شبیه‌سازی رطوبت خاک و عملکرد ذرت در شرایط آبیاری با آب‌شور با مدل SALTMED

نگار خالوندی[1]، امیر سلطانی محمدی[2*] و سعید برومند نسب[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲* - نویسنده مسئول، استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب ، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران a_soltani60@yahoo.com

۳- استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب ، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت:۹۴/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۸

چکیده

یکی از مدل‌هایی که رطوبت خاک و عملکرد گیاه را تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی می کند مدل SALTMED است. این تحقیق باهدف ارزیابی کارایی مدل SALTMED در شبیه‌سازی عملکرد و توزیع رطوبت اعماق خاک تحت کشت ذرت (رقم ٧٠٤) و آبیاری با آب‌شور در مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای این تحقیق از اسفندماه ۱۳۹۲ تا خردادماه ۱۳۹۳ انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل با داده های تیمار شاهد(آب کارون با شوری متوسط ۲/۵ دسی زیمنس بر متر)، رطوبت، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی برای تیمارهای S_1، S_2، S_3 و S_4 (به ترتیب برابر با ۳/۵، ٤/٥، ٥/٥ و ٦/٥ دسی‌زیمنس بر متر) شبیه‌سازی گردید. مطابق محاسبات صورت گرفته در پیش بینی رطوبت خاک، مدل در عمق ۹۰-٦۰ سانتی‌متر تیمارها بیشترین دقت و در عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر کمترین دقت را داشت و با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک افزایش یافت. ضریب تعیین در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۲ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل دقت بهتری در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی دارد. با توجه به نتایج به دست امده مدل رطوبت خاک، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند.

کلید واژه‌ها: شوری، رطوبت، پروفیل خاک، عملکرد، مدل **SALTMED** .

Simulation of Soil Moisture Distribution and Maize Yield Under Irrigation With Saline Water By SALTMED Model

N. Khalvandi[1], A. Soltani Mohammadi[2*] and S. Boromand Nasab[3]

1-M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3-Professor, Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 31 January 2016 Accepted: 17 May 2016

Abstract

The SALTMED is one of the models that can be used for simulation of soil moisture distribution and crop yield under different conditions. This study was carried out to evaluate the performance of SALTMED model for simulation of crop yield and soil moisture distribution under maize cultivation (KSC 704) and irrigation with saline water in research field of Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. This experiment performed in February 2014 to June 2014. The experiments were arranged according to a randomized complete block design with split plot layout. After calibration and verification of model with the control treatment data (irrigation with Karoon river water with EC: 2.5 $dS.m^{-1}$), soil moisture distribution, crop yield and biological yield simulated for S1, S2, S3 and S4 treatments (irrigation water salinity: 3.5, 4.5, 5.5 and 6.5 $dS.m^{-1}$, respectively). According to the calculations of soil moisture distribution prediction, model has a highest accuracy in depth of 60-90 cm and model accuracy decreased in depth of 90- 120 cm. Accuracy of model increased with

increasing the salinity of irrigation water. In simulation of crop yield and biological yield, coefficient of determination respectively was 0.93 and 0.82 and show model has better accuracy in simulation biological yield. According to the results, model simulates soil moisture, crop yield and biological yield with high accuracy.

Keywords: Salinity, Water content, Soil profile, Yield, SALTMED model.

مقدمه

کاهش منابع آب و به موازات آن، افزایش شوری آب، باعث شده است تا استفاده مفید از آب آبیاری یک ضرورت تلقی گردد. کم‌آبیاری و یا آبیاری با آب شور در دراز مدت، ضمن کاهش عملکرد، باعث تخریب خاک می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از خسارت‌های وارده، می‌بایست انتقال آب و املاح در خاک مورد پایش قرار گیرند که در این راستا می‌توان از مدل‌های مختلفی که برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک و همچنین عملکرد، طراحی شده‌اند، استفاده نمود. یکی از این مدل‌ها، SALTMED است.

مدل SALTMED توسط رجب و همکاران ارائه شده است. نسخه ۲۰۰۹ مدل قادر به انجام فرآیندهای کلیدی زیر است: تبخیر و تعرق، جذب آب توسط گیاه، انتقال آب و املاح تحت سیستم‌ها و استراتژی‌های مختلف آبیاری، کودآبیاری، زهکشی، آب زیرزمینی کم‌عمق، چرخه نیتروژن و ارتباط بین عملکرد محصول و استفاده از آب(پائول ونتو و همکاران[1]، ۲۰۱۳). این مدل در سال‌های ۲۰۰۲–۲۰۰۰ در دو مزرعه در مصر و سوریه مورد ارزیابی قرار گرفت و به خوبی توانست تاثیر سیستم آبیاری، نوع خاک، میزان شوری آب آبیاری را روی رطوبت خاک، توزیع نمک، نیاز آبشویی و بازده محصول نشان دهد(رجب[2]، ۲۰۰۲). در این مطالعه، از نسخه ۳,۰۳,۱۹ مدل SALTMED که در سال ۲۰۱۳ ارائه‌شده استفاده گردید. تفاوت اصلی، نسخه ۲۰۱۳ با نسخه سال ۲۰۰۹، در گزینه‌هایی برای محاسبه حجم آب مصرفی در طول فصل طراحی است. در این مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک از معادله (۱) و عملکرد دانه از معادله (۲) به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial(\psi+z)}{\partial z}\right] - S_w \qquad (۱)$$

$$RY = \frac{\sum S(z.z.f)}{\sum S_{max}(x,z,f)} \qquad (۲)$$

که در آنθ: رطوبت خاک در زمان t وعمق z، $k(\theta)$: هدایت هیدرولیکی، ψ : پتانسیل ماتریک و Sw : برداشت و یا جذب املاح توسط ریشه و RY: عملکرد دانه است(رجب، ۲۰۰۲).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه شبیه‌سازی رطوبت خاک (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ کایا و همکاران[3]، ۲۰۱۵ ؛ یازار و اینسکایا[4]، ۲۰۱۲)، شبیه سازی عملکرد گیاه (رنجبر و همکاران[5]،۲۰۱۵)، شبیه سازی رطوبت خاک و عملکرد گیاهان مختلف (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ عالی و همکاران[6]، ۲۰۱۵؛ هانی و همکاران[7]، ۲۰۱۴؛ هریچ و همکاران[8]، ۲۰۱۱؛ کایا و همکاران،۲۰۱۵؛ پائول ونتو و همکاران، ۲۰۱۳؛ رجب، ۲۰۰۲؛ رجب و همکاران[9]، b و a ۲۰۰۵؛ رامشوران و همکاران[10]، ۲۰۱۳؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۱۵ و سیلوا و همکاران[11]، ۲۰۱۲) انجام شده است. نتایج این تحقیقات حاکی از توانمندی مدل SALTMED برای شبیه سازی رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه و عملکرد گیاهان مختلف می باشد. در زمینه بررسی کارایی مدل SALTMED برای شبیه سازی عملکرد گیاه ذرت و رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه آن در شرایط آبیاری با آب شور تحقیقی صورت نگرفته است لذا این تحقیق با هدف شبیه‌سازی عملکرد و رطوبت اعماق مختلف خاک منطقه توسعه ریشه ذرت که یکی از گیاهان اصلی این منطقه و کشور محسوب می‌گردد در شرایط استفاده از آب آبیاری با کیفیت های مختلف صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های صحرایی و جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های مورداستفاده برای واسنجی، صحت‌سنجی و پیش بینی مدل حاصل انجام آزمایشی با عنوان بررسی اثر شوری آب آبیاری بر رطوبت خاک و عملکرد ذرت می‌باشد که در مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز با طول جغرافیایی '۴۸°۴۰ و عرض جغرافیایی '۳۱°۱۸ و ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا انجام شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای این تحقیق از اسفندماه ۱۳۹۲ تا خردادماه ۱۳۹۳ انجام شد. آمار هواشناسی مربوط به این محدوده زمانی (تهیه‌شده از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز) که در جدول (۱) ارائه‌شده است، نشان داد میزان بارندگی در طول دوره کشت، ۵۴/۴۲ میلی‌متر، حداکثر دما در طی کشت، ۴۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد در خرداد و حداقل دما ۲۶/۲۶ درجه سانتی‌گراد در فروردین و مجموع تبخیر تشت کلاس A در طول دوره کشت ۱۰۸۸میلی‌متر بود.

