نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره 5، جلد 10، آذر - دی 1395، ص. 612-594

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 10, Nov.-Dec. 2016, p. 594-612

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

اکرم سیفی[1*]، سید مجید میرلطیفی[2]، حسین دهقانی سانیج[3]

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 دردسترس است که با درنظر 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 مشاهده-ای رطوبت در فواصل نزدیک به قطره‌چکان بود اما در فواصل دورتر، اندکی بیش‌برآورد صورت گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای بخش املاح، بیانگر کارآیی 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

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[4] (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 گیاه و کاهش راندمان آبیاری شود (قربانیان 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

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

Glinni., 2002). به عنوان مثال، مدل‌های نفوذ (Ragab et al., 1984; Armstrong and Wilson., 1983)، مدل‌های جذب آب توسط ریشه (Cardon and Letey., 1992; Coelho and Or., 1996)، مدل‌های آب‌شویی یا انتقال آب و املاح (Kamra et al., 1991; Logan., 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 و 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 درنقاط 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 عموما 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. باکاربرد مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان بسیاری از محاسبات پیچیده‌ی مربوط به حرکت آب و املاح و گرما درخاک 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 دردسترس 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 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 واستراتژی‌های 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 داده-های 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 کینوآ، نخود و ذرت شیرین تحت تیمارهای کم آبیاری در مراکش، پولونتو و همکاران (Pulevento et al., 2013) برای گیاه کینوآ و تیمارهای مختلف آبیاری با آب‌های شور و شیرین در جنوب ایتالیا، مونتگرو 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 ′82 °55 و عرض جغرافیایی ′30 °29 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-

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 آبده 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^3)
	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 آبده، 80 سانتی‌متر بود. لوله‌های آبده در عمق 40 سانتی‌متری و در فاصله 110 سانتی‌متری از درخت قرار داده شد. در طول مدت آبیاری فشار هیدرولیکی در ابتدای لوله آبده تا 2 kPa تنظیم شد. از یک کنتور 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).

$$I_n = \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{m} (w_{FCi} - w_{BIi}) \times D_i \right)_j \quad (1)$$

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 شمارش‌گر تعداد لایه، j شمارش‌گر نقاط اندازه‌گیری اطراف درخت، n تعداد نقاط اندازه‌گیری اطراف درخت و w_{BI} 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 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 سانتی‌متری)، لوله‌های دسترسی TDR به ترتیب در فاصله 60، 10، 40 و 90 سانتی‌متری از محل قطره‌چکان قرار گرفتند. در مجموع با توجه به اینکه در درختان بارور پسته، بیش‌ترین تراکم ریشه‌های فعال در عمق 30 تا 100 سانتی‌متری است (صداقتی 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 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه‌های خاک به منظور اندازه‌گیری شوری از اعماق 0-20، 20-40، 40-60، 60-80 و 80-100 سانتی‌متری تهیه شدند و برای تهیه عصاره اشباع به آزمایشگاه منتقل گردیدند.

مدل SALTMED

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 SALTMED پرداخته می‌شود. مدل SALTMED از وب‌سایت http://www.swup-med.dk/SALTMED.aspx. قابل دانلود می‌باشد.

تبخیر-تعرق

تبخیر-تعرق با استفاده از معادله پنمن- مانتیث[1] و بر اساس معادلات ارائه شده در FAO-56 (1998) محاسبه می‌شود:

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

که ET_o تبخیر-تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص (MJ/m^2day)، T مقدار میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع 2 متری (^oC)، G فلاکس گرمای خاک (MJ/m^2day)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa/^oC$)، γ ثابت سایکرومتری (66 $Pa/^oC$)، 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_o برای چمن سبزی که خوب آبیاری شده و ارتفاعش کوتاه باشد، به کار می‌رود.

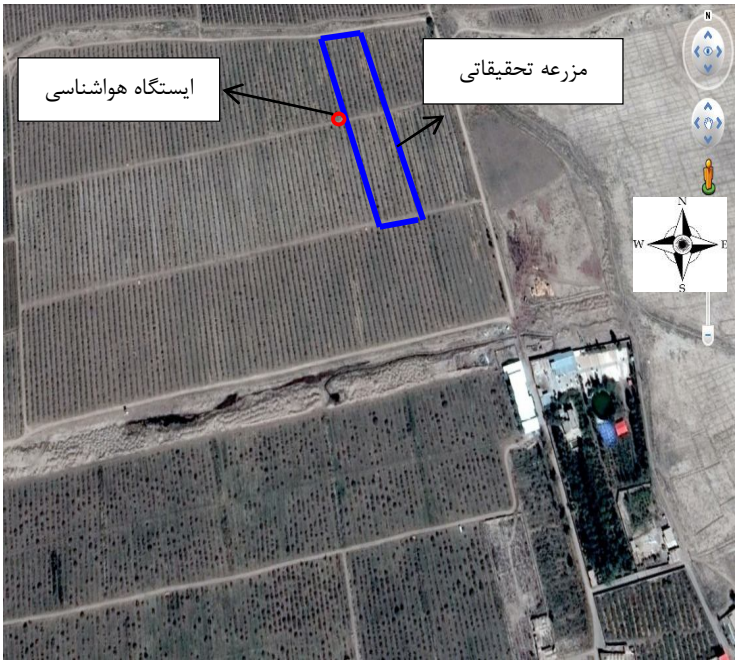
تبخیر-تعرق گیاهی (ET_c) به صورت زیر (رابطه 3) محاسبه می‌شود:

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

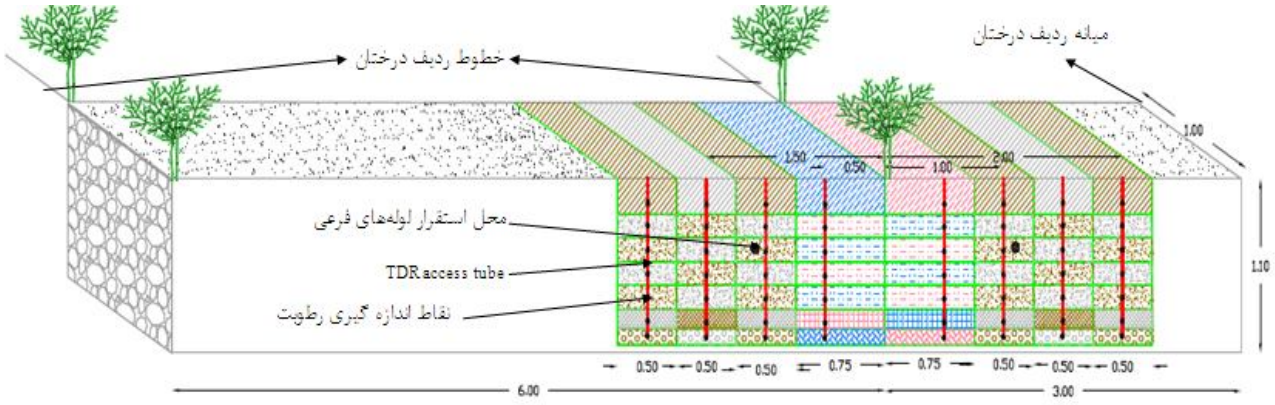
که K_{cb} ضریب تعرق گیاهی (معروف به ضریب گیاهی دوگانه) و K_e ضریب تبخیر خاک است. مقدار K_e بر اساس FAO-56 (1998) در مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد به ترتیب به مقدار 0/6، 1/2 و

1- Penman–Monteith

0/65 محاسبه شد.



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



ناحیه	طول (cm)	عرض (cm)	عمق (cm)	حجم (cm3)
	۱۰۰	۷۵	۲۲/۵	۱۶۸۷۵۰
	۱۰۰	۷۵	۱۵	۱۱۲۵۰۰
	۱۰۰	۷۵	۱۲/۵	۹۳۷۵۰
	۱۰۰	۷۵	۱۰	۷۵۰۰۰

ناحیه	طول (cm)	عرض (cm)	عمق (cm)	حجم (cm3)
	۱۰۰	۵۰	۲۲/۵	۱۱۲۵۰۰
	۱۰۰	۵۰	۱۵	۷۵۰۰۰
	۱۰۰	۵۰	۱۲/۵	۶۲۵۰۰
	۱۰۰	۵۰	۱۰	۵۰۰۰۰

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

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:

$$S(z,t) = \left[\frac{S_{max}(t)}{1+\left(\frac{s(t)h+\pi}{\pi_{50}(t)}\right)^{\overline{e}}}\right]\lambda(z,t) \quad (4)$$

که

$$\lambda(z) = \frac{5}{3}L \qquad \text{for } z \le 0.2L \tag{4أ}$$

$$\lambda(z) = \frac{25}{12}L \times \left(1 - \frac{z}{L}\right) \qquad \text{for } 0.2L < z \le L \tag{4ب}$$

$$\lambda(z) = 0.0 \qquad \text{for } z > L \tag{4ج}$$

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 ریشه‌دوانی، h بار فشار ماتریک، π بار فشار اسمزی، π_{50} (t) مقدار فشار اسمزی به صورت تابعی از زمان هنگامی که $S_{max}(t)$ تا 50 درصد کاهش داده می‌شود 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 می‌شود. $S_{max}(t)$ به صورت رابطه 5 محاسبه می‌شود:

$$S_{max}(t) = ET_p(t) \times K_{cb}(t) \tag{5}$$

جریان آب و املاح

جریان آب در خاک را می‌توان به صورت ریاضی با معادله ریچارد توصیف کرد. معادله ریچارد، معادله‌ای دیفرانسیل غیرخطی جزیی نسبت به زمان و مکان است. جریان انتقالی عمودی و افقی آب در قسمت پایدار و یکنواخت ناحیه ریشه را می‌توان بر مبنای معادله ریچارد و به صورت رابطه 6 بیان کرد:

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

که θ 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 می‌باشند.

