۴/۵ متر در نظر گرفته شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم کاشت ۴۰۰ بوته در متر مربع بود. مقادیر کود مورد نیاز بر اساس تحلیل خاک تعیین و به‌طور یکنواخت در سطح کرت‌ها توزیع گردید. جهت تجهیز سیستم آبیاری به گونه‌ای که بتوان سطوح مختلف شوری آب آبیاری را در کرت‌های آزمایشی اعمال کرد، ابتدا سه منبع فلزی هر یک با حجم ۲۸۰۰۰ لیتر بر روی سکویی به ارتفاع ۱/۵ متر نصب گردید و آب با شوری مورد نظر را از نهر بالادست مزرعه به داخل هر یک از مخازن آب پمپ نموده و سپس از طریق خط لوله به ابتدای قطعه زراعی انتقال داده و میزان آب مورد نیاز هر کرت از طریق کنتور حجمی به صورت دقیق اندازه‌گیری و به کرت منتقل شد. در روزهای قبل از آبیاری، درصد رطوبت وزنی خاک با استفاده از نمونه‌برداری تا عمق ریشه (یک متر در نظر گرفته شد) به ازاء هر ۲۰ سانتی‌متر یک نمونه تعیین می‌شد. هنگامی که ۷۰ میلی‌متر تبخیر انجام می‌شد، زمان نمونه‌برداری از خاک مشخص می‌گردید. براساس کمبود رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی و معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی و اعمال ضرایب هر تیمار، از معادله ۱ کمبود رطوبت خاک تعیین می‌گردید:

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

که در آن SMD کمبود (تخلیه) رطوبت خاک ( $mm$ )،  $W_i$ ،  $W_{fc}$  به ترتیب رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و موجود در خاک ( $g \cdot g^{-1}$ )،  $A_s$  جرم مخصوص ظاهری خاک ( $g \cdot cm^{-3}$ )،  $D$  عمق توسعه ریشه ( $mm$ ) و  $C$  ضریب

منابع تاکنون از مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک در شرایط همزمان تنش‌های کم- آبی و شوری مطالعه‌ای انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم- رخ خاک در تیمارهای مختلف کم‌آبی و شوری، نسخه ۴ مدل AquaCrop که در سال ۲۰۱۲ و برای کمی نمودن تأثیر تنش شوری (علاوه بر سایر تنش‌های محیطی که در نسخه‌های قبلی در نظر گرفته شده بود) ارائه گردید (رائس و همکاران ۲۰۱۲)، مورد ارزیابی قرار گرفت و با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

### کلیات طرح

این مطالعه در سال زراعی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند که در فاصله ۵ کیلومتری غرب شهر بیرجند در مسیر جاده بیرجند- طبس، مجاور روستای امیرآباد با عرض جغرافیایی ۵۳ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۱۳ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا انجام شد. شهر بیرجند در مرکز استان خراسان جنوبی واقع شده، اقلیم آن خشک، زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم دارد. برای یک دوره آماری ۳۰ ساله، میانگین بارندگی سالیانه ۱۷۱ میلی‌متر (مقدار بارندگی برای سال ۱۳۸۵-۱۳۸۴ در طول فصل رشد گندم ۸۱ میلی‌متر بوده است)، میانگین دمای سالیانه آن ۱۶/۶ درجه سلسیوس، بیشینه درجه حرارت مطلق ۳۸/۲ درجه سلسیوس، کمینه درجه حرارت مطلق ۵/۱- درجه سلسیوس و متوسط روزهای یخبندان سال به ۶۷ روز می‌رسد. متوسط سرعت باد سالیانه ۹/۷ کیلومتر بر ساعت برآورد شده است. با توجه به وجود ۳ حلقه چاه در این مزرعه با شوری‌های متفاوت، امکان تأمین آب با شوری‌های مختلف به صورت طبیعی وجود داشت. در نیمه دوم آبان‌ماه ۱۳۸۴ آماده سازی زمین (شخم، دیسک و لولر) انجام شد. طرح آزمایشی مورد نظر، به صورت کرت‌های خرد شده که در آن سطوح مختلف شوری ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ) به-

از آماده سازی زمین نمونه‌های مرکبی از ۴ نقطه محدود کشت و از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد که نتایج آن در جدول ۱ و زمان‌بندی و مقادیر آب آبیاری در جدول ۲ ارائه شده است.

هر تیمار آبیاری می‌باشند. به عبارتی ابتدا مقدار آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل تعیین می‌شد، سپس با ضرب این مقدار آب آبیاری و ضریب تیمارهای دیگر ( $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_4$  به ترتیب معادل ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۲۵) مقدار آب آبیاری برای این تیمارها محاسبه می‌گردید. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه قبل

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه.

پارامتر	عمق خاک (cm)			پارامتر	عمق خاک (cm)		
	۰-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۹۰		۰-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۹۰
پتاسیم قابل جذب	۲۶۱	۲۷۸	۱۹۵	بافت خاک	۱۰/۳	۱۱/۵	۱۱/۳
فسفر قابل جذب	۹/۲	۱۱/۵	۱۰/۳	جرم مخصوص ظاهری	-	۰/۴۲	۰/۴۲
کربن آلی (درصد)	۰/۵۲	۰/۴۲	-	$\theta_{FC}$ (درصد حجمی)	۷/۷۸	۷/۷۲	۷/۶۱
pH	۷/۶۱	۷/۷۲	۷/۷۸	$\theta_{PWP}$ (درصد حجمی)	۲/۹	۲/۷	۲/۱
EC ( $dS m^{-1}$ )	۲/۱	۲/۷	۲/۹	$\theta_{Sat}$ (درصد حجمی)	۲۲/۵	۲۲/۱	۲۱/۲
رطوبت اولیه	۲۱/۲	۲۲/۱	۲۲/۵	$K_s$ ( $mm day^{-1}$ )	۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰
	۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰		لوم رسی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی
	۱/۳۹	۱/۴۵	۱/۵		۳۱	۳۳/۴	۳۳/۶
	۱۹/۵	۱۹/۷	۱۹/۲		۴۵/۹۲	۴۴/۸۲	۴۱/۸۴
	۹۵/۲	۶۵/۳	۵۸/۴				

جدول ۲- زمان و مقدار آب مصرف شده در تیمارهای مختلف آبیاری.

روز بعد از کاشت	تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	$I_1^*$ (mm)	$I_2$ (mm)	$I_3$ (mm)	$I_4$ (mm)
۲	۸۴/۸/۲۵	۱	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۰۳	۸۴/۱۲/۵	۲	۳۵	۵۳	۷۰	۸۷
۱۱۷	۸۴/۱۲/۱۹	۳	۳۸	۵۷	۷۶	۹۵
۱۳۱	۸۵/۱/۴	۴	۴۵	۶۸	۹۱	۱۱۴
۱۵۴	۸۵/۱/۲۷	۵	۴۹	۷۳	۹۷	۱۲۱
۱۶۵	۸۵/۲/۷	۶	۴۵	۶۷	۹۰	۱۱۳
۱۷۵	۸۵/۲/۱۷	۷	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
	جمع (mm)		۲۸۲	۴۰۸	۵۳۴	۶۶۰

\*سطوح مختلف آبیاری می‌باشند.  $I_1$ ،  $I_2$ ،  $I_3$  و  $I_4$  به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد مقدار تخلیه آب خاک (SMD) هستند.