1 -Pulvento *et al.*
2 -Ragab
3 -Kaya *et al.*
4 -Yazar and Incekaya
5 -Ranjbar *et al.*
6 -Aly *et al.*
7 -Hani *et al.*
8 - Hirich *et al.*
9 - Ragab *et al.*
10 -Rameshwaran *et al.*
11 -Silva *et al.*

جدول ۱- مقادیر دما، بارندگی، سرعت باد، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و تبخیر تشت کلاس A

متغیر	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)	۱۳/۵۰	۱۵/۳۰	۲۲/۳۱	۲۵/۹۹
دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد)	۲۶/۲۶	۳۰/۴۵	۳۹/۲۸	۴۳/۹۹
میزان بارندگی (میلی متر)	۳۸/۱۰	۳۷/۸۰	۰/۶۰	۰/۰۰
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۳/۸۸	۵/۱۹	۵/۸۴	۵/۲۹
رطوبت نسبی (درصد)	۵۸/۴۴	۴۹/۲۴	۳۲/۸۴	۲۴/۷۶
ساعت آفتابی (ساعت)	۷/۲۲	۸/۴۵	۹/۳۰	۱۰/۵۹
تبخیر از تشت(میلی متر)	۱۴۸/۸	۲۱۳/۹	۲۹۴/۵	۴۰۹/۲

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف خاک

عمق خاک (سانتی متر)	ذرات خاک (درصد)			بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم در کیلو گرم)	درصد رطوبت حجمی‌طرفیت زراعی	درصد رطوبت حجمی‌پژمردگی
	رس	سیلت	شن					
۰-۳۰	۲۲/۶	۵۲/۱	۲۵/۳	لوم سیلتی	۱/۴۰	۱۱۰	۳۲	۱۵
۳۰-۶۰	۲۳/۵	۵۱/۵	۲۵/۰	لوم سیلتی	۱/۵۵	۱۲۴	۳۲	۱۵
۶۰-۹۰	۲۳/۲	۵۱/۷	۲۵/۱	لوم سیلتی	۱/۶۰	۱۰۸	۳۲	۱۵
۹۰-۱۲۰	۲۳/۹	۵۲	۲۴/۱	لوم سیلتی	۱/۷۵	۱۰۸	۳۲	۱۵

خصوصیات خاک مزرعه در جدول (۲) ارائه‌شده است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود که در آن پنج سطح شوری آب آبیاری بر یک رقم هیبرید ذرت به نام ۷۰۴ اعمال گردید. برای برنامه‌ریزی و تعیین زمان آبیاری، از پارامتر رطوبت خاک استفاده شد. بدین منظور، در روزهای قبل از آبیاری اقدام به اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک با استفاده از نمونه‌هایی که از اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر برداشت شد می‌گردید و سپس با معیار تأمین نیاز آبی گیاه به میزان ۱۰۰ درصد، آبیاری صورت می‌گرفت. برای تعیین کمبود رطوبت خاک از رابطه زیر استفاده گردید:

$$SMD = (W_{fc} - W_i).\rho_b.D \qquad (۳)$$

که در آن SMD: کمبود رطوبت خاک (میلی متر) ، W_{fc}: و W_i: به ترتیب درصد جرمی‌رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و موجود در خاک، pb: جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) و D: عمق توسعه ریشه (میلی متر) می‌باشد.

تیمارهای شوری شامل آب آبیاری با آب غیر شور S_0 (آب کارون، تیمار شاهد ۲ دسی زیمنس بر متر)، S_1 (۳/۵ دسی زیمنس بر متر)، S_2 (۴/۵ دسی زیمنس بر متر)، S_3 (۵/۵ دسی زیمنس بر متر) وS_4 (۶/۵ دسی زیمنس بر متر) بود. روش کاشت به‌صورت دستی در تاریخ ۰۴/ ۱۲/ ۱۳۹۲ و در داخل کرت‌هایی شامل شش ردیف ۳ متری بافاصله ۷۵ سانتی‌متر و با تراکم ۷۰ هزار بوته در هکتار انجام شد. طی مراحل اولیه و توسعه گیاه، آب کارون برای آبیاری مورد استفاده قرار گرفت و با آغاز مرحله توسعه اعمال تیمارهای شوری صورت گرفت. آب با شوری S_1 تا S_4 با اضافه نمودن نمک‌های سدیم کلرید، ;کلرید کلسیم و کلرید منیزیم به آب رودخانه کارون تهیه شد بدین منظور ابتدا آب رودخانه تجزیه و مقادیر هدایت الکتریکی آب، کلسیم، منیزیم و سدیم تعیین شد و با محاسبه نسبت کلسیم به منیزیم و مقدار نسبت جذب سدیم تعیین گردید، سپس مقادیر نمک فوق‌الذکر به نسبتی به آب رودخانه اضافه گردید که هدایت الکتریکی آب به مقدار موردنظر برسد درحالی‌که مقادیر نسبت کلسیم به منیزیم و نسبت جذب سدیم آب حاصله مشابه آب رودخانه باشد (هنگلر[1]، ۲۰۰۴). نتایج تجزیه آب آبیاری تیمارهای مختلف در جدول (۳) ارائه‌شده است.

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، در طول دوره رشد ۱۱ مرحله نمونه‌برداری از اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر صورت گرفت و رطوبت به‌صورت جرمی تعیین شد.

1- Henggeler

جدول ۳- خصوصیات کیفی آب آبیاری در تیمارهای مختلف

تیمار پارامتر	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
سولفات (میلی اکی والانت در لیتر)	۹/۸۵	۸/۸۴	۰/۵۶	۱۰/۱۵	۱۳/۳۰
کلرید (میلی اکی والانت در لیتر)	۱۳/۵۵	۳۴/۱۱	۳۹/۱۰	۳۹/۸۰	۴۸/۱۰
بی کربنات محلول در آب خالص (میلی اکی والانت در لیتر)	۳/۴۳	۳/۰۶	۳/۳۷	۳/۵۲	۳/۶۳
پتاسیم (میلی اکی والانت در لیتر)	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۲
سدیم (میلی اکی والانت در لیتر)	۱۳/۴۲	۲۰/۱۳	۲۲/۸۰	۲۴/۱۰	۲۷/۹۰
منیزیم (میلی اکی والانت در لیتر)	۳/۹۴	۷/۳۳	۹/۸۵	۱۰/۱۳	۱۲/۳۰
کلسیم (میلی اکی والانت در لیتر)	۸/۱۱	۱۵/۷۹	۱۷/۹۱	۲۰/۱۶	۲۵/۱۳
نسبت جذب سدیم	۵/۴۷	۵/۹۲	۶/۱۲	۶/۲۰	۶/۴۵
اسیدیته	۷/۴۰	۷/۴۰	۷/۳۰	۷/۵۰	۷/۴۰
هدایت الکتریکی آب (دسی زیمنس بر متر)	۲/۰۰	۳/۵۰	۴/۵۰	۵/۵۰	۶/۶۰

جدول ٤- تاریخ نمونه‌برداری

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تاریخ	۱۳۹۲/۱۲/۰۴	۱۳۹۳/۰۱/۱۹	۱۳۹۳/۰۱/۲۷	۱۳۹۳/۰۲/۰۳	۱۳۹۳/۰۲/۱۰	۱۳۹۳/۰۲/۲۰	۱۳۹۳/۰۲/۲۸	۱۳۹۳/۰۳/۰۵	۱۳۹۳/۰۳/۱۰	۱۳۹۳/۰۳/۱۳	۱۳۹۳/۰۳/۱۷

تاریخ‌های نمونه برداری در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین در پایان فصل، با برداشت محصول از خطوط میانی هر کرت و پس از حذف ۰/۵ متر حاشیه از بالا و پایین هر ردیف، عملکرد دانه با رطوبت ۱۴ درصد و عملکرد بیولوژیکی (مجموع وزن خشک کل اندام‌های رویشی و دانه به جز ریشه) تعیین شد.