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

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

معادلات جریان آب و املاح به طور عددی و با استفاده از روش اختلاف محدود حل می‌شوند (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 می‌شوند (رابطه 8 و 9):

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

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

که θ_r و θ_s به ترتیب مقادیر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، K_r و K_s به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و باقی‌مانده، α و n ضرایب شکل، $m = 1 - \frac{1}{n}$ و S_e اشباع موثر هستند. α 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 می‌شود (رابطه 10، 11 و 12):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{10}$$

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

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

مقادیر θ_r، θ_s، θ، K_s، مقدار آب در ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی، n و m ($n = \lambda + 1$ و $m = \frac{\lambda}{n}$، λ شاخص توزیع اندازه خلل و فرج) بر اساس توابع انتقالی محاسبه می‌شوند. این مقادیر و مقادیر دیگر به دست آمده از منابع مختلف در پایگاه داده مدل وجود دارند و در صورت عدم اندازه‌گیری، می‌توان از این مقادیر به صورت پیش‌فرض استفاده کرد. همچنین مدل می‌تواند از مقادیر پتانسیل آب خاک-رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی-رطوبت خاک استفاده کند (Ragab., 2002).

داده‌های مورد نیاز مدل

داده‌های گیاهی مورد نیاز در هر مرحله رشد شامل ضریب گیاهی (K_{cb} و K_e)، 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-رخ‌های شوری و داده‌های 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. داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، تابش خالص، سرعت باد و بارندگی روزانه می‌باشد. همچنین داده-های مدیریت آب شامل تاریخ و مقادیر آب آبیاری کاربردی و سطح شوری در هر آبیاری نیز از ورودی‌های 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

(Ragab., 2002).

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_e) از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای رطوبت و استفاده از معادله بیلان آب خاک به مدل داده شد. برای محاسبه ضریب گیاهی دوگانه (K_{cb}) و پوشش نسبی[1] (F_c) از معادلات FAO-56 استفاده شد. پارامتر F_c 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_s)، رطوبت اشباع (θ_s) و رطوبت باقی‌مانده (θ_r) 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_s، θ_s و θ_r 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 $n = \lambda + 1$ و $m = \frac{\lambda}{n}$ 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 نیم‌رخ خاک و ضریب انتشار عرضی برابر با 0/1 ضریب انتشار طولی 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 واسنجی شد. بدین ترتیب مقادیر واسنجی 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[2] (RMSE)، ضریب تعیین[3] (R^2) و ضریب جرم باقیمانده[4] (CRM) استفاده شد. مقادیر RMSE نشان دهنده درجه بیش‌برآورد یا کم‌برآورد شبیه‌سازی‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است:

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

که S_i مقدار پیش‌بینی، O_i مقدار مشاهداتی و N تعداد کل مشاهدات است.

آماره R^2 بیانگر نسبت بین مقادیر شبیه‌سازی شده به متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است:

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

که O_{avg} متوسط مقادیر مشاهداتی و S_{avg} 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

1- Fraction Cover

2- Root Mean Square Error
3- Coefficient of determination
4- Coefficient of residual mass

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 θ_r، θ_s، K_s، n، α و λ 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 آن‌که 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 می‌شود که در برخی از روزهای شبیه‌سازی، به طور متوسط رطوبت خاک بالای قطره‌چکان به مقدار ناچیزی (کم‌تر از 2 درصد) بیش‌برآورد 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.