### اساس نظری مدل AquaCrop

پارامترها عبارتند از: بیشینه عمق ریشه، تراکم کشت، زمان کاشت، مقدار، کیفیت و زمان آبیاری می‌باشند (هنگ و همکاران ۲۰۰۹). در نسخه جدید مدل AquaCrop (نسخه ۴) همچنین می‌توان در بخش برنامه‌ریزی آبیاری، شوری‌های مختلف آب آبیاری را وارد کرد. در مدل برای نیم‌رخ خاک در منطقه ریشه، بیلان روزانه آب شامل آب‌های ورودی و خروجی (نفوذ، رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر-تعرق) و تغییرات رطوبت خاک را از معادله ۲ محاسبه می‌شود (رائس و همکاران ۲۰۰۹). توازن آبی خاک و جریان‌های ورودی و خروجی از مرزهای منطقه ریشه و آب نخیره شده در خاک در

در این تحقیق از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی شوری و رطوبت نیم‌رخ خاک استفاده شد. مدل AquaCrop شامل چهار زیر مدل: ۱- خاک (بیان آب)، ۲- گیاه (توسعه، رشد و عملکرد)، ۳- اقلیم (دما، باران، تبخیر-تعرق و غلظت دی اکسید کربن) و ۴- مدیریت (تاریخ کاشت، مدیریت کود دهی و آبیاری) می‌باشد. به داده‌های ورودی مربوط به پارامترهای اقلیمی و خاک که تابع مکان و زمان هستند و همچنین پارامترهای مربوط به تراکم کشت و مدیریت آبیاری به اصطلاح پارامترهای مخصوص کاربر گفته می‌شوند. این

نیروی محرکه این تويع مجدد عمودی گراديان غلظت نمک بين عمق‌های مختلف نیمرخ خاک می‌باشد. همچنین مدل با استفاده از پدیده پخشیدگی حرکت عمودی و رو به بالای نمک را در نتیجه صعود کاپیلاری از یک سطح ایستابی شور و حرکت آب در پاسخ به تبخیر از خاک تشریح می‌نماید. حرکت عمودی روبه بالای نمک بستگی به رطوبت لایه بالایی خاک، شوری و عمق سطح ایستابی دارد. مدل AquaCrop برای محاسبه شوری خاک در اثر این پدیده‌ها (انتقال توده‌ای و پخشیدگی)، نیمرخ خاک را به ۱۲ لایه و هر لایه را به ۲ تا ۱۱ سلول تقسیم‌بندی می‌کند. تعداد سلول‌ها بستگی به نوع خاک لایه‌های افقی دارد. از آنجایی که نمک‌ها شدیداً به ذرات رس می‌چسبند لایه‌ی افقی رسی سلول‌های بیشتری نسبت به لایه‌ی افقی شنی دارد. مدل با استفاده از روابط ۳ تا ۵ شوری اشباع خاک را در هر لایه محاسبه می‌کند (رائس و همکاران ۲۰۱۲):

$$W_{\text{cell}} = 1000 \frac{\theta_{\text{sat}}}{n} \Delta z \quad [۳]$$

$$\text{Salt}_{\text{cell}} = 0.64 W_{\text{cell}} \text{EC}_{\text{cell}} \quad [۴]$$

$$\text{EC}_e = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Salt}_{\text{cell},j}}{0.64(1000\theta_{\text{sat}} \Delta z)} \quad [۵]$$

که  $W_{\text{cell}}$  حجم سلول (میلی‌متر آب)،  $\theta_{\text{Sat}}$  رطوبت اشباع خاک ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )،  $\Delta z$  ضخامت لایه‌های خاک (m)،  $n$  تعداد سلول‌ها،  $\text{Salt}_{\text{cell}}$  مقدار نمک سلول ( $\text{g m}^{-2}$ )،  $\text{EC}_{\text{cell}}$  هدایت هیدرولیکی هر سلول ( $\text{dS m}^{-1}$ ) و  $\text{EC}_e$  هدایت هیدرولیکی اشباع عمق مشخصی از خاک ( $\text{dS m}^{-1}$ ) می‌باشند. شرایط مرزی بالادست در تخمین شوری خاک توسط غلظت املاح باران (در مدل برابر صفر در نظر گرفته می‌شود) و غلظت املاح آب آبیاری مشخص می‌شود و برای شرایط مرزی پایین دست در صورت وجود سطح ایستابی، غلظت املاح آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. شوری عصاره اشباع خاک قبل از کشت به عنوان شرایط اولیه در لایه‌های ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۹۰ سانتی‌متر، وارد مدل شدند (جدول ۱).

فواصل زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌شود. AquaCrop برای تخمین تبخیر از خاک، اثرات مالچ، پوشش گیاهی، نسبت خیس‌شدگی سطح خاک در آبیاری‌های موضعی و سایه‌اندازی پوشش گیاهی را در نظر می‌گیرد.

$$\Delta\theta \times Z = P + I + U - R - D - E \quad [۲]$$

که در آن:  $\Delta\theta$  تغییرات رطوبت خاک (درصد حجمی)،  $Z$  عمق ریشه (میلی‌متر)،  $P$  بارندگی (میلی‌متر)،  $I$  آبیاری (میلی‌متر)،  $U$  خیز مویینه‌ای به ناحیه ریشه (میلی‌متر)،  $R$  رواناب (میلی‌متر)،  $D$  نفوذ عمقی (میلی‌متر) و  $E$  تبخیر-تعرق (میلی‌متر) می‌باشند. شرایط مرزی بالادست مدل در تخمین بیلان آب، توسط آبیاری، بارندگی و تبخیر-تعرق واقعی مشخص می‌شود. برای شرایط مرزی پایین دست نیز وجود سطح ایستابی و شرایط زهکشی آزاد در نظر گرفته شده است که در این مطالعه به‌علت عمق زیاد سطح ایستابی (عمق ۱۱۰ متری)، شرایط زهکشی آزاد حاکم است. مقدار رطوبت نیمرخ خاک قبل از کاشت در لایه‌های ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۹۰ سانتی‌متر، به‌عنوان شرایط اولیه وارد مدل شدند (جدول ۱).

به‌طور کلی مدل AquaCrop برای حرکت و تجمع نمک در نیمرخ خاک از دو پدیده انتقال توده‌ای و پخشیدگی استفاده می‌کند. مدل با استفاده از پدیده انتقال توده‌ای حرکت عمودی و رو به پایین نمک را در نیمرخ خاک توصیف می‌نماید. با فرض این که نمک‌ها بوسیله جریان آب خاک در منافذ درشت انتقال داده می‌شوند. این پدیده تا زمانی که رطوبت خاک بالاتر از رطوبت ظرفیت زراعی باشد، ادامه دارد. اگر رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی یا پایین تر از آن باشد، مدل فرض می‌کند که همه منافذ درشت زهکشی شده‌اند و برای انتقال توده‌ای نمک غیرفعال هستند. مدل با استفاده از پدیده پخشیدگی، انتقال نمک‌ها را از منافذ درشت به منافذ ریز توصیف می‌کند. نیروی محرکه فرآیند پخشیدگی افقی گرادیان غلظت نمک است که بین محلول آب در منافذ درشت و ریز وجود دارد. برای اجتناب از تجمع زیاد نمک در یک عمق خاص نیز یک پخشیدگی عمودی نمک نیز در نظر گرفته می‌شود.

