

## ارزیابی مزرعه‌ای مدل SALTMED در شبیه‌سازی توزیع و دینامیک آب و نمک خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باغ پسته

اکرم سیفی<sup>1\*</sup>، سید مجید میرلطیفی<sup>2</sup>، حسین دهقانی سانجی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1394/7/8 تاریخ پذیرش: 1395/8/9

### چکیده

در دهه‌های اخیر، پیش‌بینی تغییرات رطوبت خاک و شوری آن به منظور مدیریت آبیاری در اراضی تحت کشت و در مناطق با محدودیت‌های روزافزون در دستیابی به منابع آب، امری ضروری می‌باشد. مدل SALTMED 2013 یکی از محدود مدل‌های گیاهی در دسترس است که با در نظر گرفتن سامانه‌های مختلف آبیاری، انواع خاک و لایه‌بندی آن و انواع گیاهان رویکرد جامعی نسبت به مدیریت آب، خاک و محصول در مزرعه دارد. مبنای فیزیکی این مدل بر اساس معادلات انتقال آب و املاح، تبخیر-تعرق و جذب آب است. در این تحقیق از مدل SALTMED 2013 برای واسنجی و اعتباریابی دینامیک و نیم‌رخ‌های رطوبتی و شوری در خاک سیلت لومی باغ پسته واقع در اقلیم خشک و بیابانی استان کرمان (شهرستان سیرجان) استفاده شد. درختان پسته با سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) آبیاری شدند و شوری آب آبیاری 2/5 دسی‌سیمنز بر متر بود. آبیاری هر سه روز یکبار و بر اساس اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک با استفاده از TDR انجام شد. شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک در فواصل 10، 40، 60 و 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان و فواصل 20، 40، 60، 80 و 100 سانتی‌متری از سطح خاک انجام شد. طبق نتایج مدل قادر به پیش‌بینی روند مشاهده‌ای رطوبت در فواصل نزدیک به قطره‌چکان بود اما در فواصل دورتر، اندکی بیش‌برآورد صورت گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای بخش املاح، بیانگر کارایی مطلوب آن در پیش‌بینی توزیع دینامیکی و مکانی شوری در سیستم SDI است. بنابراین می‌توان از مدل SALTMED به عنوان ابزاری مفید برای مدیریت آب، خاک و گیاه استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، باغ پسته، مدل SALTMED، نیم‌رخ رطوبتی خاک، نیم‌رخ شوری خاک

### مقدمه

گیاه و کاهش راندمان آبیاری شود (فربانیان و همکاران، 1393). مدل‌ها می‌توانند ابزار بسیار مفیدی برای مدیریت آب آبیاری باشند. نه تنها به برنامه‌ریزی آبیاری و محاسبه نیاز آبی گیاه کمک می‌کنند بلکه می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی عملکرد و نمک‌زایی خاک استفاده کرد (Ragab et al., 2005). یکی از موارد بسیار مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت سامانه SDI، بررسی الگوی حرکت آب در خاک است. الگوی خیس‌شدگی خاک را می‌توان به‌طور مستقیم در مزرعه اندازه‌گیری و یا از طریق مدل‌ها، شبیه‌سازی کرد (Elmaloglou and Diamantopoulos., 2009). دقت برآورد رطوبت خاک به مورد کاربرد و مقیاس مکانی بستگی دارد. برای مثال، کنترل و بررسی تغییرات مکانی مقدار رطوبت در خاک برای آبیاری دقیق به منظور کشاورزی مهم است و به ویژه در مناطقی که گیاهان با ارزش مانند پسته کشت می‌شود، بر درجه اهمیت آن افزوده می‌شود (Lunt et al., 2005). سیواکومار و گلینی بیان کردند که چندین مدل رشد گیاهی وجود دارد اما اکثر آن‌ها برای یک نوع گیاه و یا برای کاربردهای خاصی توسعه داده شده‌اند و قابلیت کاربرد در بیش‌تر شرایط یا برای تصمیمات مزرعه‌ای را ندارند (Sivakumar and

سامانه‌های آبیاری تحت فشار و بخصوص آبیاری قطره‌ای از جمله گزینه‌های برتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک دچار کمبود آب هستند (فروغی و قائمی، 1384). آبیاری قطره‌ای زیرسطحی<sup>4</sup> (SDI) یکی از روش‌های آبیاری پیشرفته است که لوله‌های مدفون شده زیر سطح خاک، حجم کمی آب را اطراف قطره‌چکان تخلیه می‌کنند (Badr and Abuarab., 2013). در این سامانه‌ها، تعیین جبهه رطوبتی از اهمیت ویژه‌ای برای مدیریت آبیاری و پیش‌بینی دقیق حجم خاک مرطوب شده اطراف ریشه گیاه برخوردار است. زیرا آبیاری بیش از اندازه می‌تواند منجر به خارج شدن آب و املاح از ناحیه ریشه

1- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران  
2- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
3- دانشیار پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
\* - نویسنده مسئول (Email: a.seifi@vru.ac.ir)  
4- Subsurface Drip Irrigation

آبیاری، استراتژی‌های آبیاری، کیفیت‌های مختلف آب آبیاری، انواع گیاهان و انواع خاک، کودآبیاری، کاربرد کود ازت، اثر تنش‌های شوری، دما، خشکسالی، وجود آب زیرزمینی کم عمق و سامانه زهکشی استفاده کرد. نسخه در دسترس این مدل امکان شبیه‌سازی هم‌زمان 20 مزرعه با سامانه‌ها و استراتژی‌های مختلف آبیاری، انواع مختلف گیاه، خاک و غیره را فراهم می‌آورد. مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد گیاهی، نیم‌رخ‌های شوری و رطوبت خاک، آبشویی نیترات، دمای خاک، جذب آب، تبخیر-تعرق، سطح آب زیرزمینی، شوری آن و همچنین جریان زهکشی است.

مدل SALTMED اولین بار توسط رجب (Ragab., 2002) توسعه داده شد و از آن برای اجرای 5 مثال با استفاده از داده‌های فصل رشد موجود در منابع مختلف استفاده کرد. نتایج به طور موفقیت‌آمیزی بیانگر تاثیر سامانه آبیاری، نوع خاک، مقادیر شوری آب آبیاری روی رطوبت خاک و توزیع شوری، نیاز آبشویی و عملکرد گیاه در همه موارد بود. سپس رجب (Ragab., 2005) با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای جمع‌آوری شده از مصر و سوریه بین سال‌های 2000 تا 2002 به اعتباریابی مدل SALTMED پرداختند. در سال 2009 نسخه پیشرفته‌تری از مدل انتشار یافت که توسط محققانی از جمله هیرچ و همکاران (Hirich et al., 2012) برای سه گیاه کینوا، نخود و ذرت شیرین تحت تیمارهای کم آبیاری در مراکش، پولونتو و همکاران (Pulevento et al., 2013) برای گیاه کینوا و تیمارهای مختلف آبیاری با آب‌های شور و شیرین در جنوب ایتالیا، موننگرو و همکاران (Montenegro et al., 2010) و سیلوا و همکاران (Silva et al., 2013) برای گیاه نخود تحت تیمارهای مختلف آبیاری از حالت دیم تا تامین 100 درصد نیاز آبی در سال خشک و سال تر اعتباریابی و صحت‌سنجی شد.

مدل SALTMED در شرایط آب‌وهوایی ایران و برای مدیریت آبیاری درختان کم‌تر مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. از این رو هدف از این تحقیق، ارزیابی قابلیت این مدل در پیش‌بینی نیم‌رخ‌های رطوبتی و شوری در شرایط آب‌وهوایی بیابانی و استفاده از آب و خاک شور برای آبیاری درختان پسته تحت سامانه SDI است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات مزرعه و سامانه

آزمایش‌ها در سال 1392 در باغ پسته خصوصی واقع در شهرستان سیرجان، استان کرمان به مساحت تقریبی یک هکتار انجام شد. این باغ در طول جغرافیایی  $55^{\circ}82'$  و عرض جغرافیایی  $29^{\circ}30'$  و ارتفاع 1714 متر بالاتر از سطح دریا واقع است (شکل 1). خاک مزرعه در اعماق مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج دانه‌بندی و چگالی ظاهری آن در جدول 1 آورده شده است. بر اساس نتایج دانه-

(Glinni., 2002). به عنوان مثال، مدل‌های نفوذ (Ragab et al., 1983; Armstrong and Wilson., 1984)، مدل‌های جذب آب توسط ریشه (Cardon and Letey., 1992; Coelho and Or., 1996)، مدل‌های آبشویی یا انتقال آب و املاح (Kamra et al., 1996)، یا مدل‌های مورد استفاده برای کاربرد خاص مانند سامانه آبیاری، خاک، منطقه یا گیاه خاص (Simunek and Suarez., 1994; Simunek et al., 1998) تک بعدی هستند. بنابراین پژوهشگران ترجیح می‌دهند از مدل‌هایی استفاده کنند که قابلیت کاربرد برای مدیریت‌های آب، گیاه و خاک (Ragab et al., 2005a) را داشته و دربرگیرنده انواع مختلف گیاهان باشد (Silva et al., 2013). در حال حاضر، مدل‌های زیادی که بتوان از آن‌ها برای انواع مختلف سامانه‌های آبیاری، انواع خاک، انواع گیاه و مدیریت‌های آب استفاده کرد، وجود ندارد اما می‌توان از بین آنها به مدل‌های HYDRUS 2D/3D، SALTMED، SWAT اشاره کرد. مدل عددی HYDRUS-2D مدلی جامع به منظور بررسی حرکت آب، املاح و گرما در داخل خاک است که برای شرایط مختلف خاک و آب ورودی به داخل خاک، توانایی شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک را دارد (Kandelous and Simunek., 2010) اما دسترسی رایگان به این مدل وجود ندارد.

پسته (*Pistaciavera L.*) گیاهی نیمه‌گرمسیری از خانواده Anacardiaceae و جنس Pistacia است که از دیرباز در نقاط مختلف ایران کشت می‌شده است (ابریشمی، 1373). با توجه به قیمت جذاب پسته، ثبات بازار و سازگاری بسیار خوب درخت پسته با قسمت وسیعی از مناطق کشاورزی ایران و صرفه اقتصادی قابل توجه از نظر مصرف آب، باغداری پسته نسبت به سایر محصولات مرسوم در کشاورزی ایران از علاقمندی بیش‌تری برخوردار است (زارع نظری، 1392). شرایط منابع آب و خاک در استان کرمان متفاوت از دیگر نقاط جهان برای تولید پسته است. منابع آب و خاک در استان کرمان عموماً از کیفیت مطلوبی برخوردار نبوده و یکی از مشکلات عمده اراضی تحت کشت پسته، شوری خاک و آب آبیاری، بارندگی کم و پتانسیل تبخیر زیاد است. بنابراین استفاده از مدل‌های ساده‌ای که به مدیریت تخصصی و آگاهانه عملیات کشاورزی این محصول کمک کند، ضروری به نظر می‌رسد. با کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان بسیاری از محاسبات پیچیده‌ی مربوط به حرکت آب و املاح و گرما در خاک و طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی را به سرعت انجام داده و تاثیر هر پارامتر را به راحتی ارزیابی نمود.