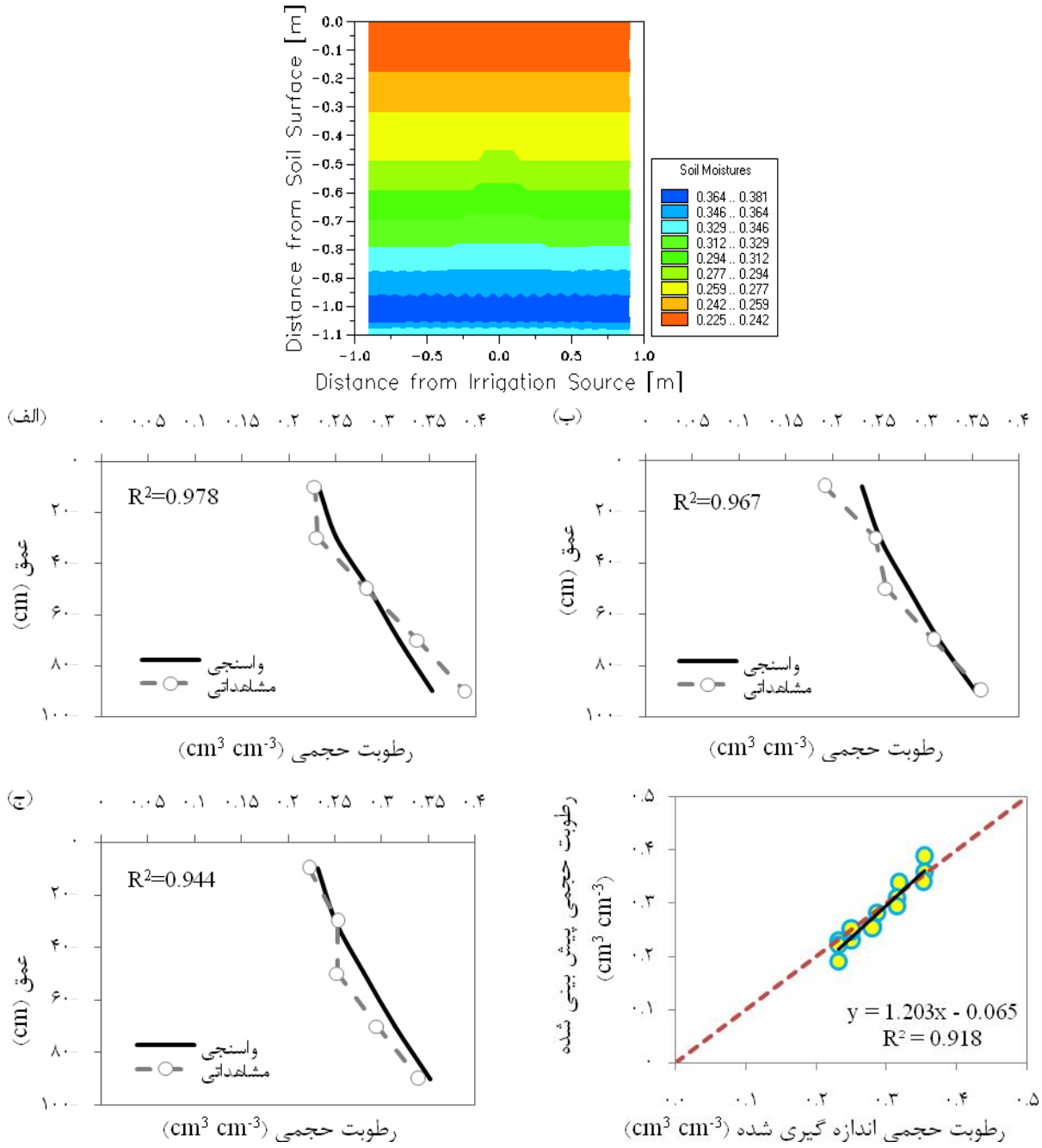
جدول 2- مقادیر آب آبیاری محاسبه شده

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	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_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