## تحلیل حساسیت مدل

با استفاده از رابطه ۴ تحلیل حساسیت

مدل AquaCrop انجام شد (مک کوئن ۱۹۷۳):

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad [4]$$

که در آن  $S_c$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $\Delta W$  اختلاف مقدار پارامتر خروجی (رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک) قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی (پارامترهای هیدرولیکی خاک)،  $\bar{W}$  متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی،  $\Delta P$  اختلاف مقادیر پارامتر ورودی قبل و بعد از تغییر و  $\bar{P}$  متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل قبل و بعد از تغییر می‌باشد.

با استفاده از جدول ۳ (بابازاده و سرائی تبریزی ۱۳۹۱) تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام شد. برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک ابتدا پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل RETC تخمین زده شدند. به طوری که مشخصات هر لایه خاک مانند درصد ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری به‌عنوان ورودی به مدل مذکور داده شد و درصد رطوبت اشباع خاک ( $\theta_{Sat}$ )، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_{Sat}$ ) به‌عنوان خروجی به دست آمد. با

توجه به این که رطوبت ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) و پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ ) با استفاده از نمونه‌ای مرکب از سه لایه خاک (۹۰-۰ سانتی‌متر) تعیین شده بود (جدول ۱). بنابراین این مقادیر به عنوان  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه میانی در نظر گرفته شد. برای محاسبه مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه‌های اول و سوم ابتدا مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  سه لایه خاک جداگانه با مدل RETC تخمین زده شد. سپس اختلاف مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  (برآورد شده توسط مدل RETC) مقادیر لایه‌های اول و سوم نسبت به لایه دوم محاسبه گردید. با استفاده از این اختلافات و مقدار  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه دوم (اندازه‌گیری شده در مزرعه)، مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه‌های اول و سوم تعیین شدند. برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک،  $\theta_{FC}$ ،  $\theta_{PWP}$ ،  $\theta_{Sat}$  و  $K_{Sat}$  در لایه‌های مختلف به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد. سپس در هر نوبت یکی از پارامترهای ورودی به مقدار  $\pm 25\%$  تغییر داده شد (گیرتس و همکاران ۲۰۰۹) و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. ضریب حساسیت براساس معادله ۴ محاسبه و با استفاده از جدول ۳ طبقه‌بندی گردید.

جدول ۳- طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت (بابازاده و سرائی تبریزی ۱۳۹۱).

دامنه تغییرات	$S_c = 0$	$0 < S_c < 0.3$	$0.3 < S_c < 1/5$	$S_c > 1/5$
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد

## واسنجی و صحت‌سنجی

در طول فصل رشد به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک در چهار زمان (۱۰۲، ۱۱۹، ۱۴۳ و ۱۸۵ روز بعد از کاشت) و پنج عمق (۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متر) از خاک مزرعه نمونه برداری شد و در آزمایشگاه شوری عصاره اشباع و رطوبت وزنی (با استفاده از چگالی ظاهری خاک به رطوبت حجمی تبدیل شدند) تعیین گردیدند. داده‌های رطوبت و شوری به دو دسته تقسیم شدند، دسته اول (اعماق ۱۰، ۵۰ و ۹۰ سانتی‌متر) برای واسنجی و دسته

دوم (اعماق ۳۰ و ۷۰ سانتی‌متری) برای صحت‌سنجی مدل. در مرحله واسنجی مدل در صورت لزوم در بعضی از اعماق خاک، پارامترهای حساس (در بخش تحلیل حساسیت) و پارامترهای تخمین‌زده شده با مدل RETC مقداری تغییر داده شدند تا خطای نسبی مقادیر رطوبت و شوری مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین خطای نسبی عملکرد محصول اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کمینه شوند. در انتها پارامترهای واسنجی شده خاک به منظور صحت‌یابی مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

گیری شده،  $n$  تعداد نمونه‌های به کار رفته،  $\bar{O}_i$  مقدار

متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد.

مقدار NRMSE نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها تا چه حد، اندازه‌گیری‌ها را بیشتر یا کمتر تخمین زده‌اند. مقدار  $R^2$  نسبت میان پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را به دست می‌دهد. شاخص CRM گرایش مدل به سمت تخمین بیش از حد یا کمتر از حد را نشان می‌دهد. مقدار CRM منفی نشان‌گر گرایش به سمت تخمین بیش از حد است.

### نتایج و بحث

#### تحلیل حساسیت مدل AquaCrop

مقادیر ضریب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در جدول ۴ ارائه شده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل برای شبیه‌سازی رطوبت خاک نسبت به  $\theta_{FC}$  از حساسیت متوسط و نسبت به  $\theta_{Sat}$ ،  $\theta_{PWP}$  و  $K_{Sat}$  از حساسیت کم و برای شبیه‌سازی شوری نسبت به  $\theta_{Sat}$  از حساسیت متوسط و نسبت به  $\theta_{FC}$ ،  $\theta_{PWP}$  و  $K_{Sat}$  از حساسیت کم برخوردار است.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

صحت‌سنجی مدل با استفاده از پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) بر حسب درصد، ضریب تعیین ( $R^2$ )، شاخص سازگاری (d)، بیشینه خطای نرمال شده (NME) بر حسب درصد و ضریب باقیمانده (CRM) انجام شد.

$$NRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{\bar{O}_i} \quad [5]$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad [6]$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |Q_i - \bar{O}_i|)^2} \quad [7]$$

$$NME = \max |P_i - Q_i| \times \frac{100}{\bar{O}_i} \quad [8]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad [9]$$

که در آنها  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $Q_i$  مقادیر اندازه-

جدول ۴- ضریب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک.

پارامتر	پارامترهای ورودی مدل	مقدار $S_e$ در حالت +۲۵٪	مقدار $S_e$ در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
شبیه‌سازی رطوبت خاک	$\theta_{FC}$	۰/۹۸	۰/۵۶	متوسط
	$\theta_{PWP}$	۰/۱۷	-۰/۰۱	کم
	$\theta_{Sat}$	۰/۰۲	۰/۰۸	کم
	$K_{Sat}$	۰/۰۵	۰/۰۲	کم
شبیه‌سازی شوری خاک	$\theta_{FC}$	۰/۰۸	۰/۲۹	کم
	$\theta_{PWP}$	-۰/۰۲۵	-۰/۱۹	کم
	$\theta_{Sat}$	-۱/۱۳	۱/۴۹	متوسط
	$K_{Sat}$	۰/۰۸	۰/۱۳	کم

خاک با استفاده از مدل RETC برآورد شده بودند، بنابراین برای شبیه‌سازی بهتر و دقیق‌تر رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک این پارامترها واسنجی شدند (جدول ۵). جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده کمتر از مقادیر جدول ۱ می‌باشند، از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که مدل

### نتایج آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل

#### AquaCrop

پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک و نتایج شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. با توجه به این که پارامترهای هیدرولیکی