مدل SALTMED (Ragab., 2002; Ragab et al., 2005a,b) یکی از محدود مدل‌های در دسترس است که برای اهداف عمومی توسعه داده شده است و توانایی آن در شبیه‌سازی انواع مختلف گیاهان و نواحی کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است. از این مدل می‌توان برای محاسبات مربوط به سامانه‌های مختلف

بیانگر میانگین رطوبت هر حجم کنترل نشان داده شده در شکل 2 است. با توجه به فاصله خطوط لوله فرعی از ردیف درختان (فاصله 110 سانتی متری)، لوله‌های دسترسی TDR به ترتیب در فاصله 60، 10، 40 و 90 سانتی متری از محل قطره‌چکان قرار گرفتند. در مجموع با توجه به اینکه در درختان بارور پسته، بیشترین تراکم ریشه‌های فعال در عمق 30 تا 100 سانتی متری است (صدقاتی و همکاران، 1391) و همچنین با بررسی تغییرات رطوبت در لایه‌های مختلف در طی زمان، در این تحقیق متوسط عمق توسعه ریشه درخت پسته 95 سانتی متر در نظر گرفته شد. نمونه‌های خاک به منظور اندازه‌گیری شوری از اعماق 0-20، 20-40، 40-60، 60-80 و 80-100 سانتی-متری تهیه شدند و برای تهیه عصاره اشباع به آزمایشگاه منتقل گردیدند.

### مدل SALT MED

این مدل، به خوبی از معادلات انتقال املاح، تبخیر-تعرق و جذب آب توسط گیاه بهره جسته است. در ادامه به بررسی معادلات و ساختار مدل SALT MED پرداخته می‌شود. مدل SALT MED از وبسایت <http://www.swup-med.dk/SALTMED.aspx> قابل دانلود می‌باشد.

### تبخیر-تعرق

تبخیر-تعرق با استفاده از معادله پنمن-مانتیت<sup>1</sup> و بر اساس معادلات ارائه شده در (FAO-56 (1998) محاسبه می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2)$$

که  $ET_0$  تبخیر-تعرق مرجع  $(mm/day)$ ،  $R_n$  تابش خالص  $(MJ/m^2/day)$ ،  $T$  مقدار میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع 2 متری  $(^{\circ}C)$ ،  $G$  فلاکس گرمای خاک  $(MJ/m^2/day)$ ،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع  $(kPa/^{\circ}C)$ ،  $\gamma$  ثابت سایپرومتتری  $(66 Pa/^{\circ}C)$ ،  $e_s$  فشار بخار اشباع در دمای هوا  $(kPa)$ ،  $e_a$  فشار بخار هوا  $(kPa)$  و  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع 2 متری  $(m/s)$  است.  $ET_0$  برای چمن سبزی که خوب آبیاری شده و ارتفاعش کوتاه باشد، به کار می‌رود. تبخیر-تعرق گیاهی  $(ET_c)$  به صورت زیر (رابطه 3) محاسبه می‌شود:

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_e) \quad (3)$$

که  $K_{cb}$  ضریب تعرق گیاهی (معروف به ضریب گیاهی دوگانه) و  $K_e$  ضریب تبخیر خاک است. مقدار  $K_e$  بر اساس (FAO-56 (1998) در مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد به ترتیب به مقدار 0/6، 1/2 و

بندی، خاک مزرعه مورد تحقیق دارای بافت سیلت لوم بود. هدایت الکتریکی آب آبیاری، 2/5 دسی‌سیمنز بر متر بود. آبیاری هر سه روز یکبار بر مبنای اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک و رساندن رطوبت به حد ظرفیت زراعی انجام شد. آب آبیاری توسط سامانه SDI برای تیمارهای مورد نظر تامین شد و قطره‌چکان‌ها از نوع تنظیم کننده فشار بودند. قطر لوله‌های آبد 16 میلی‌متر بود و در دو طرف درختان قرار داشتند.

### جدول 1- نتایج تجزیه فیزیکی خاک

عمق (cm)	درصد ذرات تشکیل دهنده			وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
	سیلت	رس	شن	
0-20	50	6	45	1/24
20-40	52	6	42	1/24
40-60	62	6	32	1/24
60-80	51	6	43	1/42
80-100	51	6	43	1/54

دبی قطره‌چکان‌ها 2 لیتر در ساعت و فواصل آن‌ها روی لوله‌های آبد، 80 سانتی‌متر بود. لوله‌های آبد در عمق 40 سانتی‌متری و در فاصله 110 سانتی‌متری از درخت قرار داده شد. در طول مدت آبیاری فشار هیدرولیکی در ابتدای لوله آبد تا 2 kPa تنظیم شد. از یک کنترلر برای تنظیم مقدار آب آبیاری استفاده شد. رقم درختان پسته، احمد آقایی و سن آن‌ها، 15 سال بود. آبیاری بر اساس اندازه‌گیری رطوبت خاک و به منظور رساندن رطوبت تا حد ظرفیت زراعی انجام شد (رابطه 1). برای ارزیابی تغییر مقدار رطوبت خاک در عمق موثر ریشه، رطوبت حجمی با استفاده از دستگاه TDR-TRIME اندازه‌گیری شد (شکل 2).

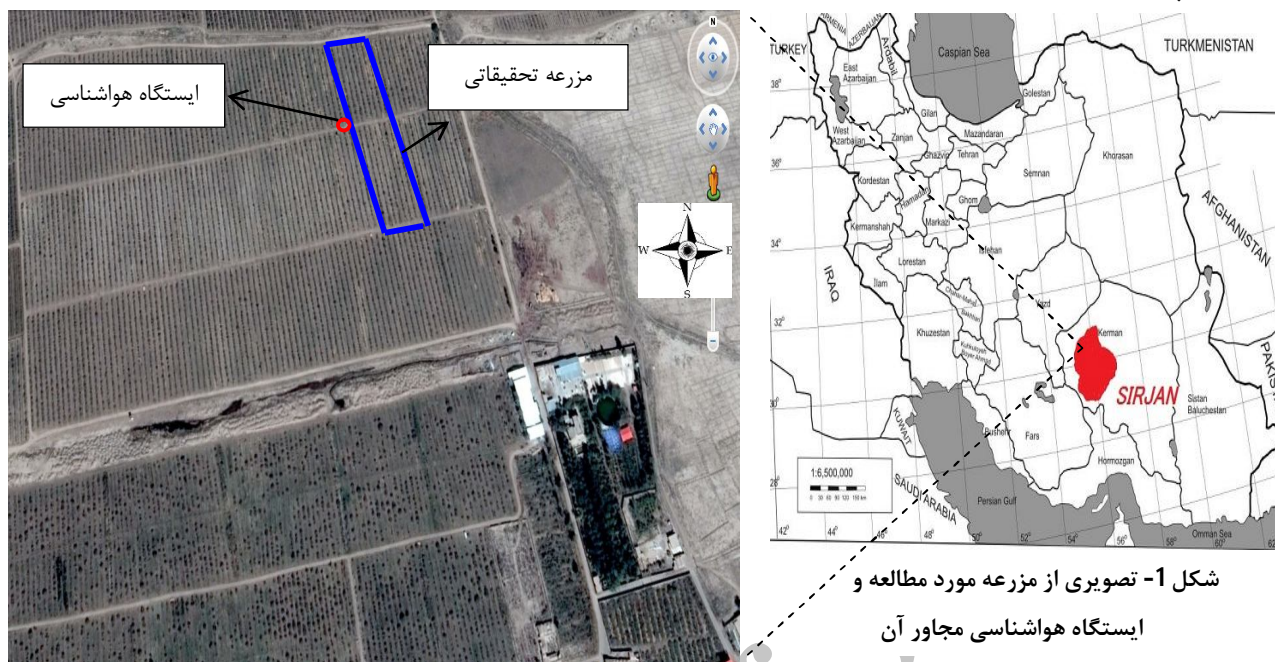
$$I_n = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m (W_{Fci} - W_{Bli}) \times D_i \right) \quad (1)$$

که در آن  $I_n$  عمق خالص آبیاری بر حسب میلی‌متر،  $W_{FC}$  رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی بر حسب درصد،  $D_i$  عمق ناحیه ریشه  $(mm)$ ،  $m$  تعداد لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه،  $i$  شمارش گر تعداد لایه،  $z$  شمارش گر نقاط اندازه‌گیری اطراف درخت،  $n$  تعداد نقاط اندازه‌گیری اطراف درخت و رطوبت حجمی خاک پیش از آبیاری بر حسب درصد می‌باشد. ظرفیت زراعی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین گردید.

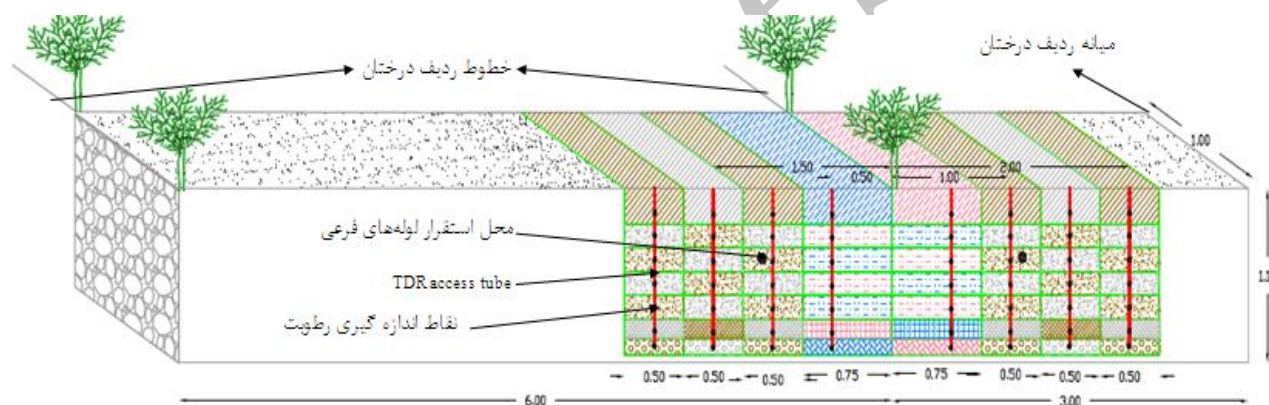
اندازه‌گیری رطوبت خاک در عمق‌های 15، 30، 45، 60، 75، 90 و 100 سانتی‌متری و در فواصل 50، 100، 150 و 200 سانتی‌متری از ردیف درختان در دو طرف درخت، قبل و 24 ساعت بعد از آبیاری انجام شد.