واسنجی مدل SALTMED

داده‌های ورودی مدل عبارتند از:اطلاعات اقلیمی، زراعی، خاکشناسی و مدیریتی. اطلاعات مربوط به خاک از مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین اجرای نرم‌افزار RETC تهیه و به‌عنوان ورودی به مدل وارد گردید. داده‌های هواشناسی و اطلاعات اقلیمی‌سال ۹۳-۱۳۹۲ نیز از ایستگاه هواشناسی اهواز تهیه گردید. مقادیر رطوبت و شوری اولیه خاک که تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شده بود وارد مدل گردید. به‌منظور واسنجی مدل برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه از ۷۰ درصد داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده تیمار شاهد استفاده شد. بدین منظور از داده‌های مربوط به تاریخ‌های ۱۳۹۳/۰۱/۱۹، ۱۳۹۳/۰۱/۲۷، ۱۳۹۳/۰۲/۱۰، ۱۳۹۳/۰۲/۲۰، ۱۳۹۳/۰۳/۰۵، ۱۳۹۳/۰۳/۱۰ و ۱۳۹۳/۰۳/۱۳ استفاده شده و واسنجی مدل مطابق مراحل زیر انجام گردید:

اجرای مدل برای تیمار شاهد و تعیین رطوبت شبیه‌سازی‌شده در اعماق مختلف.

مقایسه رطوبت شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های فوق‌الذکر.

ایجاد تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع، محتوای آب[1]، فشار هیگروسکوپیک[2] و لاندا[3] تا آنجا که بیشترین تطابق بین داده‌های واقعی رطوبت و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل حاصل گردید. مقادیر پیش‌فرض و نهایی پارامترهای استفاده شده در واسنجی مدل در جدول (۵) ارائه گردیده است.

صحت‌سنجی مدل SALTMED

صحت‌سنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده تیمار شاهد (تاریخ‌های ۱۳۹۲/۱۲/۰۴، ۱۳۹۳/۰۲/۰۳، ۱۳۹۳/۰۲/۲۸، ۱۳۹۳/۰۳/۱۷) انجام شد. روش کار به این صورت بود که رطوبت خاک با استفاده از مدل واسنجی شده شبیه‌سازی شد و سپس با مقادیر اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های ذکرشده مقایسه گردید.

1 - Residual Water Content
2 - Bubling Pressure
3 - Lambda

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

پارامتر	فشار هیگروسکوپیک (سانتی متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی متر بر روز)	محتوای نسبی آب (درصد)	λ
مقدار اولیه	۱۶/۶۷	۵۵۷	۰/۰۱	۰/۵۳
مقدار نهایی	۱۰۰	۱۴۲	۰/۰۵	۰/۱۴۵

جدول ٦- مقادیر شاخص‌های آماری مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED

شاخص / مرحله	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (درصد)	ضریب باقیمانده(درصد)	حداکثر خطا(درصد)
واسنجی	۰/۸۲	۸/۳۲	۰/۰۰	۵/۱۲
سحت سنجی	۰/۸۸	۶/۳۳	۰/۰۰	۴/۴۱

شاخص‌های ارزیابی مدل

پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مدل برای سایر تیمارها اجرا گردید سپس مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه شد. برای مقایسه نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص‌های آماری میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده[1] (NRMSE)، ضریب تعیین[2] (R^2)، ضریب باقیمانده[3] (CRM)، حداکثر خطا[4] (ME) بود. شکل ریاضی این آماره‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}\right]^{1/2} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2} \quad (۵)$$

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

$$ME = \max|P_i - O_i|_{i=1}^{n} \quad (۷)$$

که در آن‌ها P_i: مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i: مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده)، n :تعداد نمونه‌های به‌کاررفته و $\bar{O}$:مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده است. حداقل مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده و ضریب تعیین صفر است. ضریب باقیمانده می‌تواند مقدار منفی داشته باشد. مقدار زیاد میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده نشان می‌دهد که برآورد بیش‌ازحد یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) چقدر است. آماره ضریب تعیین نسبت پراکندگی رابین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. آماره ضریب باقیمانده نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش‌ازحد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده باهم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده، ضریب باقیمانده، حداکثر خطا برابر صفر و مقدار ضریب تعیین برابر یک خواهد شد(شهیدی، ۱۳۸۷).

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED

پیش از واسنجی و صحت سنجی تحلیل حساسیت مدل صورت گرفت و نتایج نشان داد مدل بیشترین حساسیت را به شوری و میزان آب آبیاری دارد(خالوندی و همکاران، ۱۳۹۴).نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از تغییر در پارامترهای فشار هیگروسکوپیک، هدایت هیدرولیکی اشباع، محتوای نسبی آب و λ در شکل‌های (۱) و (۲) و جدول (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل(۱) مشاهده می‌شود در مرحله واسنجی مدل، خط رگرسیونی نزدیک خط نیمساز (۱:۱) قرارگرفته و این مطلب نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل است. در این زمینه یازار و اینسکایا (۲۰۱۲) در بررسی عملکرد نرم‌افزار به نتایج مشابهی دست یافتند و ضریب تعیین داده‌ها ۰/۸۲ به دست آمده که با توجه به شرایط آزمایش در مقیاس مزرعه‌ای تطابق مطلوبی بین رطوبت اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد. در این رابطه هریج و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق خود در مرحله واسنجی مدل SALTMED برای رطوبت به نتیجه‌ی مشابه رسیده‌اند و ضریب تعیین داده‌ها را برای اعماق ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۹۱، ۰/۶۹ و ۰/۸۴ اعلام نمودند. همچنین هانی و همکاران (۲۰۱۴) در شبیه‌سازی رطوبت ضریب همبستگی را ۰/۹۴ را ارائه دادند. بر اساس جدول (۷) مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده برای واسنجی رطوبت ۸/۳۲ محاسبه گردید که نشان دهنده دقت خوب مدل است. مقدار شاخص ضریب باقیمانده در واسنجی مدل صفر به دست آمد و نشان می‌دهد مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل تقریباً برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقدار حداکثر خطا ۵/۱۲ محاسبه گردید که قابل قبول است.