شوری عصاره اشباع خاک می‌گردد، البته این افزایش در تمام نیم‌رخ خاک، یکسان توزیع نمی‌شود. لذا در واقعیت برای یک تیمار مشخص سطح شوری، میانگین-گیری ساده از شوری لایه‌های مختلف خاک (۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر) نمی‌تواند معیار دقیقی از توزیع شوری باشد. به‌همین دلیل خطای شبیه‌سازی شوری توسط مدل بیشتر از خطای شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک شده است. همچنین با توجه به جدول ۶ شاخص‌های آماری مربوط به مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، بسیار نزدیک به هم می‌باشند (مقدار متوسط NRMSE در دو رقم قدس و روشن برای رطوبت به‌ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ۱۱/۱۹ و ۱۲/۳۴ درصد و برای شوری به‌ترتیب ۲۳/۹۴ و ۲۴/۸۷ درصد می‌باشد) که نشان می‌دهد مدل به خوبی واسنجی شده است. در همین رابطه خابلا و بولاک (۲۰۱۲) پس از شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop در کانادا گزارش کردند که مدل ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد. به‌طوری که مقادیر  $R^2$ ، RMSE، d برای شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک به‌ترتیب ۰/۹، ۴۹/۴mm و ۰/۹۹ به‌دست آمدند. نتایج می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که همین مدل توانسته است با دقت بالایی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی کند. به طوری که مقادیر NRMSE برای برآورد رطوبت ۶ عمق خاک از ۱/۵ تا ۹/۸ درصد نوسان داشت.

مقدار RETC این پارمترها را بیشتر برآورد کرده است. از آنجایی که رطوبت و شوری خاک، در اعماق ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۹، ۸۲، ۹۷، ۱۱۳، ۱۲۷ و ۱۴۵ سانتی‌متر (تا عمق ریشه گیاه) شبیه‌سازی شده بودند (این اعماق در کنترل کاربر نیستند و مدل به‌طور پیش‌فرض با توجه به عمق ریشه رطوبت و شوری خاک را در ۱۲ عمق شبیه‌سازی می‌نماید)، بنابراین در این تحقیق متوسط رطوبت و شوری شبیه‌سازی شده اعماق (۵ و ۱۵ سانتی‌متر)، (۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر)، (۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر)، (۶۹ سانتی‌متر) و (۸۲ و ۹۷ سانتی‌متر) به عنوان رطوبت و شوری اعماق ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود مدل توانسته است با دقت نسبتاً مناسبی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی نماید. مقادیر متوسط  $R^2$ ، CRM، d، NME، NRMSE در رقم روشن برای پیش‌بینی رطوبت به‌ترتیب ۱۱/۷۲ درصد، ۲۶/۸۱ درصد، ۰/۷۹، ۰/۴۵ و ۰/۶۲ و برای پیش‌بینی شوری به‌ترتیب ۲۴/۲ درصد، ۵۲/۸۱ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۸۷ و ۰/۵۸ می‌باشند. در رقم قدس مقدار این پارامترها برای پیش‌بینی رطوبت به‌ترتیب ۱۱/۸ درصد، ۲۶/۸۷ درصد، ۰/۷۹، ۰/۵۵ و ۰/۶۱ و برای پیش‌بینی شوری به‌ترتیب ۲۴/۶ درصد، ۵۲/۹۷ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۹۳ و ۰/۵۷ می‌باشند. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری می‌توان گفت دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت بیشتر از شوری نیم‌رخ خاک بوده است. همان‌طور که می‌دانیم افزایش شوری آب آبیاری باعث افزایش

جدول ۵- پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک.

عمق خاک (cm)	$\theta_{FC}$ (%)	$\theta_{PWP}$ (%)	$\theta_{Sat}$ (%)	$K_{Sat}$ (mm day <sup>-1</sup> )
۰-۳۰	۳۰/۷	۱۶/۵	۳۵/۶	۴۲
۳۰-۶۰	۳۱	۱۷	۳۶	۶۰
۶۰-۹۰	۳۱	۱۸	۴۲	۷۹

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک برای دو رقم گندم.

پارامتر	رقم	روش	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM	R <sup>2</sup>
رطوبت	روشن	واسنجی	۱۱/۱۵	۲۷/۵	۰/۸۱	۰/۰۵۵	۰/۶۳
	قدس	صحت‌سنجی	۱۲/۳	۲۶/۱۳	۰/۷۸	۰/۰۴۵	۰/۶۱
	روشن	واسنجی	۱۱/۲۳	۲۷/۴۷	۰/۸۱	۰/۰۶	۰/۶۲
شوری	روشن	صحت‌سنجی	۱۲/۳۸	۲۶/۲۷	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۶
	قدس	واسنجی	۲۳/۸۱	۵۱/۰۷	۰/۷۴	۰/۱۷۷	۰/۵۹
	روشن	صحت‌سنجی	۲۴/۶۲	۵۴/۵۵	۰/۷۱	۰/۲۰۷	۰/۵۶
	قدس	واسنجی	۲۴/۰۷	۵۱/۳۶	۰/۷۳	۰/۱۷۵	۰/۵۸
		صحت‌سنجی	۲۵/۱	۵۴/۵۸	۰/۷۱	۰/۲۱۱	۰/۵۶

### شبیه‌سازی رطوبت و شوری

توسط مدل را می‌توان به نوع معادله حاکم بر بیلان آب نسبت داد که در آن برخی از عوامل مؤثر بر حرکت آب از قبیل جریان‌ات ترجیحی و پدیده پس‌ماند رطوبتی در نظر گرفته نشده است. همچنین مدل AquaCrop مانند سایر مدل‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک، فرض می‌کند که خاک اشباع شده در یک بازه زمانی کوتاه زهکشی می‌شود و به رطوبت ظرفیت زراعی می‌رسد (خابلا و بولاک ۲۰۱۲).

در مورد شوری بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به تیمارهای I<sub>2</sub> و I<sub>1</sub> می‌باشد، چرا که با افزایش آب آبیاری، میزان نفوذ عمقی افزایش یافته و توزیع شوری یکنواخت‌تر می‌گردد. کمترین دقت مدل مربوط به تیمار I<sub>4</sub> می‌باشد. دلیل آن می‌تواند کم بودن عمق آب آبیاری باشد، زیرا در این تیمار عملاً نفوذ عمقی وجود نداشته و در نتیجه شوری به صورت یکنواخت در نیم‌رخ خاک توزیع نشده است. به‌طورکلی اعمال تنش آبی سبب کاهش دقت مدل در تخمین شوری نیم‌رخ خاک شده است. جدول ۸ نشان می‌دهد که با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در برآورد رطوبت نیم‌رخ خاک کاسته می‌شود؛ در حالی دقت آن در برآورد شوری نیم‌رخ خاک افزایش می‌یابد. در شرایط واقعی هر چه شوری خاک افزایش می‌یابد، گیاه آب کمتری جذب خواهد نمود، بنابراین در این وضعیت رطوبت بیشتری در خاک باقی خواهد ماند که می‌توان گفت مدل در تیمارهای آبیاری I<sub>2</sub> و I<sub>1</sub> این وضعیت را برای تیمارهای شورتر به خوبی شبیه‌سازی نکرده است و به‌همین دلیل دقت آن برآورد رطوبت کاهش