در این تحقیق فرض شد که رطوبت اندازه‌گیری شده در هر نقطه

1- Penman-Monteith



شکل 1- تصویری از مزرعه مورد مطالعه و ایستگاه هواشناسی مجاور آن



حجم (cm <sup>3</sup> )	عمق (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	ناحیه	حجم (cm <sup>3</sup> )	عمق (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	ناحیه
۱۱۲۵۰۰	۲۲/۵	۵۰	۱۰۰		۱۶۸۷۵۰	۲۲/۵	۷۵	۱۰۰	
۷۵۰۰۰	۱۵	۵۰	۱۰۰		۱۱۲۵۰۰	۱۵	۷۵	۱۰۰	
۶۲۵۰۰	۱۲/۵	۵۰	۱۰۰		۹۳۷۵۰	۱۲/۵	۷۵	۱۰۰	
۵۰۰۰۰	۱۰	۵۰	۱۰۰		۷۵۰۰۰	۱۰	۷۵	۱۰۰	

شکل 2- شبکه‌بندی نیم‌رخ خاک به منظور محاسبه عمق آبیاری و موقعیت نمونه‌برداری خاک و الگوی استقرار درخت‌ها و سامانه SDI.

$$S(z, t) = \left[ \frac{S_{\max}(z)}{1 + \left( \frac{z(t)}{\pi z_0} \right)^2} \right] \lambda(z, t) \quad (4)$$

که

جذب آب توسط گیاه در شرایط استفاده از آب شور معادله مورد استفاده برای محاسبه مقدار واقعی جذب آب در مدل SALTMED توسط کاردن و لتی (Cardon and Letey., 1992) پیشنهاد شده است. در این روش، جذب آب به صورت رابطه 4 محاسبه می‌شود:

$$\theta(h) = \theta_r + \left[ \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \right] \quad (8)$$

$$K(h) = K_s K_r(h) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (9)$$

که  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب مقادیر رطوبت باقی مانده و رطوبت اشباع،  $K_s$  و  $K_r$  به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و باقی مانده،  $\alpha$  و  $n$  ضرایب شکل،  $m = 1 - \frac{1}{n}$  و  $S_e$  اشباع موثر هستند.  $\alpha$  و  $n$  ضرائب تجربی هستند.

پتانسیل آب خاک و هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از اشباع موثر بر اساس معادله ون دام و همکاران (van Dam., 1994) نوشته می شود (رابطه 10، 11 و 12):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

$$h(S_e) = \frac{\left[ (S_e^{1/m} - 1)^{1/n} \right]}{\alpha} \quad (11)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (12)$$

مقادیر  $\theta_s$ ،  $\theta_r$ ،  $K_s$ ، مقدار آب در ظرفیت مزرعه ای و نقطه پژمردگی،  $n$  و  $m$  ( $m = \lambda + 1$ ) و  $\lambda$  شاخص توزیع اندازه

خلل و فرج) بر اساس توابع انتقالی محاسبه می شوند. این مقادیر و مقادیر دیگر به دست آمده از منابع مختلف در پایگاه داده مدل وجود دارند و در صورت عدم اندازه گیری، می توان از این مقادیر به صورت پیش فرض استفاده کرد. همچنین مدل می تواند از مقادیر پتانسیل آب خاک-رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی-رطوبت خاک استفاده کند (Ragab., 2002).

#### داده های مورد نیاز مدل

داده های گیاهی مورد نیاز در هر مرحله رشد شامل ضریب گیاهی ( $K_{cb}$  و  $K_c$ )، عمق و عرض ریشه، ارتفاع گیاه و حداکثر پتانسیل عملکرد مشاهداتی در منطقه در شرایط بهینه است. عمق هر افق خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع، ضریب پخش نمک، ضریب انتشار طولی و عرضی، رطوبت اولیه خاک، نیم-رخ های شوری و داده های جفتی رطوبت خاک در برابر پتانسیل آب خاک و رطوبت خاک در برابر هدایت هیدرولیکی نیز از جمله داده های مورد نیاز مرتبط با خاک است. داده های هواشناسی مورد نیاز شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، تابش خالص، سرعت باد و بارندگی روزانه می باشد. همچنین داده های مدیریت آب شامل تاریخ و مقادیر آب آبیاری کاربردی و سطح شوری در هر آبیاری نیز از ورودی های مورد نیاز مدل برای شبیه سازی است. ضرایب مدل شامل تعداد مقاطع در جهات افقی و عمودی، حداکثر گام زمانی محاسباتی نیز باید مشخص شوند

$$\lambda(z) = \frac{5}{3} L \quad \text{for } z \leq 0.2L \quad (14)$$

$$\lambda(z) = \frac{25}{12} L \times \left(1 - \frac{z}{L}\right) \quad \text{for } 0.2L < z \leq L \quad (14b)$$

$$\lambda(z) = 0.0 \quad \text{for } z > L \quad (14c)$$

که  $S_{max}(t)$  حداکثر مقدار جذب آب توسط ریشه نسبت به زمان  $t$ ،  $z$  عمق عمودی در جهت مثبت،  $\lambda(z,t)$  جرم کل ریشه به صورت تابعی از عمق و زمان،  $L$  حداکثر عمق ریشه دوانی،  $h$  بار فشار ماتریک،  $\pi$  بار فشار اسمزی،  $\pi_{50}(t)$  مقدار فشار اسمزی به صورت تابعی از زمان هنگامی که  $S_{max}(t)$  تا 50 درصد کاهش داده می شود و  $a(t)$  ضریب وزنی مربوط به پاسخ گیاه به فشارهای ماتریک متفاوت است. ضریب  $a(t)$  برابر با  $\frac{\pi_{50}(t)}{h_{50}(t)}$  است و  $h_{50}(t)$  مقدار فشار ماتریک به صورت تابعی از زمان است هنگامی که  $S_{max}(t)$  تا 50 درصد کاهش داده می شود.  $S_{max}(t)$  به صورت رابطه 5 محاسبه می شود:

$$S_{max}(t) = ET_0(t) \times K_{rb}(t) \quad (5)$$

#### جریان آب و املاح

جریان آب در خاک را می توان به صورت ریاضی با معادله ریچارد توصیف کرد. معادله ریچارد، معادله ای دیفرانسیل غیر خطی جزئی نسبت به زمان و مکان است. جریان انتقالی عمودی و افقی آب در قسمت پایدار و یکنواخت ناحیه ریشه را می توان بر مبنای معادله ریچارد و به صورت رابطه 6 بیان کرد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + K(\theta) \right] - S_w \quad (6)$$

که  $\theta$  رطوبت حجمی،  $t$  زمان،  $z$  عمق،  $x$  فاصله از منبع،  $K(\theta)$  هدایت هیدرولیکی (تابعی از رطوبت)،  $h$  پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (cm) و  $S_w$  ترم تخلیه و استخراج آب توسط ریشه گیاه می باشد.

همچنین با در نظر گرفتن ضریب انتشار (D) و جریان دوبعدی آب در خاک، معادله جریان نمک به صورت رابطه 7 خواهد بود:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_x C \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} + D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - q_z C \right) \quad (7)$$

معادلات جریان آب و املاح به طور عددی و با استفاده از روش اختلاف محدود حل می شوند (Ragab., 2002, Ragab., 2013).

#### خصوصیات هیدرولیکی خاک

حل معادلات انتقال آب و املاح نیاز به دو رابطه آب خاک شامل رابطه پتانسیل آب-رطوبت خاک و رابطه هدایت هیدرولیکی-پتانسیل آب خاک دارد. این روابط بر اساس معادلات پیشنهادی توسط (Van Genuchten., 1980) بیان می شوند (رابطه 8 و 9):

است. بنابراین مقادیر اولیه ضریب انتشار طولی و عرضی بر اساس طول نیم‌رخ خاک انتخاب گردید و سپس با استفاده از این ضرایب انتشار متعدد و شوری اولیه خاک، نیم‌رخ شوری و اسنجی شد. بدین ترتیب مقادیر و اسنجی ضریب انتشار طولی برابر با 9 سانتی‌متر و ضریب انتشار عرضی برابر با 0/9 انتخاب گردید. ضریب پخشیدگی برابر با 0/2 سانتی‌متر مربع بر روز لحاظ شد.

اعتباریابی مدل با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رطوبت و شوری در مزرعه انجام شد. عملکرد مدل بر مبنای روش‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت و شوری در مقابل زمان ترسیم شدند. در روش آماری، از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا<sup>2</sup> (RMSE)، ضریب تعیین<sup>3</sup> (R<sup>2</sup>) و ضریب جرم باقیمانده<sup>4</sup> (CRM) استفاده شد. مقادیر RMSE نشان دهنده درجه بیش‌برآورد یا کم-برآورد شبیه‌سازی‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - S_i)^2}{N}} \quad (13)$$

که S<sub>i</sub> مقدار پیش‌بینی، O<sub>i</sub> مقدار مشاهداتی و N تعداد کل مشاهدات است.

آماره R<sup>2</sup> بیانگر نسبت بین مقادیر شبیه‌سازی شده به متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})(S_i - S_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_{avg})^2} \quad (14)$$

که O<sub>avg</sub> متوسط مقادیر مشاهداتی و S<sub>avg</sub> متوسط مقادیر شبیه‌سازی هستند.

ضریب جرم باقیمانده (CRM) (Loague and Green., 1991) نیز به صورت معادله 15 بیان می‌شود. این ضریب بیانگر تمایل مدل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد است. مقادیر بیش‌تر از صفر و کم‌تر از صفر CRM نشان می‌دهند که مدل، مقادیر اندازه‌گیری را به ترتیب کم برآورد و بیش‌برآورد می‌کند.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (15)$$

## نتایج و بحث

### واسنجی نیم‌رخ رطوبتی

در جدول 2 مقادیر آبیاری در مراحل مختلف رشد درخت پسته آورده شده است. شرط اولیه توزیع آب در خاک، مقدار رطوبت موجود در خاک قبل از اعمال آبیاری در لایه‌های مختلف بود. شرط مرزی

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این تحقیق از داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه هواشناسی موجود در مزرعه استفاده شد. فایل آبیاری شامل بده آبیاری، مدت زمان آبیاری و شوری آب آبیاری به صورت روزانه بود. پارامترهای گیاهی مانند ارتفاع گیاه، مدت زمان هر مرحله رشد، درجه روز رشد از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در طول دوره مورد بررسی وارد مدل شدند. ضریب گیاهی هر مرحله رشد (K<sub>c</sub>) از اندازه‌گیری‌های مزرعه-ای رطوبت و استفاده از معادله بیلان آب خاک به مدل داده شد. برای محاسبه ضریب گیاهی دوگانه (K<sub>cb</sub>) و پوشش نسبی<sup>1</sup> (F<sub>c</sub>) از معادلات FAO-56 استفاده شد. پارامتر F<sub>c</sub> بیانگر بخش موثری از سطح خاک است که تحت پوشش گیاه قرار می‌گیرد.