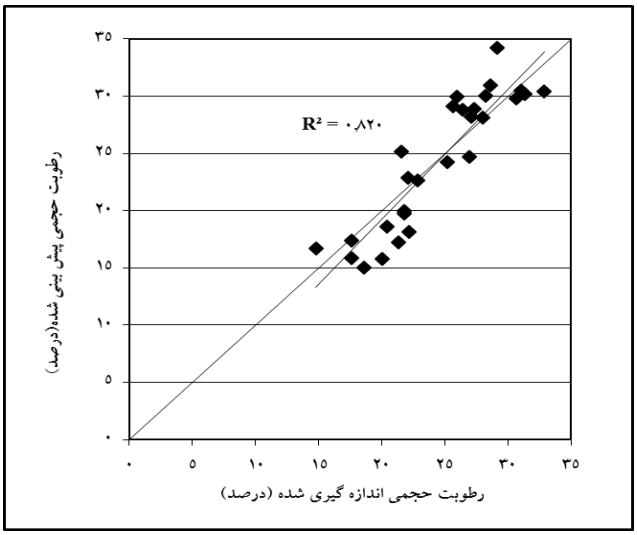
1 - Normalized Root Mean Square Error
2 - Coefficient of Determination
3 - Coefficient of Residual mass
4 - Maximum Error

مقدار ضریب تعیین در مرحله صحت سنجی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت خاک ۰/۸۸ است که نشان می دهد همبستگی قابل‌قبولی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک وجود دارد. رجب (۲۰۱۳) مقدار ضریب تعیین را در مرحله صحت‌سنجی رطوبت ۰/۸۴ اعلام نمود. مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده در مرحله صحت‌سنجی ۶/۳۳ محاسبه گردید که نشان دهنده دقت خوب مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک است. شاخص ضریب باقیمانده برای رطوبت صفر است و نشان می‌دهد که مدل، مقادیر رطوبت را تقریباً برابر مقادیر واقعی برآورد می‌نماید. مقدار حداکثر خطا ۴/۴۱ به دست آمد که قابل قبول است.

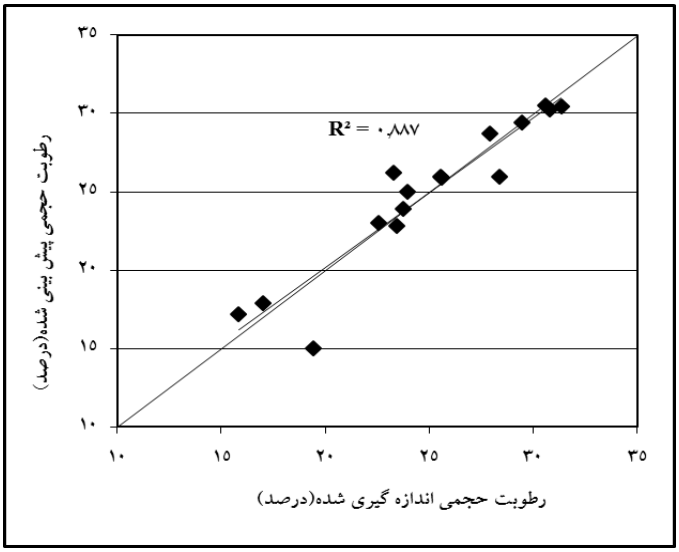
به طور کلی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان داد که مدل SALTMED کارایی لازم را در پیش‌بینی رطوبت خاک دارد و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی استفاده نمود.

شبیه‌سازی رطوبت لایه‌های خاک در تیمارهای S_1، S_2، S_3 و S_4

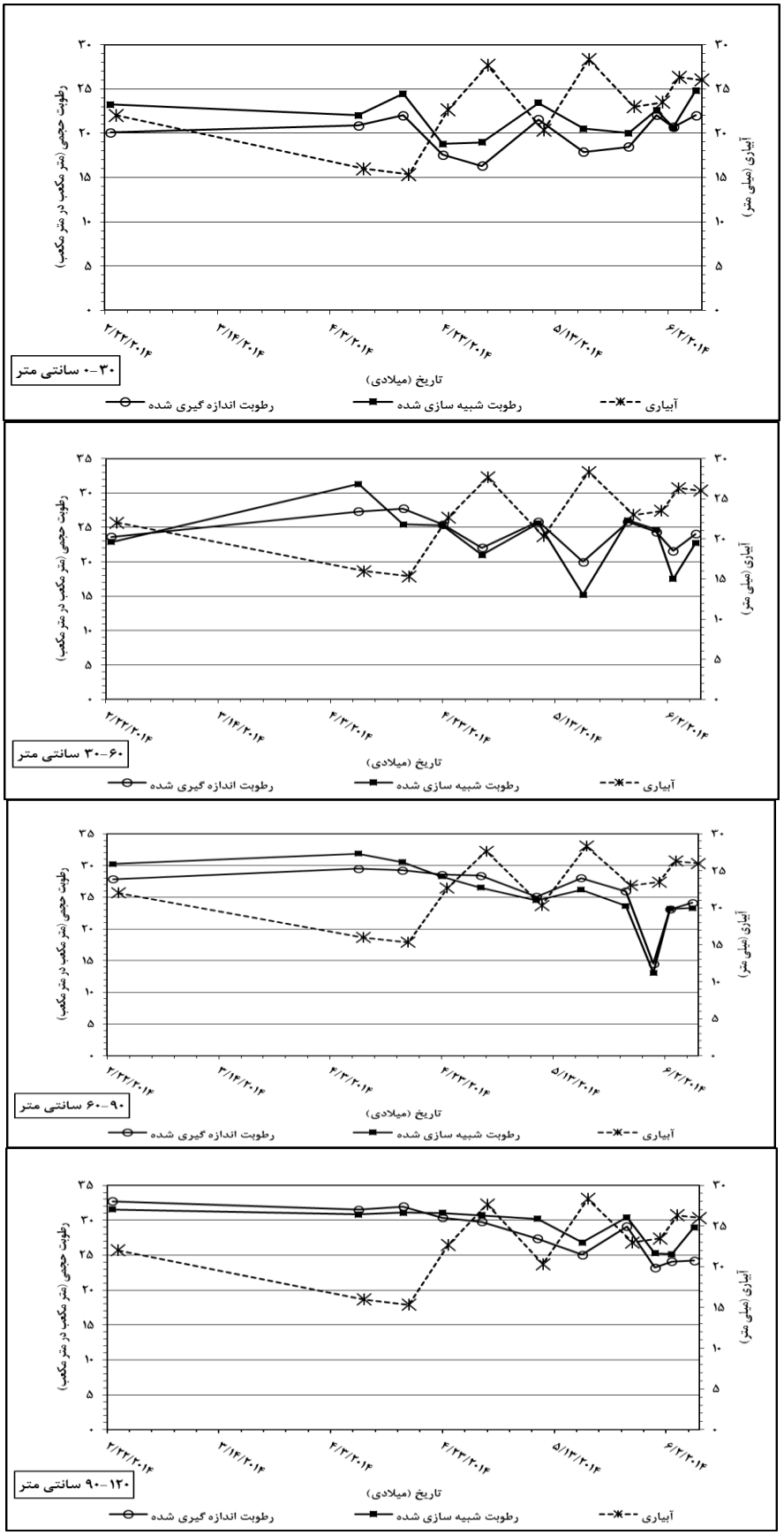
پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل SALTMED با استفاده از داده های تیمار شاهد، رطوبت خاک برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰ -۹۰ سانتی متر خاک چهار تیمار S_1، S_2، S_3 و S_4 شبیه سازی گردید. شکل‌های (۳) تا (۶) رطوبت پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف خاک تیمارهای S_1 تا S_4 را نشان می‌دهد. برای مقایسه نتایج و تعیین لایه خاک با بهترین عملکرد مدل SALTMED به ترتیب دقت لایه ها از نظر هر شاخص امتیاز دهی صورت گرفت و مجموع امتیازها برای هر لایه محاسبه گردید.