مقادیر پارامترهای آماری به‌دست آمده برای تیمارهای مختلف آبیاری (جدول ۷) نشان می‌دهند که بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت مربوط به تیمار آبیاری I<sub>2</sub> و کمترین تطابق مربوط به تیمار I<sub>4</sub> می‌باشد. مدل در تمامی تیمارهای آبیاری مقادیر رطوبت را کمتر برآورد نموده است. فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) در ارزیابی مدل AquaCrop در شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل گزارش کردند که در تیمارهای آبیاری کامل، مدل مقادیر رطوبت نیم‌رخ خاک را کم برآورد می‌کند. همچنین می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که مدل AquaCrop در شرایط کشت ذرت دیم در منطقه پنسیلوانیا، رطوبت خاک را در لایه‌های مختلف کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، برآورد می‌کند. زلک و همکاران (۲۰۱۱) پس از ارزیابی مدل AquaCrop گزارش کردند که مدل مقادیر رطوبت خاک را در عمق ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری در بیشتر مواقع در طول فصل رشد بیش برآورد می‌کند. با توجه به منابع، برآورد رطوبت نیم‌رخ خاک توسط مدل در مناطق مختلف متفاوت می‌باشد، از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک با استفاده از مدل AquaCrop نه تنها بستگی به سطوح مختلف آب آبیاری دارد، بلکه به اقلیم و نوع خاک منطقه نیز وابسته است. با توجه به این که شوری آب آبیاری در منابع ذکر شده، متفاوت می‌باشد، بنابراین می‌تواند عامل دیگری برای متفاوت بودن روند شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک در مناطق مختلف باشد. دلایل احتمالی کم برآورد رطوبت

شرایط اولیه خاک در تمام کرت‌ها و تمام نقاط یکسان نباشد. جدول ۱۰ مقادیر پارامترهای آماری به‌دست آمده برای اعماق مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، بیشترین دقت مدل در برآورد رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک به‌ترتیب مربوط به لایه‌های عمقی و سطحی خاک و کمترین دقت آن به‌ترتیب مربوط به لایه‌های سطحی و عمقی خاک می‌باشد. از آنجایی که بیشترین تغییرات رطوبت و شوری خاک در اثر عوامل مختلف (تبخیر، تعرق، جذب ریشه و غیره) در سطح خاک وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت در شبیه‌سازی شوری، مدل اثرات این عوامل را بهتر تخمین می‌زند و به دلیل این که این عوامل در لایه‌های عمقی خاک کمتر می‌باشند، بنابراین دامنه تغییرات رطوبت در عمق کمتر از سطح خاک بوده و در نتیجه باعث افزایش دقت مدل شده است. مقادیر CRM مربوط به شبیه‌سازی رطوبت نشان می‌دهد در لایه‌های سطحی هر چه به سطح خاک نزدیک‌تر می‌شویم مدل مقادیر رطوبت را با اختلاف بیشتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، کم برآورد کرده است. این امر سبب می‌شود مدل مقدار غلظت نمک لایه سطحی را نسبت به لایه‌های پایینی بیشتر و در نتیجه مقدار شوری عصاره اشباع را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده کم برآورد نماید. در عمق ۹۰ سانتی‌متری نیز همان‌طور که مقدار CRM مربوط به شبیه‌سازی رطوبت نشان می‌دهد، مدل مقدار رطوبت را بیش برآورد کرده است و باعث شده است مقدار غلظت نمک در این لایه کمتر و در نتیجه مقدار شوری عصاره اشباع با اختلاف بیشتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده کم برآورد شود. فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) در ارزیابی مدل AquaCrop در شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل گزارش کردند که دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت در اعماق مختلف خاک متفاوت است و در لایه‌های عمقی دقت مدل افزایش می‌یابد. همچنین می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند دقت مدل AquaCrop در برآورد رطوبت خاک در لایه‌های عمقی بیشتر از لایه‌های سطحی می‌باشد.

یافته است. از طرفی چون در تیمار I<sub>1</sub> به نوعی آبخوایی صورت می‌گیرد بنابراین باعث یکنواختی بیشتر شوری در نیم‌رخ خاک، در تیمارهای شورتر و افزایش مدل در برآورد شوری نیم‌رخ خاک می‌شود. همچنین چون در تیمارهای با شوری کم دامنه تغییرات شوری کوچک است. بنابراین اگر مدل در این تیمارها خطایی داشته باشد دقت آن بیشتر از تیمارهایی که شورتر هستند، کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر این است که با افزایش شوری آب آبیاری، میزان آب زهکشی شبیه‌سازی شده در مدل افزایش یافته است و این میزان در تیمارهای آبیاری I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub> بیشتر می‌باشد. به‌همین علت دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک با افزایش شوری آب آبیاری کاهش می‌یابد. مقادیر پارامترهای آماری به‌دست آمده (جدول ۹) نشان می‌دهند که از نظر زمانی، بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت و شوری مربوط به زمان برداشت (۱۸۵ روز پس از کاشت) می‌باشد که احتمالاً دلیل آن مربوط به نوسان در عوامل تغییر دهنده میزان رطوبت از قبیل آبیاری، بارندگی، درجه حرارت و رطوبت هوا در این مرحله زمانی می‌باشد چرا که در زمان برداشت گندم هیچ بارانی در منطقه نباریده و آبیاری انجام نشده است. اما در طی فصل رشد، تغییرات متناوب آب و هوایی و نیز انجام آبیاری از کارایی مدل نسبت به شرایط نبود این تغییرات، تا حدی می‌کاهد. به طوری که در مرحله زمانی ۱۱۹ روز پس از کاشت که در واقع ۴۸ ساعت پس از آبیاری سوم می‌باشد، دقت مدل نسبت به مرحله زمانی ۱۸۵ روز پس از کاشت کمی کمتر شده است. در مرحله زمانی ۱۰۲ روز پس از کاشت مدل کمترین دقت را در شبیه‌سازی رطوبت و شوری داشته است. دلیل آن می‌تواند این باشد که تا روز ۱۰۲ هنوز تیمارها اعمال نشده‌اند و تمام تیمارها به یک اندازه و با شوری آب مشابه، آبیاری شده‌اند. بنابراین مدل در تمامی تیمارها مقدار رطوبت و شوری را یکسان شبیه‌سازی کرده است. همچنین در مدل تمام شرایط اولیه خاک (رطوبت و شوری) برای همه تیمارها یکسان فرض شده است، در حالی که در واقعیت ممکن است

جدول ۷- متوسط مقادیر شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک در تیمارهای مختلف آبیاری برای دو رقم قدس و روشن.

پارامتر	تیمار آبیاری	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM	R <sup>2</sup>
رطوبت	I <sub>4</sub>	۱۳/۷۶	۲۹/۲۲	-/۶۸	-/۰۷	-/۵۴
	I <sub>3</sub>	۱۲/۲۹	۲۷/۵۷	-/۷۲	-/۰۵	-/۶۰
	I <sub>2</sub>	۱۱/۵۵	۱۸/۰۱	-/۷۵	-/۰۴	-/۶۳
	I <sub>1</sub>	۱۲/۰۱	۲۴/۲	-/۶۹	-/۰۷	-/۵۷
شوری	I <sub>4</sub>	۳۰/۷	۵۸/۴۹	-/۶۶	-/۲۲	-/۵۱
	I <sub>3</sub>	۲۵/۶۲	۴۹/۴۱	-/۷۱	-/۱۹	-/۵۵
	I <sub>2</sub>	۲۱/۳۷	۴۲/۵۳	-/۷۲	-/۱۶	-/۶۱
	I <sub>1</sub>	۲۴/۱۸	۴۵/۶۲	-/۶۷	-/۲۱	-/۶۱

جدول ۸- متوسط مقادیر شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک در تیمارهای مختلف شوری برای دو رقم قدس و روشن.