در مرحله اول برای واسنجی مدل از پارامترهای خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (K<sub>s</sub>)، رطوبت اشباع (θ<sub>s</sub>) و رطوبت باقی-مانده (θ<sub>r</sub>) استفاده شد. این پارامترها از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تعیین شدند و سپس با استفاده از مدل RETC بر اساس خصوصیات بافت خاک در هر لایه تعیین شدند. مقادیر K<sub>s</sub>، θ<sub>s</sub> و θ<sub>r</sub> حاصل از مدل RETC به عنوان مقادیر اولیه وارد مدل شدند. سپس با تغییر این مقادیر در مدل و مقایسه مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، بهترین مقادیر این ضرایب در مدل تعیین شدند. این مدل برای محاسبه ضرایب m و n معادله ون گنوختن از رابطه بین m و n با شاخص توزیع اندازه خلل و فرج (λ) استفاده می‌کند. این روابط به صورت n = A + 1 و m = A هستند. مقدار λ در منابع مختلف موجود است و بر اساس بافت خاک تغییر می‌کند.

رطوبت و شوری اولیه خاک از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای وارد مدل شدند. این مدل می‌تواند عمق نیم‌رخ شبیه‌سازی را به چهار لایه تقسیم کند و در هر لایه مشخصات هیدرولیکی و شرایط اولیه متفاوت وارد شوند. نوع شبکه‌بندی در این مدل به صورت مستطیلی است و با تعیین طول و عرض این مستطیل، شبکه مورد نظر به صورت خودکار طراحی می‌شود. در این تحقیق شبکه‌ای با سلول‌های 4×4 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. طول افقی شبکه نیم‌رخ خاک، 2 متر و عمق آن 1/1 متر انتخاب شد. بدین ترتیب 23 سلول در جهت افقی و 28 سلول در جهت عمودی شبکه تشکیل شد.

جهت واسنجی مدل برای نیم‌رخ شوری خاک از ضرایب انتشار طولی و عرضی در مدل استفاده شد. محققان متعددی (Cote et al., 2003; Phogat et al., 2012; Phogat et al., 2014) گزارش کردند که ضریب انتشار طولی به طور تقریبی برابر با 0/1 طول نیم-رخ خاک و ضریب انتشار عرضی برابر با 0/1 ضریب انتشار طولی

2- Root Mean Square Error

3- Coefficient of determination

4- Coefficient of residual mass

1- Fraction Cover

شود که در برخی از روزهای شبیه‌سازی، به طور متوسط رطوبت خاک بالای قطره‌چکان به مقدار ناچیزی (کمتر از 2 درصد) بیش-برآورد و رطوبت اعماق پایین‌تر از قطره‌چکان کم برآورد شد به طوری که مقادیر متوسط CRM بالا و زیر قطره‌چکان به ترتیب برابر با 0/015- و 0/019 محاسبه شد. نتایج خوب حاصل از مقایسه مقادیر محتوای آب خاک شبیه‌سازی شده در برابر مشاهداتی توسط مدل SALTMED 2013 نیز توسط (Silva et al., 2013) و (Hirich et al., 2012) گزارش شده است که مدل SALTMED را با استفاده از داده‌های رطوبت خاک در اعماق مختلف واسنجی کردند. اعتبارسنجی نیم‌رخ رطوبتی

پس از واسنجی مدل، اعتبارسنجی آن برای داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده قبل و 24 ساعت بعد از آبیاری به مدت یک ماه انجام شد. در اشکال 8 تغییرات رطوبت پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای به ترتیب در فواصل 10، 40 و 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان در متوسط وزنی عمق نیم‌رخ خاک آورده شده است. ملاحظه می‌شود که مدل قادر به پیش‌بینی روند مشاهده‌ای در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان بود اما در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان این روند به خوبی پیش‌بینی نشد و بیش‌برآورد صورت گرفته است.

جریان با بکارگیری حجم متغیر آب ورودی از طریق قطره‌چکان واقع در مرکز محدوده مدل تعریف گردید به طوری که در زمان‌های غیرآبیاری مقدار دبی قطره‌چکان صفر در نظر گرفته شد. شرایط مرزی زمانی متغیر نیز طبق برنامه اجرای آبیاری قطره‌ای، متناسب با دور آبیاری به مدل معرفی گردید.

اجرای مدل نیاز به شاخص‌های هیدرولیکی خاک مانند  $\theta_s$ ،  $\theta_r$ ،  $K_s$ ،  $\alpha$  و  $n$  دارد. در این تحقیق رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع به ترتیب برابر با 0/07 و 0/57 اندازه‌گیری شد و سایر مقادیر با استفاده از مدل RETC بدست آمدند. این مقادیر با استفاده از مدل واسنجی شدند. برای واسنجی مدل از داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف قبل، بلافاصله، 6، 12 و 24 ساعت بعد از آبیاری اول و قبل و 24 ساعت بعد از آبیاری دوم استفاده شد (شکل 3 تا 7). شاخص‌های هیدرولیکی مورد استفاده در مدل، در جدول 3 آورده شده است.

در اشکال 3 تا 7 منحنی تغییرات رطوبت در فواصل مختلف از قطره‌چکان و درخت در مرحله واسنجی ارائه شده است. این شکل‌ها بیانگر همبستگی بالای 90 درصد بین رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. به دلیل آن که مدل قادر به دریافت اطلاعات رطوبتی به صورت ساعتی نیست بنابراین به ناچار، مدل بر اساس داده‌های روزانه رطوبت واسنجی شد. از اشکال مذکور ملاحظه می‌

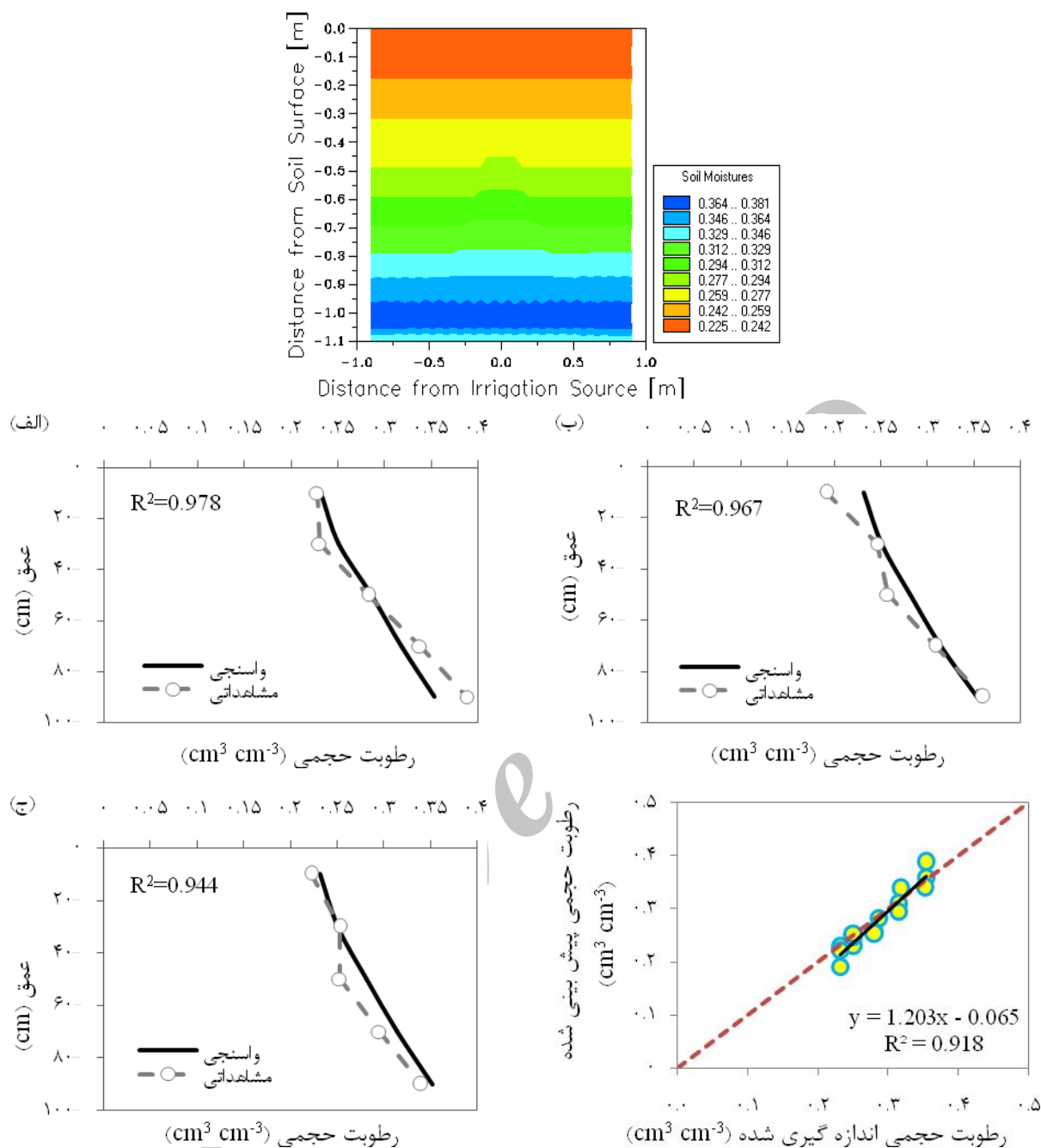
جدول 2- مقادیر آب آبیاری محاسبه شده

مرحله رشد	دوره وقوع	مقدار آبیاری (mm)	تعداد دفعات آبیاری
استخوانی شدن پوست	1 خرداد تا 15 خرداد	147	4
استخوانی شدن پوست	16 خرداد تا 31 خرداد	200/3	5
استخوانی شدن پوست	1 تیر تا 15 تیر	181/9	4
پر شدن دانه	16 تیر تا 31 تیر	180/4	4
پر شدن دانه	1 مرداد تا 15 مرداد	154/8	4
پر شدن/خندان شدن دانه	16 مرداد تا 31 مرداد	181/9	5
خندان شدن	1 شهریور تا 15 شهریور	149/3	4
ترکیدن پوست نازک بیرونی	16 شهریور تا 31 شهریور	133/3	4

جدول 3- مقادیر شاخص‌های هیدرولیکی در لایه‌های مختلف خاک بمنظور واسنجی نیم‌رخ رطوبتی

لایه خاک	$\theta_r$ ( $cm^3/cm^3$ )	$\theta_s$ ( $cm^3/cm^3$ )	$K_s$ (mm/day)	bd* (cm)
0-20	0/05	0/45	100	80
20-100	0/05	0/45	672	80
100-110	0/03	0/38	130	80

\*bubbling pressure



شکل 3- نتایج واسنجی مدل SALTMED، قبل از آبیاری اول، (الف) فاصله 10 سانتی متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان

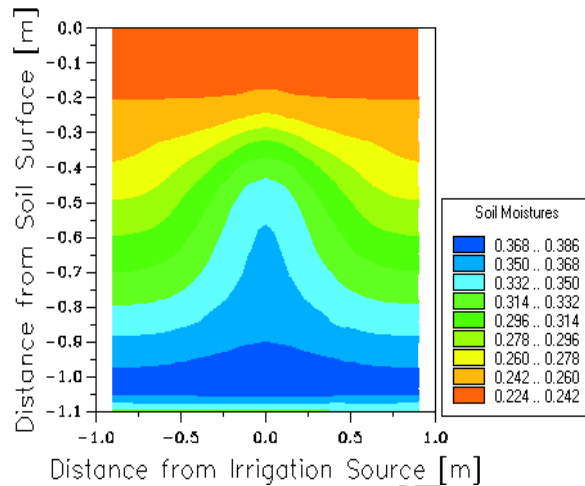
همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، مدل SALTMED نسبت به شرایط اولیه بسیار حساس است. مطابق با نتایج واسنجی، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده در لایه‌های سطحی خاک تا عمق 60 سانتی-متری در فواصل 10 و 40 سانتی متری از قطره‌چکان بیش برآورد و در سایر اعماق کم برآورد شد و در فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان نتایج برعکس است یعنی در لایه‌های سطحی کم برآورد و لایه‌های

در جدول 4 نیز خطای پیش‌بینی مدل SALTMED بر مبنای دو شاخص RMSE و CRM آورده شده است. در مرحله اعتبارسنجی مدل، بیشترین خطا در فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان اتفاق افتاده است به طوری که خطای حدود  $0/047 \text{ m}^3/\text{m}^3$  در عمق 80 سانتی متری نیمرخ خاک وجود داشت. این امر به دلیل لحاظ شرایط اولیه رطوبتی متناسب با فواصل نزدیک‌تر به قطره‌چکان است.