شکل۱-. نتایج واسنجی مدل SALTMED برای شبیه سازی رطوبت خاک



شکل۲-. نتایج صحت‌سنجی مدل SALTMED برای شبیه سازی رطوبت خاک



شکل ۳- مقایسه رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با مدل SALTMED برای تیمار S_1

جدول ۷-مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت لایه‌های خاک با استفاده از شاخص‌های ارزیابی در تیمار S_1

عمق (سانتی متر)	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده(درصد)	ضریب باقیمانده(درصد)	حداکثر خطا(درصد)	مجموع ترتیب دقت مدل
۰-۳۰	۰/۷۷ (۴)*	(۳)۱۰/۳۰	-۰/۰۹	(۲)۳/۱۵	۹
۳۰-۶۰	(۲)۰/۹۱	(۲)۹/۹۳	۰/۰۳	(۳)۴/۷۸	۷
۶۰-۹۰	(۳)۰/۸۵	(۱)۶/۲۳	۰/۰۱	(۲)۲/۴۱	۶
۹۰-۱۲۰	(۱)۰/۹۵	(۴)۱۱/۷۶	-۰/۰۷	(۴)۶/۰۲	۹

*: ترتیب دقت مدل بر اساس مقادیر شاخص‌ها

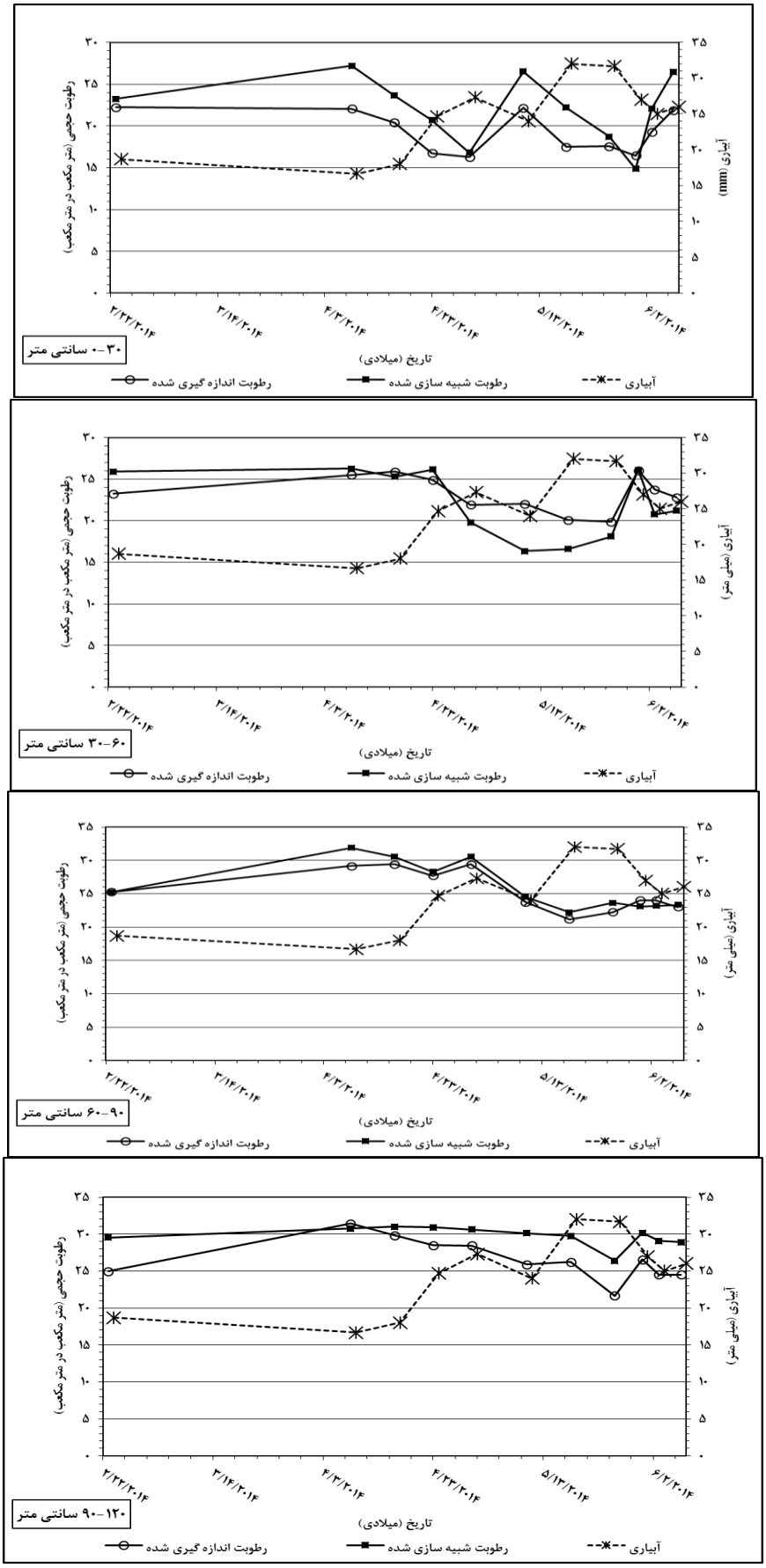
جدول ۸- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت لایه‌های خاک با استفاده از شاخص‌های ارزیابی در تیمار S_2

عمق (سانتی متر)	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده(درصد)	ضریب باقیمانده(درصد)	حداکثر خطا(درصد)	مجموع ترتیب دقت مدل
۰-۳۰	(۲)۰/۷۸*	(۴)۱۷/۵۳	-۰/۱۳	(۳)۵/۱۳	۱۰
۳۰-۶۰	۰(۱)/۹۲	(۲)۱۱/۰۴	۰/۰۵	(۴)۵/۶۴	۷
۶۰-۹۰	(۳)۰/۷۶	(۱)۴/۶۸	-۰/۰۲	(۱)۲/۷۳	۵
۹۰-۱۲۰	(۲)۰/۷۸	(۳)۱۳/۳۵	-۰/۱۱	(۲)۴/۷۱	۷