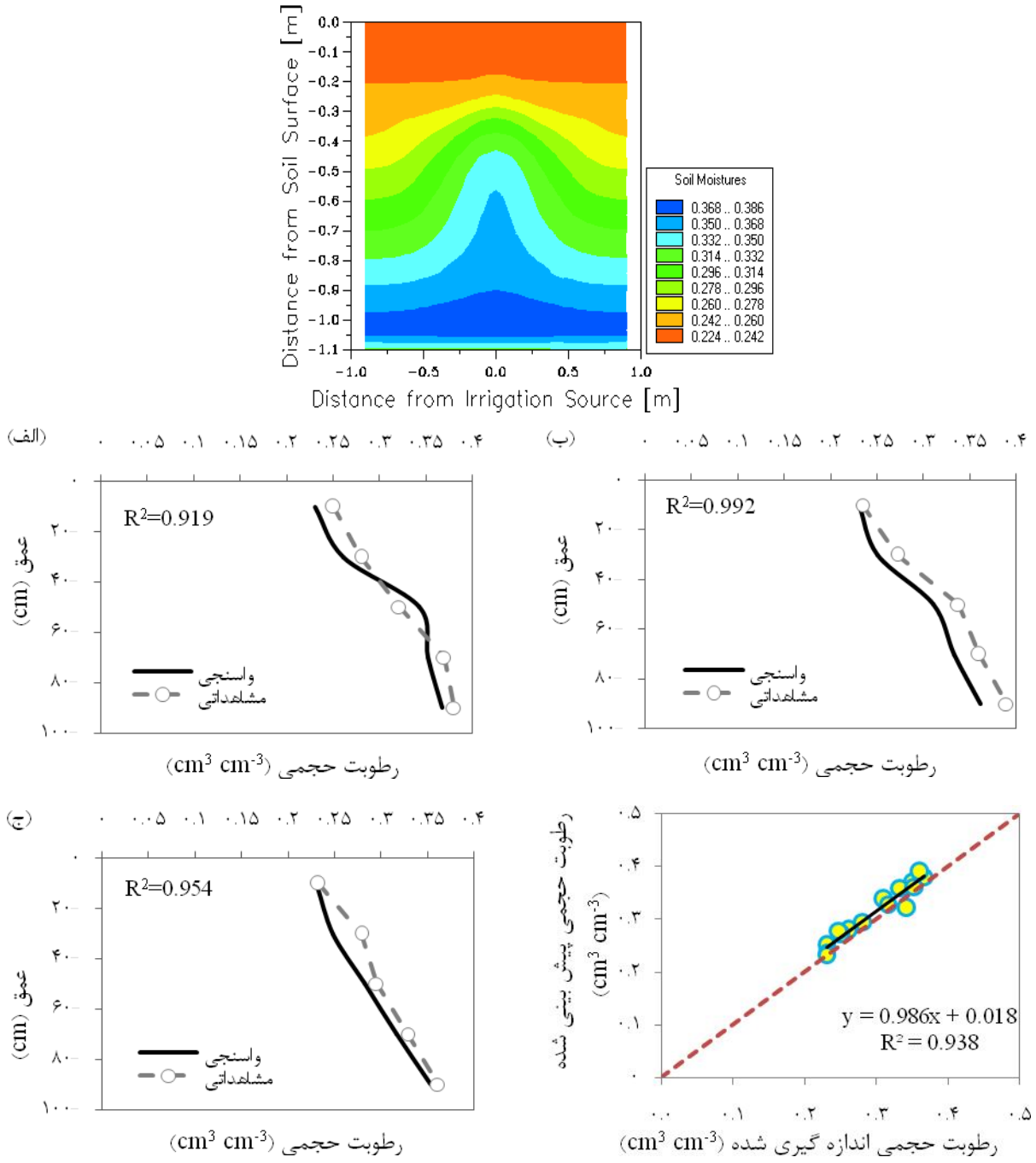


شکل 3- نتایج واسنجی مدل SALTMED ، قبل ازآبیاری اول، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

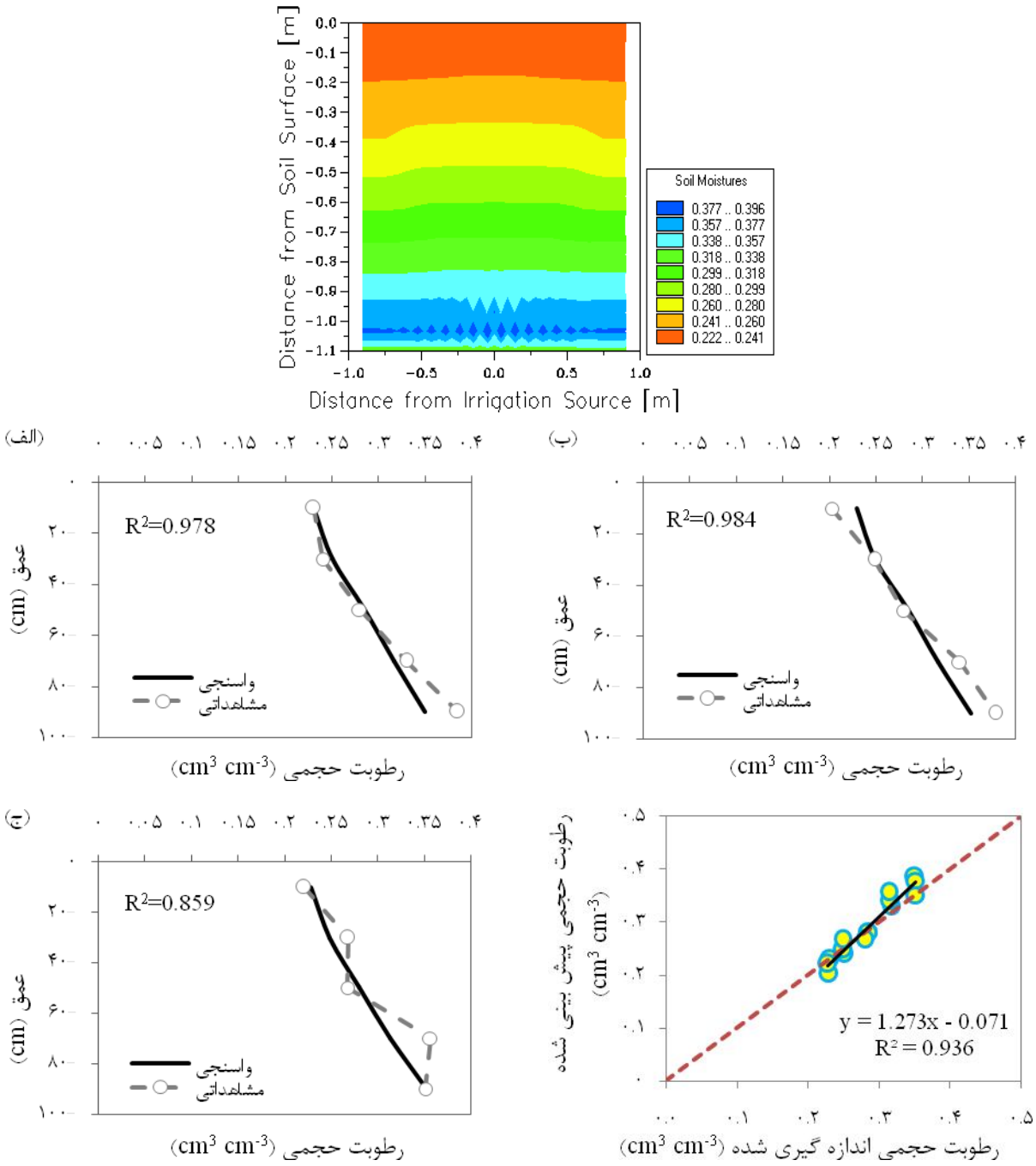
در جدول 4 نیز خطای پیش‌بینی مدل SALTMED بر مبنای دو شاخص RMSE و CRM آورده شده است. در مرحله اعتبارسنجی مدل، بیشترین خطا در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان اتفاق افتاده است به‌طوری‌که خطای حدود 0/047 m^3/m^3 در عمق 80 سانتی‌متری نیمرخ خاک وجود داشت. این امر به دلیل لحاظ شرایط اولیه رطوبتی متناسب با فواصل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