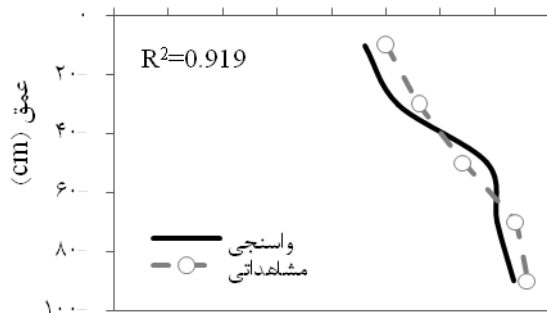


اکثر اعماق محاسبه گردید و ذکر شد که این تفاوت می‌تواند به دلیل ضخامت لایه‌های خاک باشد. زیرا ضخامت اولین لایه شبیه‌سازی 20 سانتی‌متر فرض شده بود در حالی که در مزرعه می‌تواند متغیر باشد و تا عمق 30 سانتی‌متری نیز برسد بنابراین انتظار می‌رود که در این نقاط مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی خیلی به هم نزدیک نباشند.

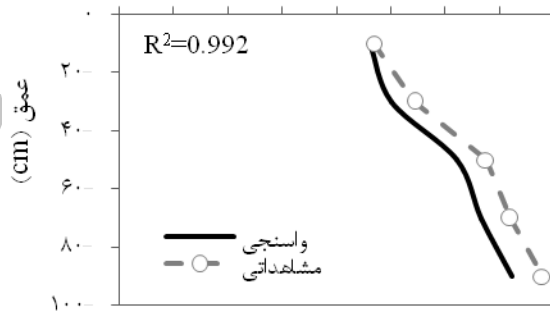
عمقی بیش برآورد صورت گرفت. در تحقیق (Pulvento et al., 2013) ضریب همبستگی برابر با 0/84 با شیب 0/87 بین داده‌های مشاهداتی و اعتبارسنجی شده دو ماه آبیاری مدل SALTMED تاییدی بر توانایی این مدل در شبیه‌سازی مقادیر رطوبت خاک لایه‌ای دانسته شد. در تحقیق (Silva et al., 2013) نیز در شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت سامانه قطره‌ای سطحی، ضریب تعیین 0/78 برای



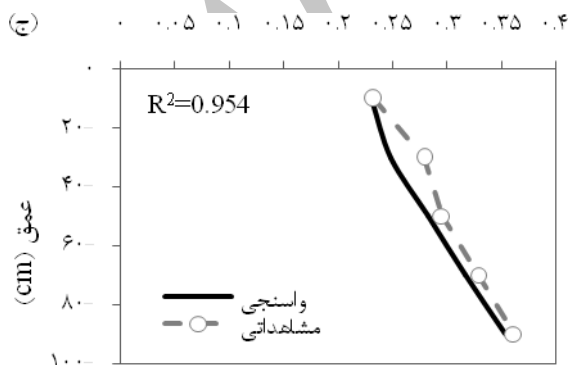
(الف) 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 (ب) 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4



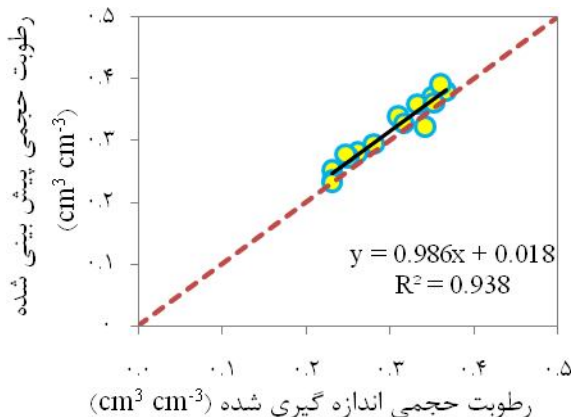
رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)



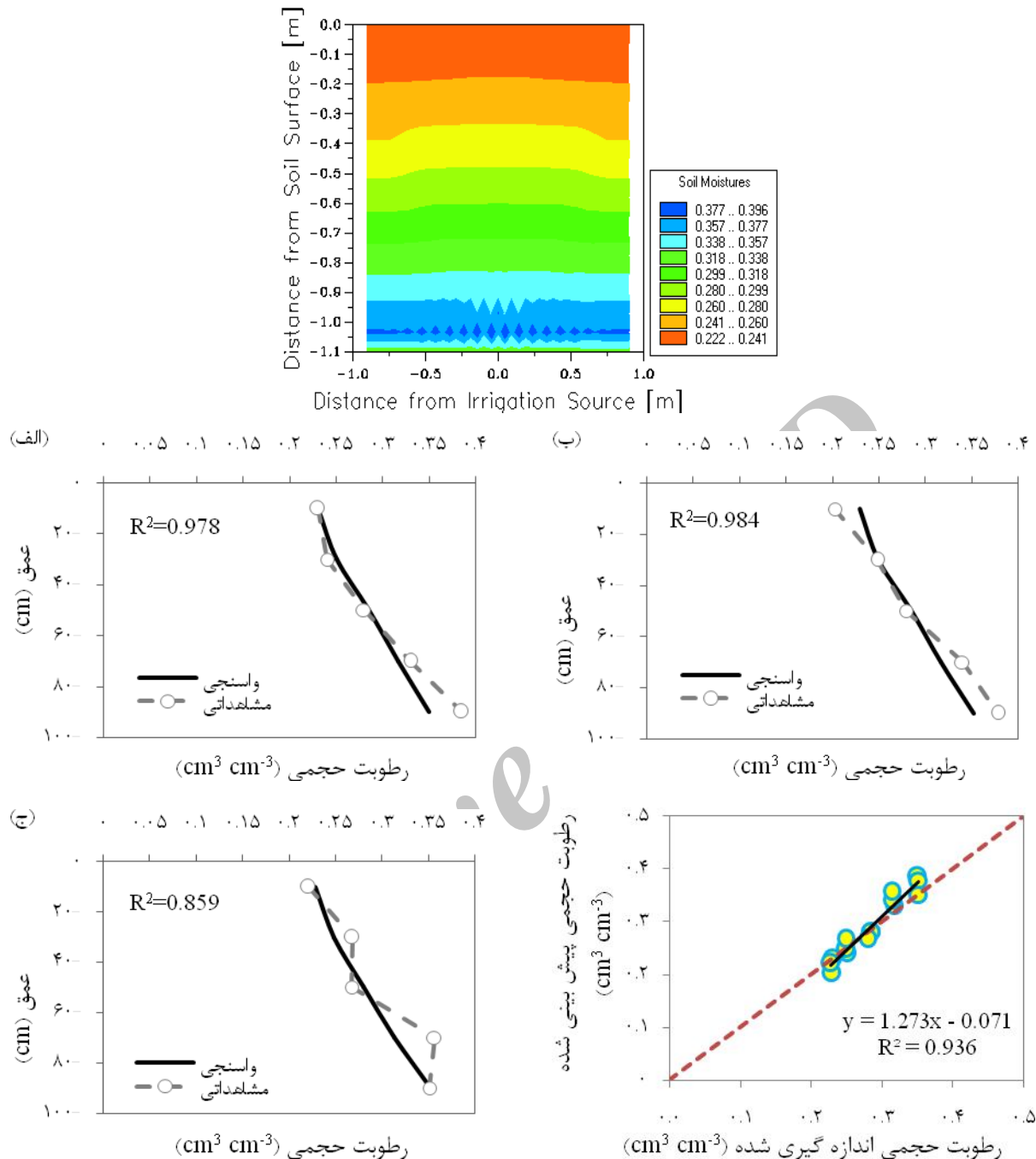
رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)



رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)



شکل 4- نتایج واسنجی مدل SALTMED، بلافاصله بعد از آبیاری اول، (الف) فاصله 10 سانتی متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان



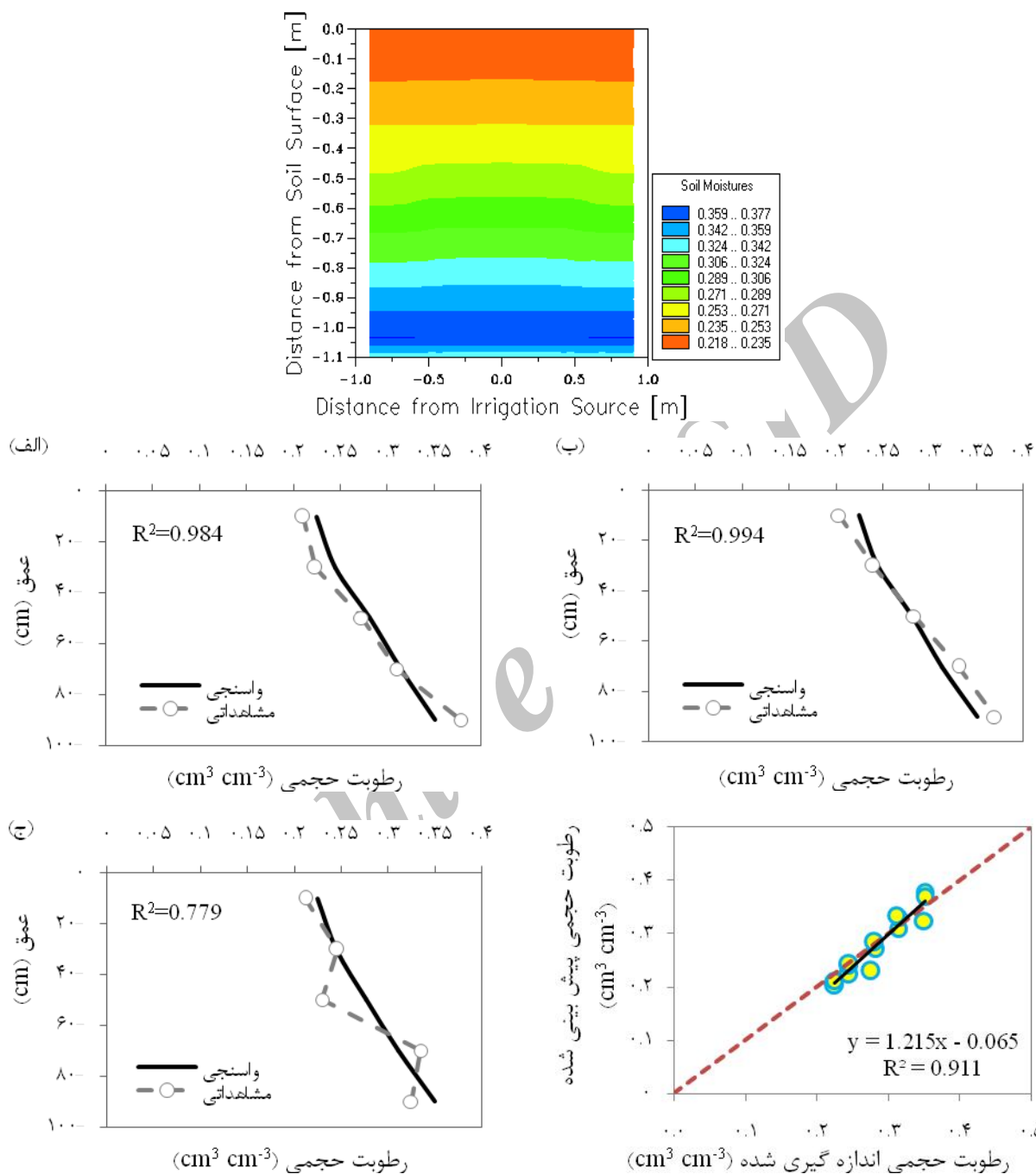
شکل 5- نتایج واسنجی مدل SALTMED، 24 ساعت بعد از آبیاری اول، (الف) فاصله 10 سانتی متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان

نتایج بیانگر وجود همبستگی خوب بین این مقادیر در فواصل 10 و 40 سانتی متری از قطره‌چکان می‌باشد اما در فاصله 90 سانتی متری ضریب همبستگی 0/5 بدست آمد. علت کاهش این ضریب در فاصله 90 سانتی متری لحاظ شرایط اولیه شوری متناسب با فواصل نزدیک‌تر به قطره‌چکان است. در جدول 5 مقادیر خطای پیش‌بینی شوری نیم-رخ خاک آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تا فاصله 40 سانتی-

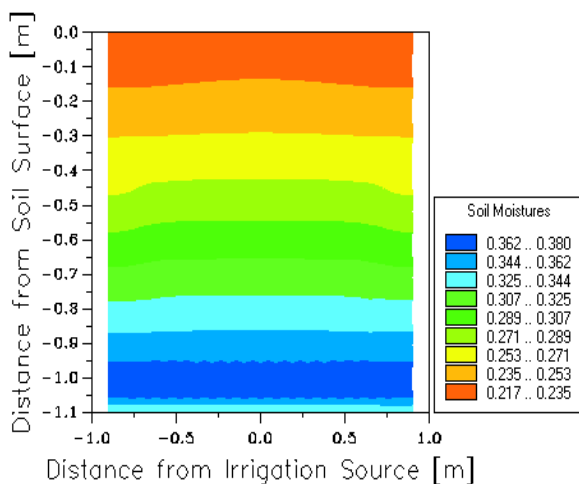
#### واسنجی و اعتبارسنجی نیم‌رخ شوری خاک

پس از واسنجی و اعتباریابی مدل در بخش جریان آب، به واسنجی و اعتباریابی مدل برای بخش اصلاح پرداخته شد. بدین منظور، ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی برای مدل واسنجی شدند. در شکل‌های 10 تا 13 شوری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو تاریخ نمونه‌گیری 92/3/23 و 92/4/9 بعد از آبیاری آورده شده است.

متری از قطره‌چکان خطای پیش‌بینی کمتر از 0/75 دسی‌سیمنز بر کاسته شد. متر بوده است اما با افزایش فاصله از قطره‌چکان از دقت پیش‌بینی‌ها

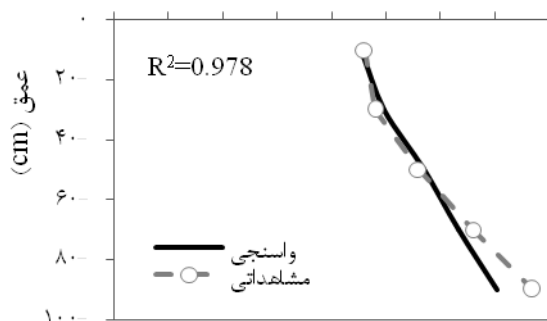


شکل 6- نتایج واسنجی مدل SALTMED، قبل از آبیاری دوم، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

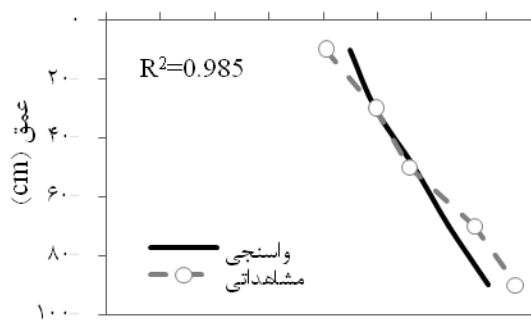


(الف) ۰ ۰.۰۵ ۰.۱ ۰.۱۵ ۰.۲ ۰.۲۵ ۰.۳ ۰.۳۵ ۰.۴

(ب) ۰ ۰.۰۵ ۰.۱ ۰.۱۵ ۰.۲ ۰.۲۵ ۰.۳ ۰.۳۵ ۰.۴

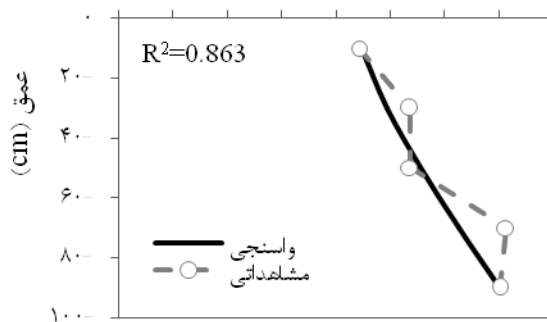


(الف) رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)

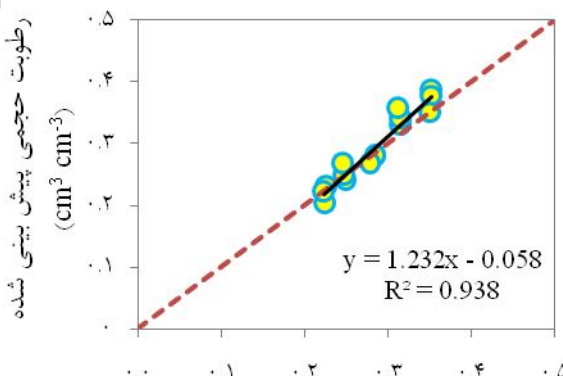


(ب) رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)

(ج) ۰ ۰.۰۵ ۰.۱ ۰.۱۵ ۰.۲ ۰.۲۵ ۰.۳ ۰.۳۵ ۰.۴



(ج) رطوبت حجمی (cm³ cm⁻³)



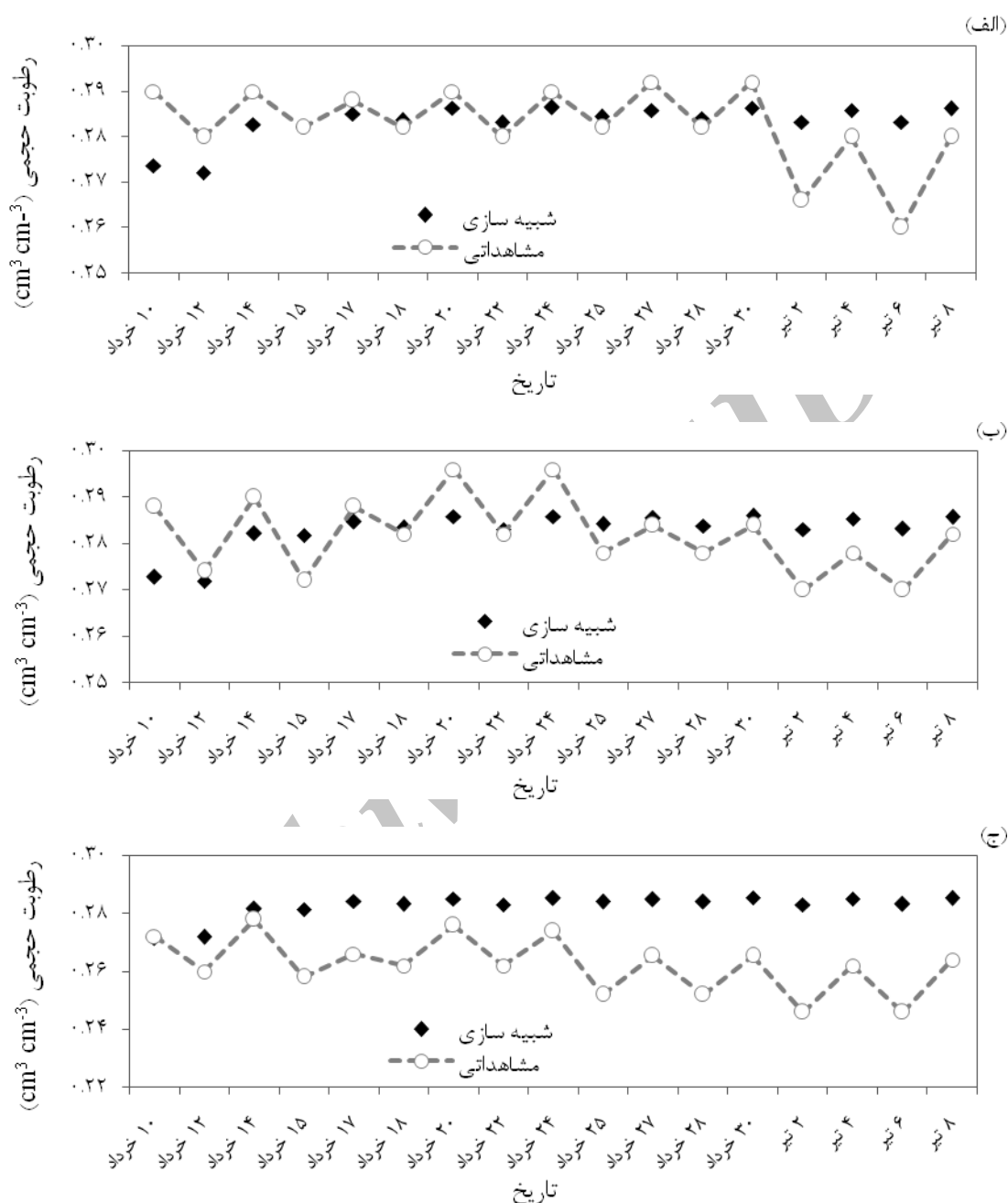
رطوبت حجمی اندازه گیری شده (cm³ cm⁻³)

شکل 7- نتایج واسنجی مدل SALTMED، 24 ساعت بعد از آبیاری دوم، (الف) فاصله 10 سانتی متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی متری از قطره‌چکان

نتایج بیانگر وجود همبستگی خوب بین این مقادیر در فواصل 10 و 40 سانتی متری از قطره‌چکان می‌باشد اما در فاصله 90 سانتی متری ضریب همبستگی 0/5 بدست آمد. علت کاهش این ضریب در فاصله 90 سانتی متری لحاظ شرایط اولیه شوری متناسب با فواصل نزدیک‌تر به قطره‌چکان است. در جدول 5 مقادیر خطای پیش‌بینی شوری نیم-رخ خاک آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تا فاصله 40 سانتی-

واسنجی و اعتبارسنجی نیم‌رخ شوری خاک پس از واسنجی و اعتباریابی مدل در بخش جریان آب، به واسنجی و اعتباریابی مدل برای بخش املاح پرداخته شد. بدین منظور، ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی برای مدل واسنجی شدند. در **شکل‌های 9 تا 12** شوری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو تاریخ نمونه‌گیری 92/3/23 و 92/4/9 بعد از آبیاری آورده شده است.