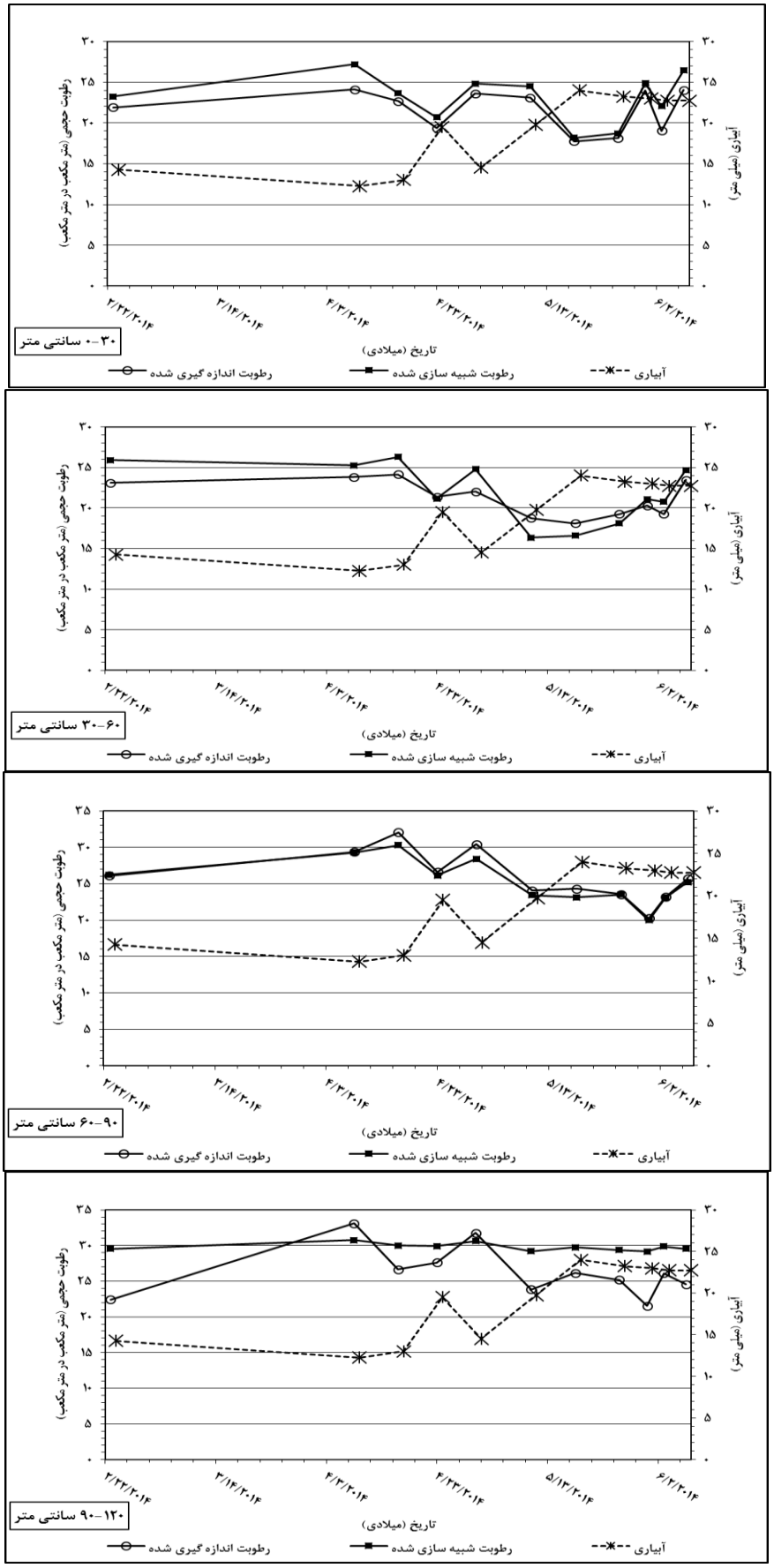
*: ترتیب دقت مدل بر اساس مقادیر شاخص ها

با توجه به جدول(۷) ضریب تعیین برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر خاک در تیمار S_1 به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۹۱، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ به دست آمد. مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده برای اعماق فوق این تیمار به ترتیب ۱۰/۳۰، ۹/۹۳، ۶/۲۳ و ۱۱/۷۶ به دست آمد که برای تمامی‌لایه‌های خاک مقادیر قابل قبولی است. مقدار شاخص ضریب باقیمانده برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر ۰/۰۹-، ۰/۰۳، ۰/۰۱ و ۰/۰۷- محاسبه گردید. مدل رطوبت خاک را در عمق‌های ۳۰-۰ و ۱۲۰-۹۰ بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده و در عمق‌های ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نموده است. با توجه به جدول(۷) و بر اساس مجموع ترتیب دقت مدل به دست آمده مدل رطوبت اعماق خاک را در تیمار S_1 با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند و بهترین عملکرد آن در عمق ۹۰-۶۰ و سپس عمق ۶۰-۳۰ سانتی متر است.

طبق جدول (۸) ضریب تعیین برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر خاک در تیمار S_2 به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۹۲، ۰/۷۶ و ۰/۷۸ به دست آمد. با توجه به مقدار شاخص میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده مدل دارای دقت مناسب در شبیه‌سازی رطوبت خاک در تیمار S_2 است. در عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر تیمار S_2 مقدار ضریب باقیمانده ۰/۱۳-، ۰/۰۵، ۰/۰۲- و ۰/۱۱- به دست آمد که به معنی آن است که رطوبت شبیه‌سازی شده در عمق‌های ۳۰-۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر مقدار رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج جدول (۸) و بر اساس مجموع ترتیب دقت مدل به دست آمده مدل رطوبت خاک را در تیمارS_2 به خوبی شبیه‌سازی نمود. بهترین عملکرد مدل در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متر این تیمار مشاهده شد. هریچ و همکاران نیز به نتایج مشابهی دست پیدا نمودند و اعلام کردند مدل در عمق ۵۰ سانتی متری از عملکرد مطلوبی برخوردار است(هریچ و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ٤- مقایسه رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با مدل SALTMED برای تیمار S_2



شکل ۵- مقایسه رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با مدل SALTMED برای تیمار S_3

جدول ۹- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت اعماق خاک با استفاده از شاخص‌های ارزیابی در تیمار S_3

عمق (سانتی متر)	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده(درصد)	ضریب باقیمانده(درصد)	حداکثر خطا(درصد)	مجموع ترتیب دقت مدل
۰-۳۰	*(۳)۰/۹۰	(۲)۸/۱۰	-۰/۰۶	(۳)۳/۰۹	۸
۳۰-۶۰	(۲)۰/۹۱	(۳)۸/۵۰	-۰/۰۳	(۲)۲/۷۸	۷
۶۰-۹۰	(۲)۰/۹۱	(۱)۳/۵۷	۰/۰۲	(۱)۲/۰۲	۴
۹۰-۱۲۰	(۱)۰/۹۶	(۴)۱۷/۴۳	-۰/۱۳	(۴)۷/۶۴	۹