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 سانتی‌متری در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان بیش‌برآورد و در سایر اعماق کم برآورد شد و در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان نتایج برعکس است یعنی در لایه‌های سطحی کم برآورد و لایه‌های

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 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 حالی‌که 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.



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



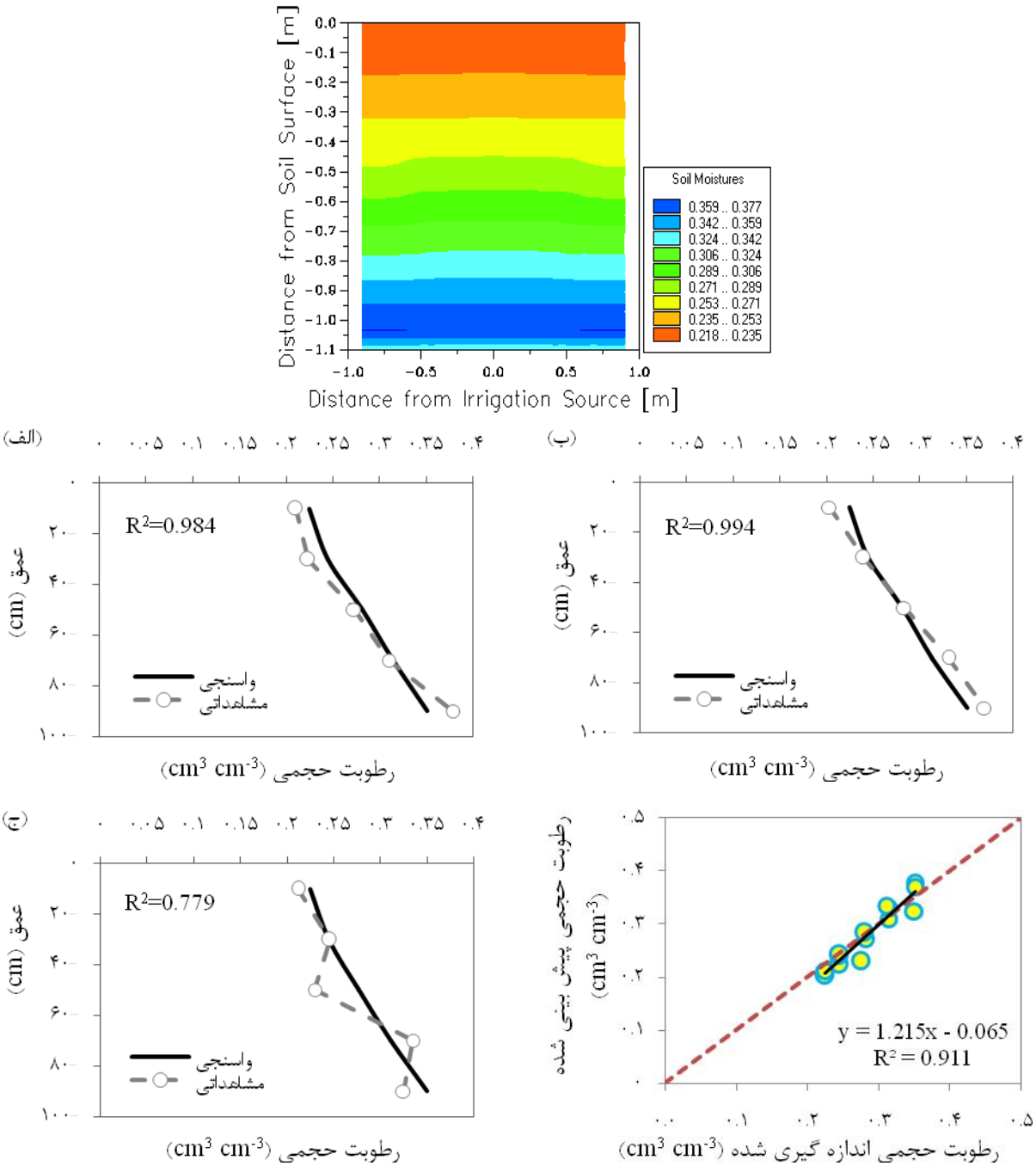
شکل 5- نتایج واسنجی مدل SALTMED، 24 ساعت بعد ازآبیاری اول، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