متری از قطره‌چکان خطای پیش‌بینی کمتر از 0/75 دسی‌سیمنز بر کاسته شد. متر بوده است اما با افزایش فاصله از قطره‌چکان از دقت پیش‌بینی‌ها



شکل 8- نتایج اعتبارسنجی مدل SALTMED برای نیمرخ رطوبتی در فواصل (الف) 10 سانتی‌متری، (ب) 40 سانتی‌متری و (ج) 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان، عمق 0-100 سانتی‌متری خاک

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

قطره‌های زیرسطحی (SDI) و تحت کشت درخت پسته استفاده شد. بررسی و ارزیابی مدل نشان داد که SALTMED به پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقادیر رطوبت و شوری اولیه خاک حساس است و بنابراین لزوم استفاده از داده‌های با کیفیت خوب را نشان می‌دهد.

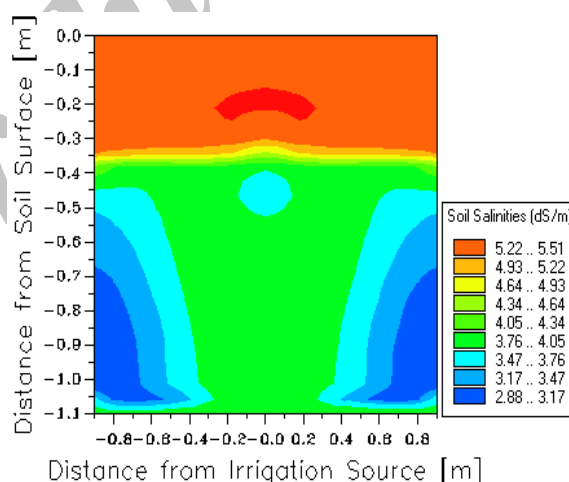
در این تحقیق از مدل SALTMED برای واسنجی و اعتبارسنجی نیمرخ‌های رطوبتی و شوری خاک تحت سامانه آبیاری

90 سانتی‌متری، لحاظ شرایط اولیه شوری متناسب با فواصل نزدیک-تر به قطره‌چکان بیان شد. با توجه به اینکه مدل SALTMED به خوبی قادر به پیش‌بینی نیمرخ رطوبت و شوری بود بنابراین توصیه می‌شود که واسنجی نیمرخ نیتراتی و گیاهی پسته با این مدل نیز انجام شود و از آن برای شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی مختلف آب و کود استفاده گردد. در این مطالعه، قسمت محدودی از پتانسیل مدل SALTMED بررسی شد در حالی که برخی از گزینه‌های این مدل مانند دینامیک نیتروژن، نوسانات آب زیرزمینی کم عمق و غلظت نیتروژن و شوری آن، جریان داخل زهکش‌ها و آبشویی نیترات هنوز مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

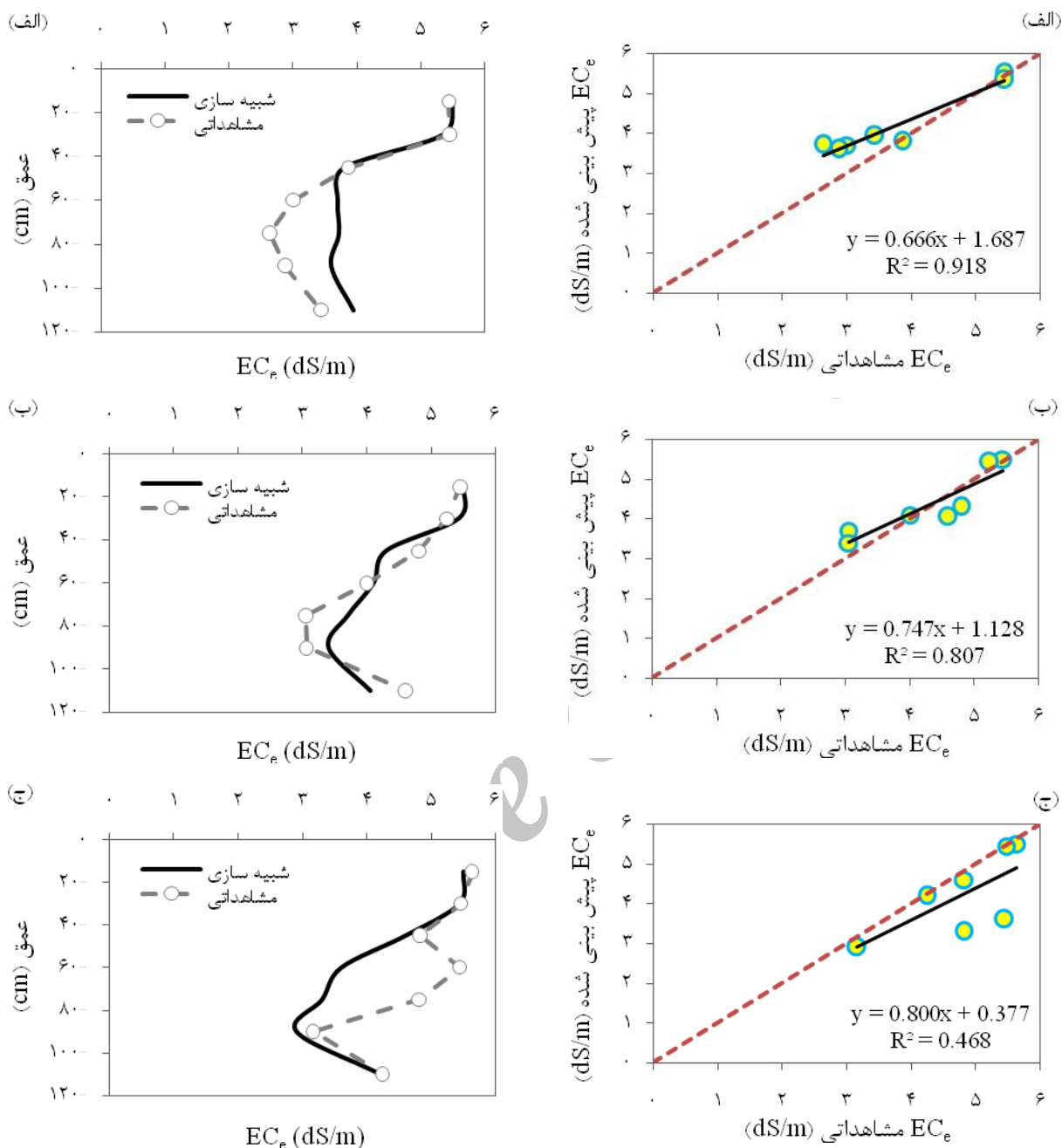
نتایج اعتبارسنجی نشان دادند که مدل قادر به پیش‌بینی روند مشاهده‌ای رطوبت در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان بود اما در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان این روند بخوبی پیش‌بینی نشد و بیش‌برآورد صورت گرفت. در مرحله اعتبارسنجی مدل، بیش-ترین خطا در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان اتفاق افتاد به طوری که خطای حدود 14 درصد در عمق 80 سانتی‌متری نیمرخ خاک وجود داشت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای بخش املاح بیانگر وجود همبستگی خوب بین این مقادیر در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان بود اما در فاصله 90 سانتی‌متری ضریب همبستگی 0/5 بدست آمد. علت کاهش این ضریب در فاصله

جدول 4- مقادیر خطای واسنجی و اعتبارسنجی رطوبت حجمی خاک در مدل SALTMED

90		40		10		فاصله از قطره چکان
CRM	RMSE	CRM	RMSE	CRM	RMSE	عمق (cm)
-0/025	0/008	-0/104	0/026	0/004	0/011	20
0/057	0/019	0/009	0/01	-0/034	0/017	40
-0/064	0/026	0/003	0/016	-0/031	0/011	60
0/063	0/031	0/051	0/021	0/036	0/015	80
-0/017	0/013	0/056	0/023	0/075	0/03	100
0/01	0/018	-0/125	0/027	-0/002	0/016	20
0/028	0/011	-0/054	0/015	-0/086	0/022	40
-0/144	0/038	-0/057	0/017	-0/002	0/008	60
-0/165	0/047	0/077	0/028	0/012	0/01	80
-0/094	0/032	0/058	0/025	0/039	0/018	100



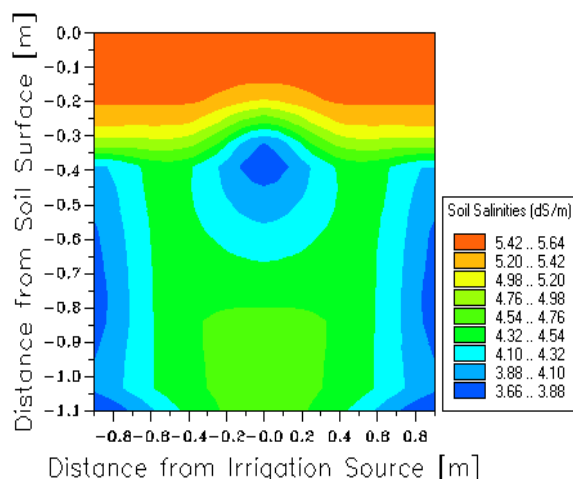
شکل 9- نیمرخ شوری خاک بعد از آبیاری شبیه‌سازی شده با مدل SALTMED در تاریخ 92/3/23