پارامتر	تیمار شوری	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM	R <sup>2</sup>
رطوبت	S <sub>1</sub>	۱۱/۲۷	۲۳/۱۴	-/۷۶	-/۰۳	-/۶۳
	S <sub>2</sub>	۱۲/۳۱	۲۶/۰۱	-/۶۸	-/۰۷	-/۵۴
	S <sub>3</sub>	۱۲/۹۸	۲۸/۸۲	-/۵۹	-/۰۶	-/۴۲
شوری	S <sub>1</sub>	۲۲/۱۷	۵۱/۷	-/۵۸	-/۱۸	-/۴۰
	S <sub>2</sub>	۲۴/۶۴	۵۲/۵	-/۶۷	-/۲۰	-/۵۲
	S <sub>3</sub>	۲۴/۰۳	۴۱/۸۵	-/۷۴	-/۱۶	-/۶۱

جدول ۹- متوسط مقادیر شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک در روزهای مختلف نمونه‌برداری برای دو رقم قدس و روشن.

پارامتر	روز نمونه برداری	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM	R <sup>2</sup>
رطوبت	۱۰۲	۱۵/۵۵	۲۵/۵	-/۵۹	-/۱۲	-/۴۱
	۱۱۹	۱۰/۵۸	۲۳/۳۴	-/۷۴	-/۰۵	-/۶۰
	۱۴۳	۱۳/۵۹	۲۵/۱۵	-/۷۰	-/۰۸	-/۵۱
	۱۸۵	۱۲/۰۱	۲۲/۳۷	-/۷۸	-/۰۴	-/۶۵
شوری	۱۰۲	۲۹/۵۳	۵۶/۰۵	-/۵۱	-/۲۶	-/۳۹
	۱۱۹	۲۴/۶۵	۵۵/۲۴	-/۷۰	-/۱۸	-/۵۹
	۱۴۳	۲۴/۴۳	۴۹/۰۷	-/۷۰	-/۱۷	-/۵۹
	۱۸۵	۲۰/۲۹	۴۲/۸۷	-/۷۴	-/۱۱	-/۶۳

جدول ۱۰- متوسط مقادیر شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی رطوبت حجمی و شوری نیم‌رخ خاک در اعماق مختلف برای دو رقم قدس و روشن.

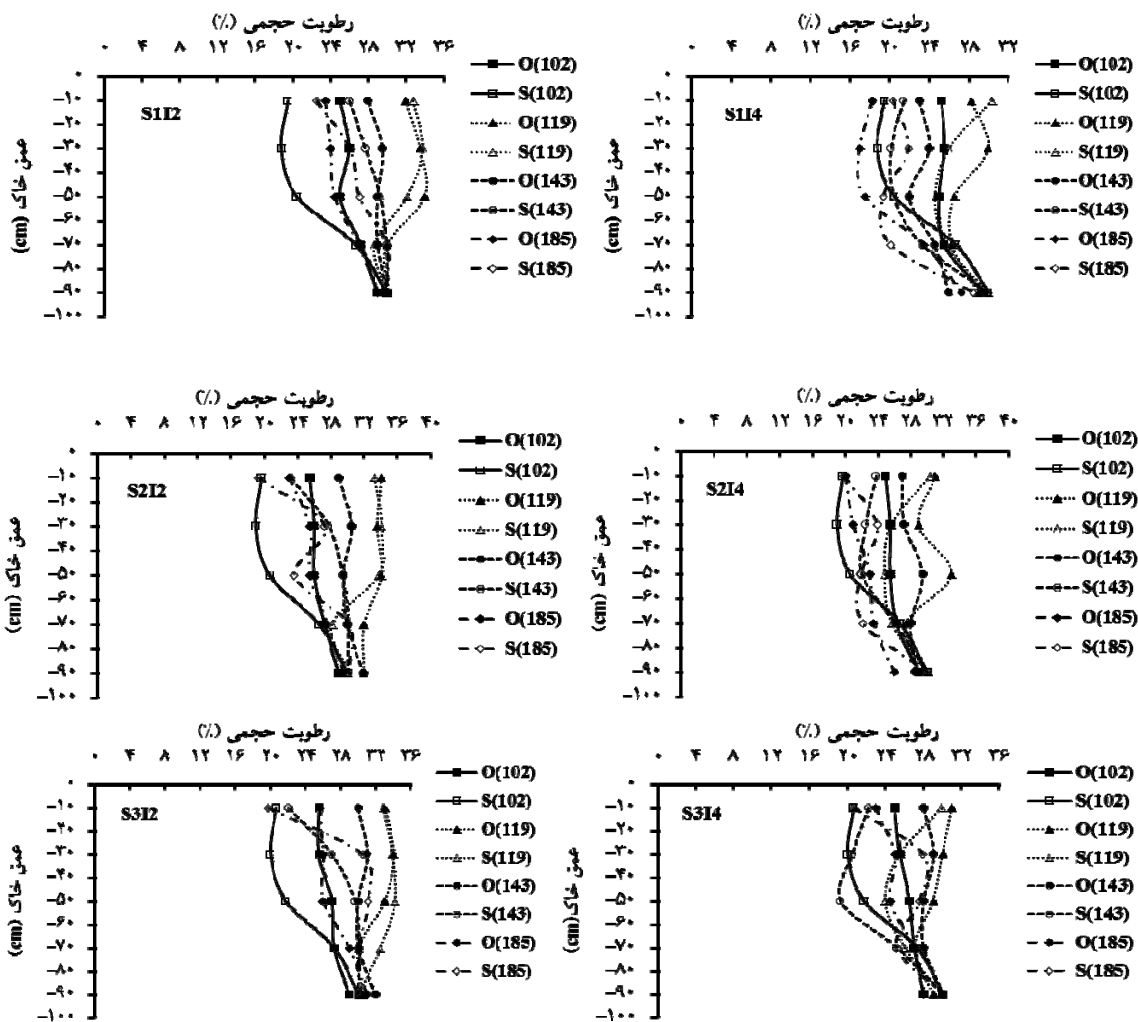
پارامتر	عمق خاک (cm)	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM	R <sup>2</sup>
رطوبت	۱۰	۱۱/۹۸	۲۵/۰۸	-/۷۴	-/۰۷	-/۶۳
	۳۰	۱۳/۸۶	۲۸/۱۷	-/۶۶	-/۰۵	-/۵۶
	۵۰	۱۲/۵۷	۲۸/۸۷	-/۷۳	-/۰۵	-/۶۰
	۷۰	۱۱/۰۱	۱۹/۹۲	-/۷۶	-/۰۴	-/۶۱
	۹۰	۱۰/۲۳	۱۸/۹۹	-/۶۱	-/۰۴	-/۵۱
شوری	۱۰	۲۰/۱۱	۴۵/۷۳	-/۷۳	-/۱۲	-/۶۱
	۳۰	۲۳/۵۳	۴۴/۸۹	-/۷۱	-/۱۷	-/۶۰
	۵۰	۲۴/۳۵	۵۵/۳۴	-/۷۰	-/۱۹	-/۶۰
	۷۰	۲۶/۴۸	۵۱/۷۵	-/۶۵	-/۲۱	-/۵۷
	۹۰	۲۷/۹۱	۵۶/۳۲	-/۶۰	-/۲۴	-/۵۱

و  $I_4$  نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به طور کلی مدل روند تغییرات متوسط شوری خاک را در طی فصل رشد به خوبی شبیه‌سازی کرده است. همچنین مدل شوری متوسط خاک را در طی فصل رشد در همه تیمارها کم‌تر از متوسط شوری اندازه‌گیری شده برآورد کرده است و دقت آن در تیمار  $I_2$  بیشتر از تیمار  $I_4$  می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت دقت مدل در شبیه‌سازی شوری نیم‌رخ خاک تحت شرایط همزمان تنش آبی و شوری کاهش می‌یابد.