واسنجی و اعتبارسنجی نیم‌رخ شوری خاک

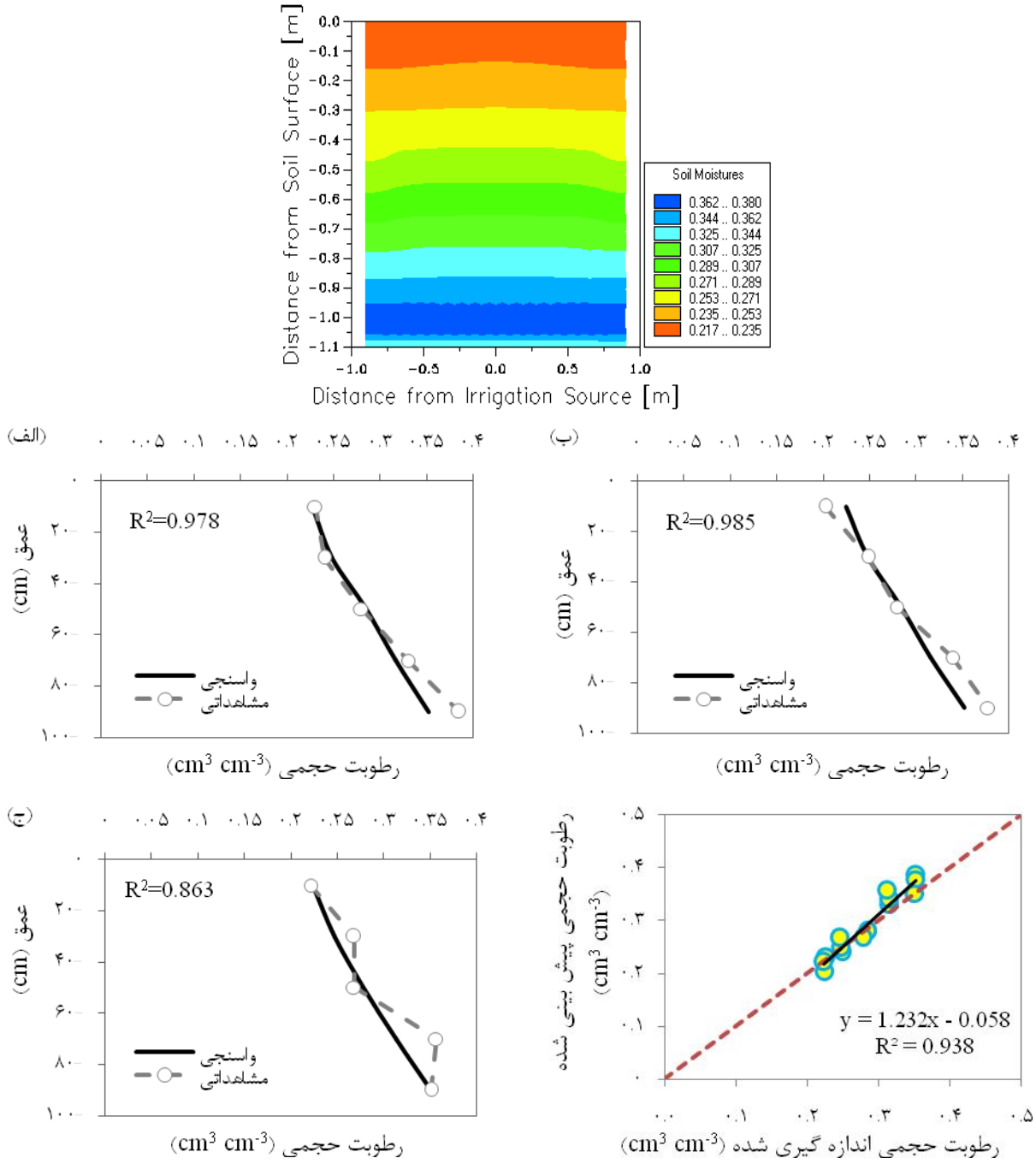
پس از واسنجی و اعتباریابی مدل در بخش جریان آب، به واسنجی و اعتباریابی مدل برای بخش املاح پرداخته شد. بدین منظور، ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی برای مدل واسنجی شدند. در شکل‌های 10 تا 13 شوری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو تاریخ نمونه‌گیری 92/3/23 و 92/4/9 بعد از آبیاری آورده شده است.