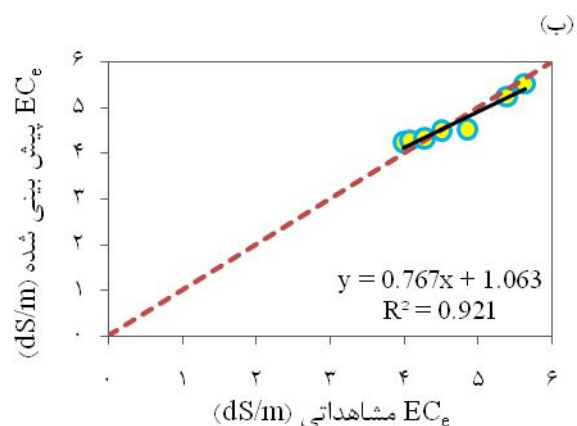
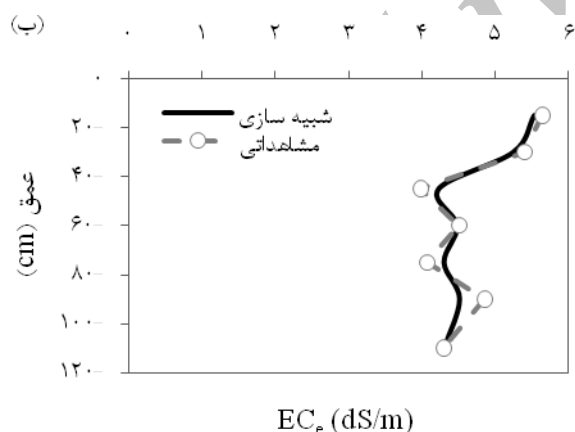
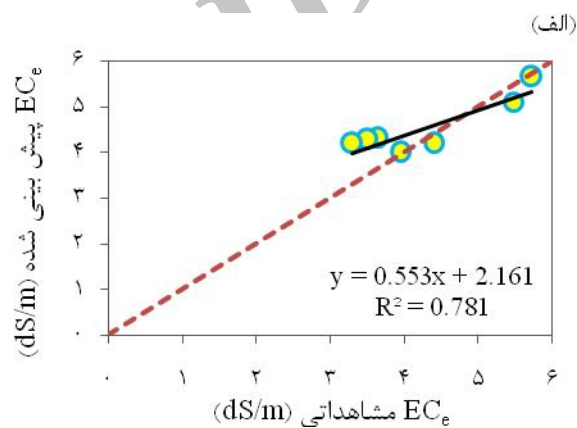
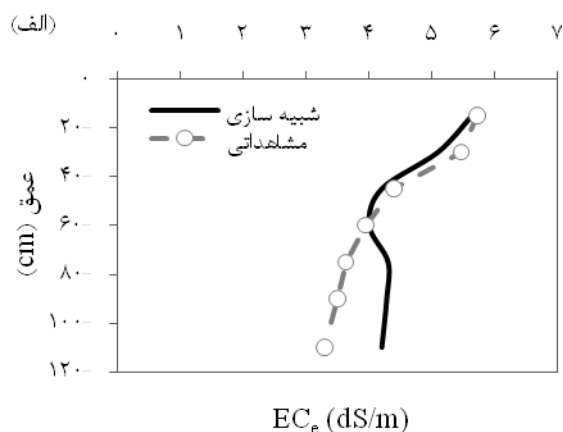
شکل 10- نمودارهای شبیه‌سازی و مشاهداتی  $EC_e$  بعد از آبیاری با مدل SALTMED و همبستگی آن‌ها با یکدیگر در تاریخ 92/3/23، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان و (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

جدول 5- مقادیر خطای شوری خاک بعد از آبیاری در مدل SALTMED

		90		40		10		فاصله از قطره چکان	
CRM	RMSE	CRM	RMSE	CRM	RMSE	CRM	RMSE	عمق (cm)	
-0/19	1/34	0/005	0/09	0/001	0/07			20	
-0/011	0/11	-0/004	0/17	0/044	0/27			40	
0/26	1/55	0/011	0/28	-0/032	0/36			60	
0/38	2/25	-0/009	0/49	-0/28	0/9			80	
0/27	1/62	0/0	0/34	-0/23	0/75			100	



شکل 11- نپرخ شوری خاک بعد از آبیاری شبیه‌سازی شده با مدل SALTMed در تاریخ 92/4/9



شکل 12- نمودارهای شبیه‌سازی و مشاهداتی  $EC_e$  بعد از آبیاری با مدل SALTMed و همبستگی آن‌ها با یکدیگر در تاریخ 92/4/9. (الف) فاصله 10 سانتی متری از قطره‌چکان و (ب) فاصله 40 سانتی متری از قطره‌چکان



## منابع

- field data from Morocco. *Materials and Environmental Science*. 3.2: 342-359.
- Kamra, S.K., Singh, S.R., Rao, K.V.G and Van Genuchten, M.Th. 1991. A semi discrete model for water and solute movement in tile-drained soils. I. Governing equations and solution. *Water Resource Research*. 27: 2439-2447.
- Kandelous, M.M and Simunek. J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural. Water Management*. 97: 1070-1076.
- Loague, K and Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Contaminant hydrology*. 7:51-71.
- Logan, J.D. 1996. Solute transport in porous media with scale-dependent dispersion and periodic boundary conditions. *Hydrology*. 184: 261-276.
- Lunt, I.A., Hubbard, S.S and Rubin, Y. 2005. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection. *Hydrology*. 307(1-4):254-269.
- Montenegro, S.G., Montenegro, A and Ragab, R. 2010. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. *Irrigation Science*. 28: 301-316.
- Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M and Cox, J.W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30.4: 315-333.
- Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Sanderson, G., Alam, J and Šimunek, J. 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology*. 513: 504-516.
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., D'andria, R and Ragab, R. 2013. SALTMED model to simulate yield and dry matter for quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in south Italy. *Irrigation and drainage*. 62.2: 229-238.
- Ragab, R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*. 17.4: 345-361.
- Ragab, R. 2013. User's Guide for SALTMED 2013 Model. Centre for Ecology & Hydrology, CEH-NERC, Wallingford, OX10 8BB, UK, 149 p.
- Ragab, R., Feyen, J and Hillel, D. 1984. Simulating two-dimensional infiltration into sand from a trickle
- فروغی، ف و قائمی، ع.ا. 1384. تعیین عمق بهینه آب آبیاری گندم بر اساس خط مشی‌های مختلف مدیریتی در آبیاری بارانی عقرب‌های. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*. 2. 15-9:1-9.
- ابریشمی، م.ج. 1373. پسته ایران: شناخت تاریخی. مرکز نشر دانشگاهی تهران، 669 ص.
- زارع نظری، ا. 1392. پسته. ماهنامه انجمن پسته ایران. 19. 56 ص.
- صداقتی، ن، حسینی فرد، س.ج و محمدی محمدآبادی، ا. 1391. مقایسه اثرات دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بر رشد و عملکرد درختان بارور پسته. *نشریه آب و خاک*. 3.26: 575-585.
- قربانپان، م، منجزی، م.ص، ابراهیمیان، ح. و لیاقت، ع. 1393. ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیزا رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقیلی سطحی و زیرسطحی. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. 1. 28: 179-189.
- Armstrong, F.C and Wilson, T.V. 1983. Computer model for moisture distribution in stratified soils under trickle source. *Transaction of the ASAE*. 26: 1704-1709.
- Badr, A.E and Abuarab, M.E. 2013. Soil moisture distribution patterns under surface and subsurface drip irrigation systems in sandy soil using neutron scattering technique. *Irrigation Science*. 31.3: 317-332.
- Cardon, E.G and Letey, J. 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society of America*. 56: 1876-1880.
- Coelho, F.E and Or, D. 1996. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Science Society of America*. 60: 1039-1049.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 143-156.
- Elmaloglou, S and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*. 96.11: 1587-1595.
- FAO. 1998. Crop evapotranspiration. *Irrigation and Drainage Paper No 56*. Rome, Italy.
- Hirich, A., Choukr-Allah, R., Ragab, R., Jacobsen, S.E., El Youssfi, L and El Omari, H. 2012. The SALTMED model calibration and validation using

- The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0.I GWMC-TPS-70. International Ground Water Modelling Centre, Colorado School of Mines, Golden, CO, 186 pp.
- Sivakumar, M.V.K and Glinni, A.F. 2002. Applications of crop growth models in the semiarid regions. In: Ahuja LR, Ma L, Howell TA (eds) Agricultural system models in field research and technology transfer, chap. 9. Lewis Publishers, London, pp 177–205.
- Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M and Droogers, P. 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. Soil Science Society of America, 58: 647–652.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America, 44: 892–898.
- line source using the matric flux potential concept. Soil Science. 137: 120–127.
- Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arslan, A. and Ghaibeh, A. 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, 78:67–88
- Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arslan, A and Ghaibeh, A. 2005b. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management. 2. The SALTMed model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. Agricultural Water Management, 78:89–107
- Silva, L.L., Ragab, R., Duarte, I., Lourenço, E., Simões, N and Chaves, M.M. 2013. Calibration and validation of SALTMed model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. Irrigation Science, 31(4): 651-659.
- Simunek, J., Sejna, M and Van Genuchten, M.Th. 1998.

Archive of SID

## Field Evaluation of SALTMED Model for Simulating Distribution and Dynamics of Soil Water and Salt Content under Subsurface Drip Irrigation in Pistachio Orchards

A.Seifi<sup>1\*</sup>, S.M.Mirlatifi<sup>2</sup>, H.Dehghanisani<sup>3</sup>

Received: Sept.30, 2015

Accepted: Octo.30, 2016

### Abstract

In recent decades, predicting variations of soil moisture and soil salinity is require for irrigation management in agricultural fields at areas with limited access to water resources. The SALTMED 2013 model is one of the available common models that is including different irrigation systems, different soil types and crop types, and can be used to water, soil, and crop management in field. The physical base of this model is the water and solute transport, evapotranspiration, and water uptake equations. In this paper, the SALTMED 2013 model was used to calibrate and validate of soil moisture and salinity profiles of pistachio tree grown on loam silt soil in a region under desert climate at Southeast Iran, Sirjan. Pistachio trees irrigated by subsurface drip irrigation (SDI) system and saline water with EC = 2.5 dS/m. Irrigation frequency was once every 3 days and was done based on the moisture reading using time domain reflectometry (TDR) tube. Soil moisture and salinity variation simulated at distances of 10, 40, 60, and 90 cm from emitter and at depths of 20, 40, 60, 80, and 100 cm from soil surface. The results showed that model accurately simulates soil moisture content near the emitters, but has over-estimate in distances away from the emitter. The results of calibration and validation of the SALTMED model for solute simulate indicated its ability in predicting dynamic distribution of salinity in SDI systems. So, the model can be used as a useful tool in soil- water- plant relations and their management.

**Key word:** Pistachio Orchard, SALTMED model, Soil Salinity Profile, Soil Moisture Profile, Subsurface Drip Irrigation.

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(\* - Corresponding Author, Email: a.seifi@vru.ac.ir)