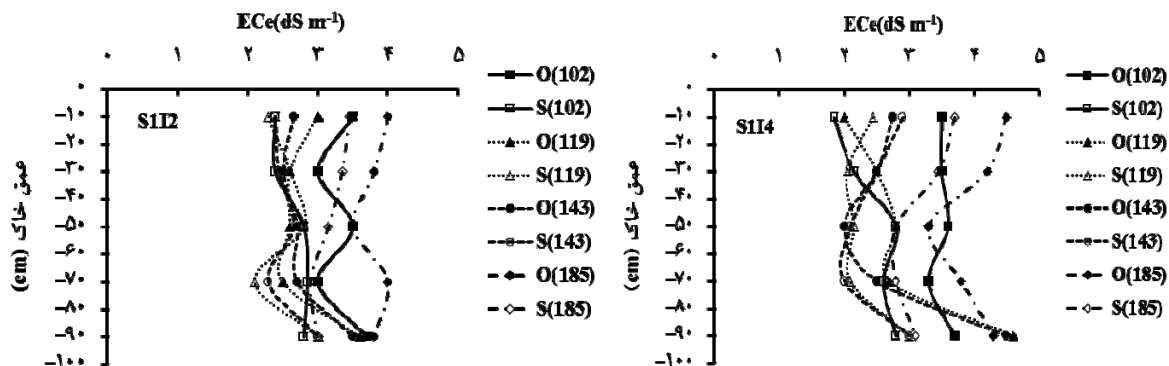
### نتیجه‌گیری کلی

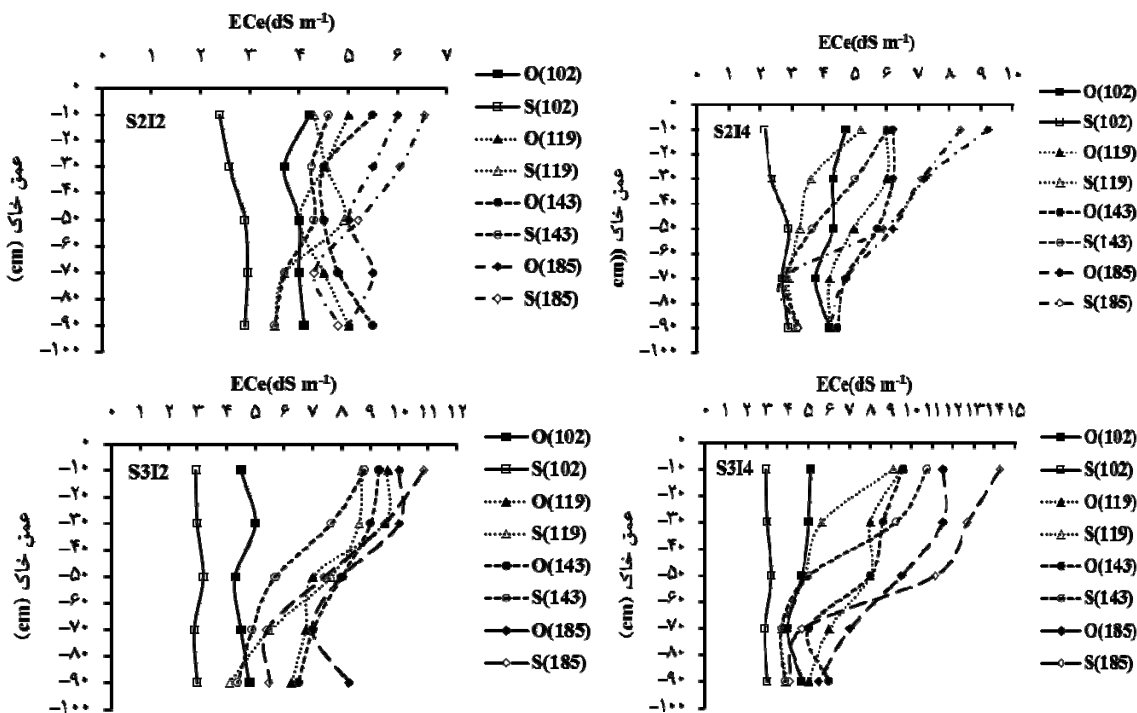
در این تحقیق از قابلیت مدل شبیه‌سازی AquaCrop برای پیش‌بینی رطوبت و شوری در نیم‌رخ خاک استفاده گردید. برای ارزیابی و واسنجی مدل از داده‌های جمع‌آوری شده رطوبت و شوری خاک در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل در برآورد رطوبت و شوری به ترتیب به پارامترهای  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{Sat}$  حساسیت متوسطی داشت. مقادیر شبیه‌سازی رطوبت و شوری نشان دادند که با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در برآورد رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در شرایط واقعی هر چه شوری خاک افزایش می‌یابد، گیاه آب کمتری جذب خواهد نمود، بنابراین در این وضعیت رطوبت بیشتری در خاک باقی خواهد ماند که می‌توان گفت مدل در تیمارهای آبیاری  $I_2$  و  $I_1$  این وضعیت را برای تیمارهای شورتر به خوبی شبیه‌سازی نکرده است و به همین دلیل دقت آن برآورد رطوبت کاهش یافته است. از طرفی چون در تیمار  $I_1$  به نوعی آبشویی صورت می‌گیرد بنابراین باعث افزایش یکنواختی املاح در تیمارهای شورتر و افزایش دقت مدل در برآورد شوری نیم‌رخ خاک می‌شود.