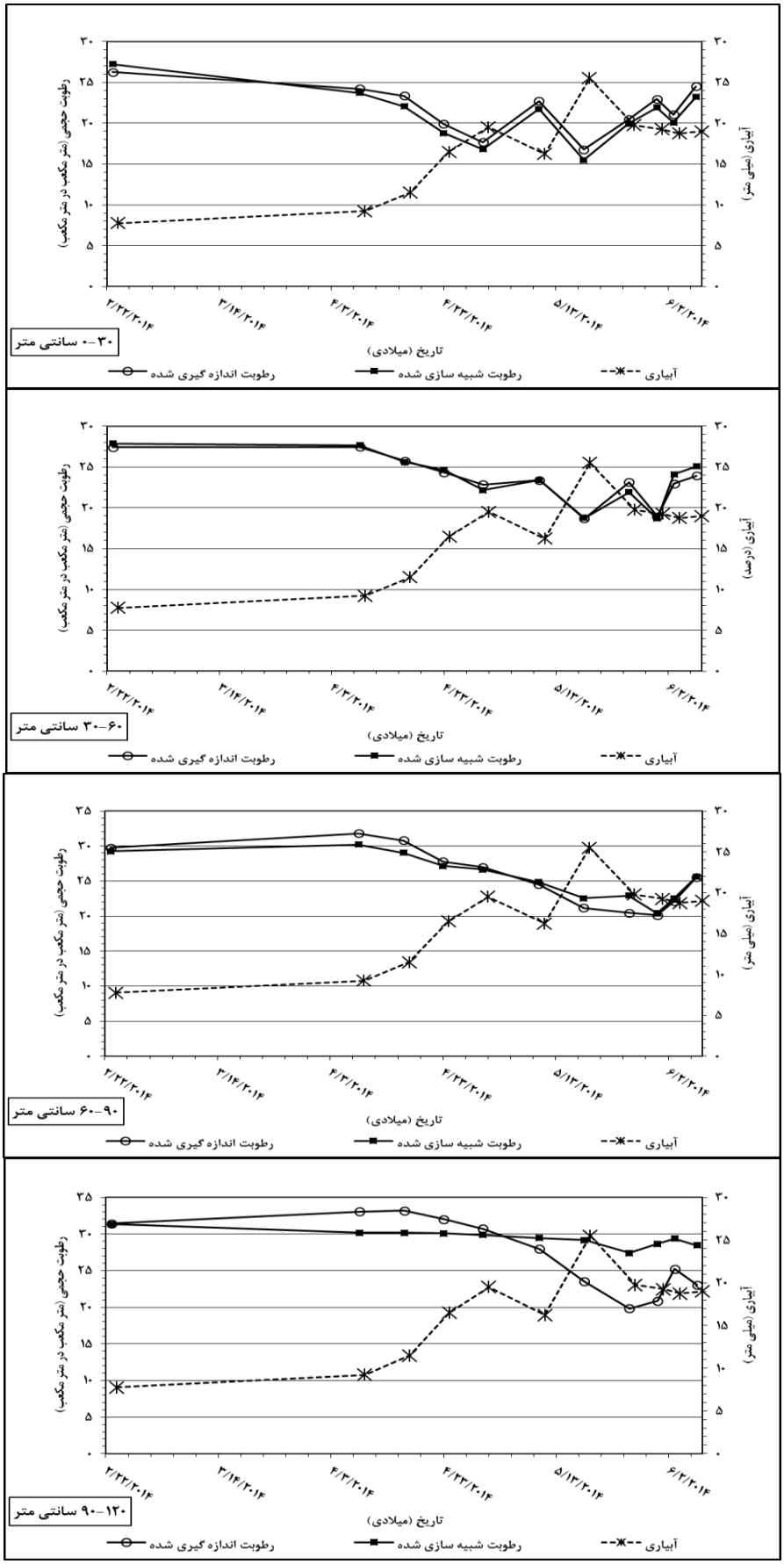
*: ترتیب دقت مدل بر اساس مقادیر شاخص ها

جدول ۱۰- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت اعماق خاک با استفاده از شاخص‌های ارزیابی در تیمار S_4

عمق (سانتی متر)	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده(درصد)	ضریب باقیمانده(درصد)	حداکثر خطا(درصد)	مجموع ترتیب دقت مدل
۰-۳۰	*(۲)۰/۹۵	(۳)۴/۶۴	۰/۰۳	(۲)۱/۳۱	۷
۳۰-۶۰	(۱)۰/۹۷	(۱)۲/۸۷	۰/۰۰	(۱)۱/۲۰	۳
۶۰-۹۰	(۱)۰/۹۷	(۲)۴/۵۲	۰/۰۰	(۳)۲/۴۴	۶
۹۰-۱۲۰	(۳)۰/۷۶	(۴)۱۶/۴۰	-۰/۰۷	(۴)۷/۸۰	۱۱

*: ترتیب دقت مدل بر اساس مقادیر شاخص ها

با توجه به جدول (۹) ضریب تعیین برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر خاک در تیمار S_3 به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۹۱، ۰/۹۱ و ۰/۹۶ به دست آمد. شاخص میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده برای عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر خاک تیمار S_3 به ترتیب ۸/۱۰، ۸/۵۰، ۳/۵۷ و ۱۷/۴۳ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل در تعیین رطوبت خاک دقت مناسبی دارد. مطابق شاخص ضریب باقیمانده مدل رطوبت را در عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۱۲۰-۹۰ بیشتر از رطوبت اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند بر اساس نتایج و مجموع ترتیب دقت مدل در تیمار S_3، مدل رطوبت خاک را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی می‌کند و بهترین عملکرد را در عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متر و سپس در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر دارد. علت آن می‌تواند تاثیر بیشتر تبخیر و عوامل محیطی بر میزان رطوبت خاک در لایه سطحی است که در نهایت منجر به اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده می‌شود.



شکل ٦- مقایسه رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با مدل SALTMED برای تیمار S_4

جدول ۱۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد با استفاده از شاخص‌های ارزیابی

شاخص / عملکرد	ضریب تعیین	میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (درصد)	ضریب باقیمانده(تن در هکتار)	حداکثر خطا(تن در هکتار)
عملکرد دانه	۰/۸۲	۳/۷۹	۰/۱۷	۱/۶۶
عملکرد بیولوژیکی	۰/۹۳	۴/۲۰	-۰/۰۷	۰/۱۴

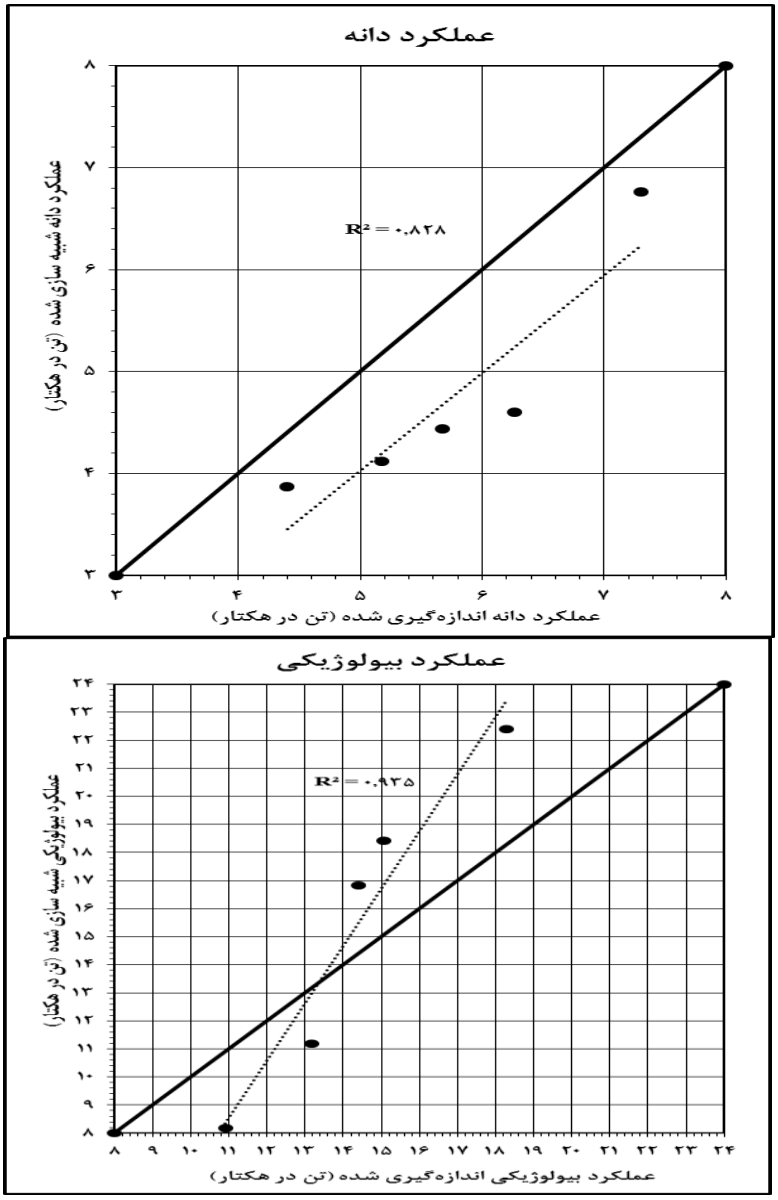
ضریب تعیین برای تیمار S_4 به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۷، ۰/۹۷ و ۰/۷۶ محاسبه گردیده است. از نظر عمق بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت به ترتیب در عمق‌های ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰، ۳۰-۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی متر است. بر اساس جدول (۱۰) شاخص میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده و ضریب باقیمانده دز عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر به ترتیب ۴/۶۴، ۲/۸۷، ۴/۵۲ و ۱۶/۴۰ و ۰/۰۳، صفر، صفر و ۰/۰۷- به دست آمد. مدل رطوبت را در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر با بیشترین دقت شبیه‌سازی می‌کند. مطابق شاخص ضریب باقیمانده در دو لایه ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متر مدل رطوبت را تقریباً برابر با رطوبت اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نمود و در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر رطوبت را کمتر و در عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر بیشتر از رطوبت اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به مجموع ترتیب دقت مدل و محاسبات جدول (۱۰) بهترین کارایی مدل در عمق ۶-۳۰ سانتی‌متر و سپس در عمق ۹۰-۶۰ سانتی متر دیده می‌شود.