در شکل ۱ و ۲ مقادیر رطوبت و شوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در نیم‌رخ خاک برای رقم روشن و تیمارهای آبیاری ( $I_2$  و  $I_4$ ) که مدل بیشترین و کمترین دقت را در شبیه‌سازی این دو پارامتر (رطوبت و شوری) داشته است، ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با افزایش شوری دقت مدل در تیمار آبیاری  $I_2$  و  $I_4$  کاهش می‌یابد. علت کاهش دقت مدل در تیمارهای شوری بالا را می‌توان برآورد کمتر مقادیر رطوبت در روزهای ۱۱۹ و ۱۴۳ روز پس از کاشت بیان نمود. شکل ۲ مقادیر شوری نیم‌رخ خاک در دو حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که تقریباً در تمامی حالات مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین با افزایش شوری در یک تیمار آبیاری اختلاف کمینه و بیشینه شوری در نیم‌رخ خاک زیاد می‌شود. شدت این اختلاف در سطح شوری  $S_3$  سبب جدا شدن منحنی‌های مربوط به مرحله زمانی ۱۰۲ روز پس از کاشت از بقیه منحنی‌ها شده است. دلیل این امر آنست که تغییرات شوری اولیه نیم‌رخ خاک در این روز در اکثر کرت‌ها کم بوده و آبیاری با سطح شوری  $S_3$  سبب افزایش شوری نیم‌رخ خاک و جدایی منحنی‌های شوری اولیه و شوری پس از اعمال تنش‌ها می‌گردد. همچنین در این شکل مشخص است که کم‌آبیاری سبب کاهش یکنواختی توزیع شوری در نیم‌رخ خاک شده است. در تیمارهای کم‌آبیاری  $I_4$  با افزایش شوری آب آبیاری اختلاف مقادیر شوری در لایه‌های سطحی و عمقی افزایش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند مقدار کم آب آبیاری در این تیمارها باشد که نمی‌تواند شوری را از لایه‌های سطحی به لایه‌های عمقی منتقل کند. بنابراین لایه‌های سطحی شورتر از لایه‌های عمقی می‌باشند و مدل این پدیده را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. شکل ۳ متوسط شوری عصاره اشباع خاک را در تایخ‌های مختلف نمونه‌برداری بعد از کاشت برای تیمارهای آبیاری  $I_2$

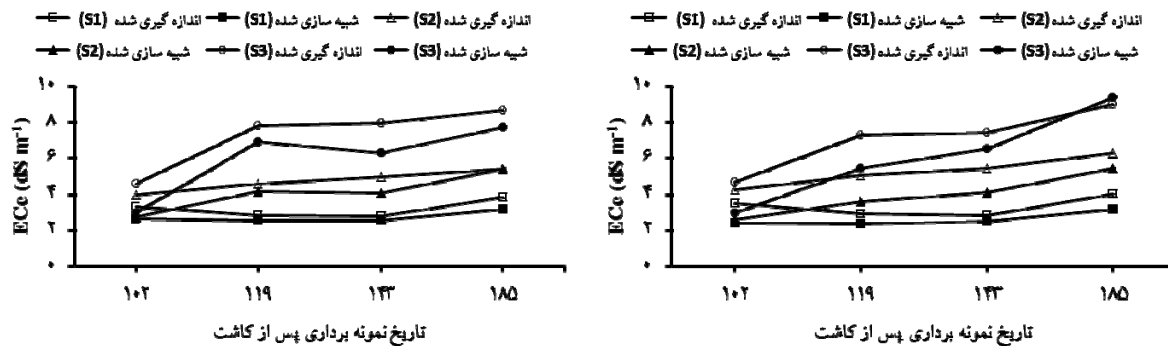


شکل ۱- رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده (O) و شبیه‌سازی شده (S) نیم‌رخ خاک در زمان‌ها و اعماق مختلف نمونه‌برداری برای دو تیمار آبیاری I2 و I4.





شکل ۲- شوری عصاره اشباع اندازه‌گیری شده (O) و شبیه‌سازی شده (S) نیم‌رخ خاک در زمان‌ها و اعماق مختلف نمونه- برداری برای دو تیمار آبیاری I<sub>2</sub> و I<sub>4</sub>.



شکل ۳- متوسط شوری عصاره اشباع اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ خاک در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری برای تیمار آبیاری I<sub>2</sub> (الف) و I<sub>4</sub> (ب).

پیش‌بینی رطوبت به ترتیب ۱۱/۷۲ درصد، ۲۶/۸۱ درصد، ۰/۷۹، ۰/۴۵ و ۰/۶۲ و برای پیش‌بینی شوری به ترتیب ۲۴/۲ درصد، ۵۲/۸۱ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۸۷ و ۰/۵۸ محاسبه شدند. در رقم قدس مقدار این پارامترها برای پیش‌بینی رطوبت به ترتیب ۱۱/۸ درصد، ۲۶/۸۷ درصد، ۰/۷۹، ۰/۵۵ و ۰/۶۱ و برای پیش‌بینی شوری به ترتیب ۲۴/۶ درصد، ۵۲/۹۷ درصد، ۰/۷۲، ۰/۱۹۳ و ۰/۵۷ به دست آمدند. به‌طورکلی با توجه به نتایج شاخص‌های

مدل رطوبت لایه‌های عمقی خاک را با دقت بیشتری نسبت به لایه‌های سطحی و شوری لایه‌های سطحی خاک را با دقت بیشتری نسبت به لایه‌های عمقی برآورد کرد. با افزایش آب آبیاری به دلیل افزایش یکنواختی توزیع شوری، دقت مدل در برآورد شوری افزایش یافت. دقت مدل در برآورد رطوبت بیشتر از شوری نیم‌رخ خاک بود. به طوری که مقادیر متوسط CRM، d.NME، NRMSE و R<sup>2</sup> در رقم روشن برای

شده است، در حالی که املاح تحت تأثیر فرآیندهای دیگر نیز قرار دارند. با توجه به سادگی مدل و نیاز به داده‌های ورودی کم و قابل دسترس، می‌توان با صرف زمان و هزینه کمتر و همچنین کاهش محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی، از این مدل برای برآورد رطوبت و همچنین شوری نیمرخ خاک (البته با دقت کمتر نسبت به برآورد رطوبت) در جهت بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده نمود.

آماری مدل توانست مقادیر رطوبت نیمرخ خاک را با دقت بیشتری نسبت به شوری نیمرخ خاک برآورد نماید. یکی از دلایل دقت کمتر مدل در شبیه‌سازی شوری را می‌توان به معادلات حاکم بر انتقال املاح نسبت داد. عوامل مختلفی بر انتقال املاح در نیمرخ خاک مؤثرند؛ از جمله انتقال توده‌ای، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، تخریب املاح، رسوب که در مدل AquaCrop تنها فرآیندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته

#### منابع مورد استفاده

- بابازاده ح و سرائی تبریزی م، ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۲، صفحه‌های ۳۲۹ تا ۳۳۹.
- جلینی م، کاوه ف، پذیرا ا، پاره‌کار م و عابدی م، ۱۳۸۴. برآورد رطوبت در محدوده توسعه ریشه چغندر قند با استفاده از مدل LEACHM. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۴۹، جلد ۱۲، صفحه‌های ۲۸ تا ۳۸.
- Andarziana B, Bannayanb M, Steduto P, Mazraeha H, Barati ME, Barati MA and Rahnema A, 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100: 1-8.
- Farahani HJ, Izzi G and Oweis TY, 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal* 101: 469-476.
- Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA, Taboada C, Mendoza J, Huanca R, Mamani A, Condori O, Mamani J, Morales B, Osco V and Steduto P, 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal* 101: 499-508.
- Heng LK, Hsiao TC, Evett S, Howell T and Steduto P, 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal* 101: 488-498.
- Hussein F, Janat M and Yakoub A, 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 1319-1330.
- Iqbal M, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A and del Rio S, 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135: 61-72.
- McCuen RH, 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* 28: 37-53.
- Mebane VJ, Day RL, Hamlett JM, Watson JE and Roth GW, 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal* 105(2): 419-427.
- Mkhabela MS and Bullock PR, 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management* 110: 16-24.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101: 438-447.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437.
- Zeleeke KT, Luckett D and Cowley R, 2011. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. *Agronomy Journal* 103: 1610-1618.