با توجه به نتایج و به طور کلی با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت لایه‌های خاک افزایش می یابد . همچنین مدل رطوبت عمق ۹۰-۶۰ سانتی‌متر را با بیشترین دقت و رطوبت عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متر را با کمترین دقت شبیه‌سازی می کند. در این زمینه هریچ و همکاران (۲۰۱۱)، هانی و همکاران (۲۰۱۴) و رجب و همکاران (b و a ۲۰۰۵) به نتایج مشابهی دست یافتند و اعلام نمودند که مدل SALTMED می‌تواند به خوبی رطوبت خاک را شبیه‌سازی کند.

شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی

با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده، شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی ذرت در تیمارهای S_0 تا S_4 انجام گرفت. شکل (۷) مقادیر پیش‌بینی‌شده را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری نشان می‌دهد. در جدول (۱۱) نیز آماره‌های محاسبه‌شده ارائه‌شده است. مقدار ضریب تعیین در عملکرد دانه ۰/۸۲ و در عملکرد بیولوژیکی ۰/۹۳ به دست آمده است و نشان می‌دهد مدل عملکرد دانه و بیولوژیکی را با دقت بالا شبیه‌سازی نموده است. هریچ و همکاران (۲۰۱۱) مقدار ضریب تعیین عملکرد دانه و عملکرد بیولوزیکی گیاه ذرت را به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۹۲ اعلام نمودند. مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده، ضریب باقیمانده، حداکثر خطا برای عملکرد دانه۳/۷۹، ۰/۱۷ و ۱/۶۶ به دست آمد است.

ضریب باقی مانده نشان می‌دهد مدل عملکرد دانه را کمتر از عملکرد اندازه گیری شده شبیه‌سازی نمود و میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه است. شاخص حداکثر خطا نشان می‌دهد که میانگین عملکرد اندازه گیری شده در مزرعه برآورد بهتری از عملکرد دانه است. مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده، ضریب باقیمانده و حداکثر خطا رای عملکرد دانه۴/۲۰، ۰/۰۷- و ۰/۱۴به دست آمد است.ضریب باقی مانده مدل در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی نشان می‌دهد مدل عملکرد را بیشتر از عملکرد اندازه گیری شده شبیه‌سازی نمود همچنین میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه است و حداکثر خطا نشان می‌دهد که میانگین مقدار شبیه‌سازی شده در مزرعه برآورد بهتری از عملکرد بیولوژیکی است.



شکل ۷- مقایسه عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با مدل SALTMED

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف شبیه‌سازی رطوبت خاک ناحیه توسعه ریشه ذرت و همچنین شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گیاه ذرت در شرایط استفاده از آب آبیاری شور از مدل SALTMED استفاده شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، رطوبت برای تیمارهای S_1، S_2، S_3 و S_4 پیش‌بینی گردید و با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مقایسه گردید. مطابق محاسبات صورت گرفته با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک افزایش می‌یابد. مقدار مجموع ترتیب دقت مدل برای تیمارها نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در پیش‌بینی رطوبت خاک است و همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار در شوری‌های بالاتر به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. از نظر عمق بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت برای تیمارهای S_0، S_1، S_2، S_3 و S_4 به ترتیب عمق‌های ۹۰-۶۰، ۹۰-۶۰، ۹۰-۶۰، ۹۰-۶۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر بود. عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی توسط مدل شبیه‌سازی شد. شاخص میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی مدل است. مدل در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی کارایی بیشتری دارد و مقدار عملکرد بیولوژیکی را بیشتر از مقدار اندازه گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مدل SALTMED را برای شبیه‌سازی رطوبت لایه‌های خاک، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی استفاده نمود.

منابع

۱- خالوندی، ن.، برومند نسب، س . و ا. سلطانی محمدی. ۱۳۹۴. تحلیل حساسیت مدل SALTMED به پارامترهای ورودی در شرایط تنش شوری. دومین همایش ملی تغییرات اقلیم و توسعه پایدار کشاورزی، تهران، شهریور ماه.

۲- شهیدی، ع. ۱۳۸۷. اثر برهم کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب- شوری در منطقه بیرجند. پایان نامه دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- محمدی، الف.، حسن‌لی، م . و م. م. قره داغی۱۳۹۳. ارزیابی رطوبت و شوری خاک با استفاده از مدلSALTMED در شرایط اقلیمی سیستان. نخستین کنگره مهندسی و مدیریت آب و خاک ایران/ دومین کنفرانس ملی مدیریت آب و خاک کشاورزی، کرج، اسفند ماه.

4- Aly, A. A., Al-Omran, A. M. and A. Khasha. 2015. Water management for cucumber: Greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model. Soil and Water Conservation Journal, 70(11): 1-11.

5- Hani, M., El-Noemani, A. S. and S. K. Pepars. 2014. Validation of SALTMED model under different conditions of drought and N fertilizer for Snap Bean. P 3-15, In: M. Hani, A S. El-Noemni Journal, and S K. Pepars, ATINER's Conference Paper Series WAT: 2014-1160, Summer, Athens.

6- Henggeler, J. C. 2004. The conjuctive use of saline irrigation water on deficit irrigation. Ph.D. Dissertation, Texas University.

7- Hirich, A., Choukr Allah, R., Ragab, R. Jacobsen, E., El Youssfi, L. and H. El-Omari. 2011. The SALTMED model calibration and validation using field data from morocco. Materials Environmental Science Journal, 3(2): 342-359.

8- Kaya, C. I., Yazar, A. and S. Metin Sezen. 2015. SALTMED model performance on simulation of soil moisture and crop yield for Quinoa irrigated using different irrigation systems, irrigation strategies and water qualities in Turkey. Agriculture and Agricultural Science Journal, 4: 108-118.

9- Pulvento, C., Riccard, M., Lavini, A., Dandria, R. and R. Ragab. 2013. Saltmeed 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(2): 229-238.

10- Ragab, R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model. Environmental Modelling and Software Journal, 17: 345–361.

11- Ragab, R. 2013. User's guide for SALTMED 2013 model. Centre for Ecology and Hydrology, Natural Environment Research Council.

12- Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arslan, A. and A. Ghaibeh. 2005. 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 Journal, 78: 89-107.

13- Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arslan, A. and A. Ghaibeh. 2005. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 1. The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria. Agricultural Water Management Journal, 78: 67-88.

14- Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A. and R. Ragab. 2013. SALTMED 2013 model application using greenhouse experiment data from Turkey. P. 144-149, International Conference on: Sustainable Water Use for Securing Food Production in the Mediterranean Region under Changing Climate, March, Agadir, Morocco.

15- Ranjbar, G. H., Ghadiria, H., Razzaghib, F., Sepaskhahb, A. R. and M. Edalata. 2015. Evaluation of the SALTMED model for sorghum under saline conditions in an arid region. Plant Production Journal, 9(3): 373- 392.

16- Silva, L. L., Ragab, R., Duarte, I. and E. Lourenceo. 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.

17- Yazar, A. and C. Incekaya. 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, 6(3):38-51.