نتایج بیانگر وجود همبستگی خوب بین این مقادیر در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان می‌باشد اما در فاصله 90 سانتی‌متری ضریب همبستگی 0/5 بدست آمد. علت کاهش این ضریب در فاصله 90 سانتی‌متری 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-

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



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



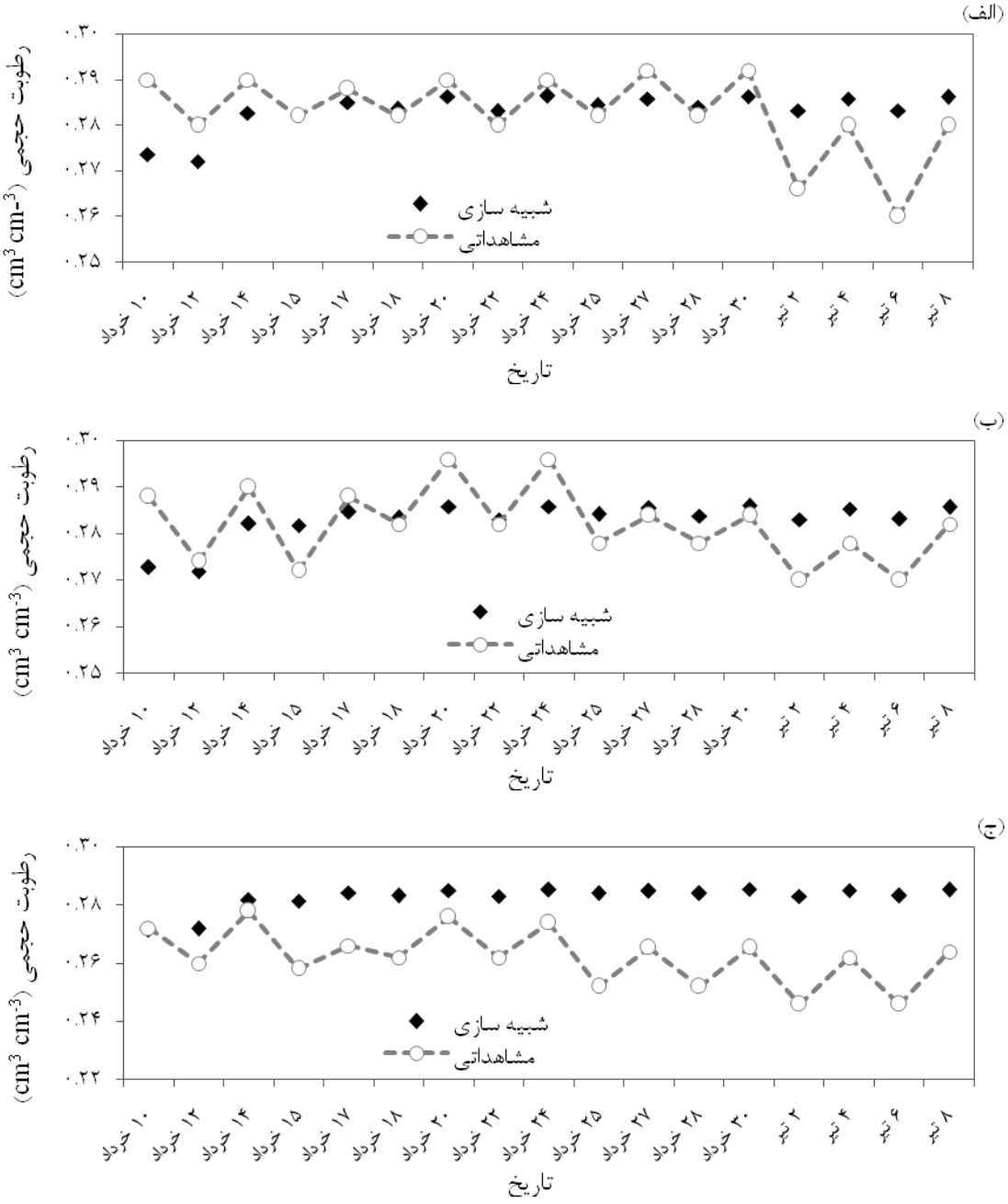
شکل 7- نتایج واسنجی مدل SALTMED ، 24 ساعت بعد ازآبیاری دوم، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

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.

نتایج بیانگر وجود همبستگی خوب بین این مقادیر در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان می‌باشد اما در فاصله 90 سانتی‌متری ضریب همبستگی 0/5 بدست آمد. علت کاهش این ضریب در فاصله 90 سانتی‌متری 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-

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



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

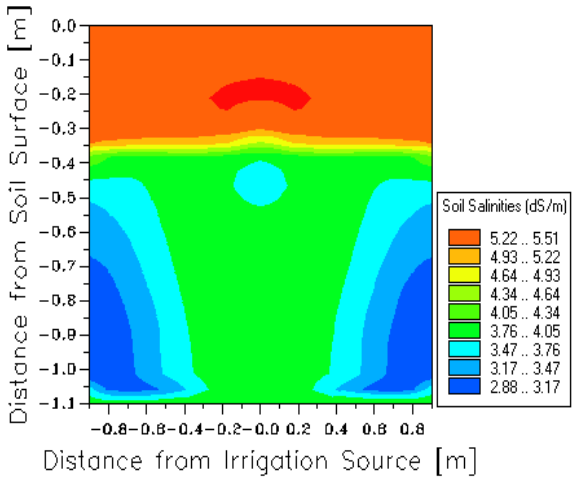
نتیجه‌گیری و پیشنهادات

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

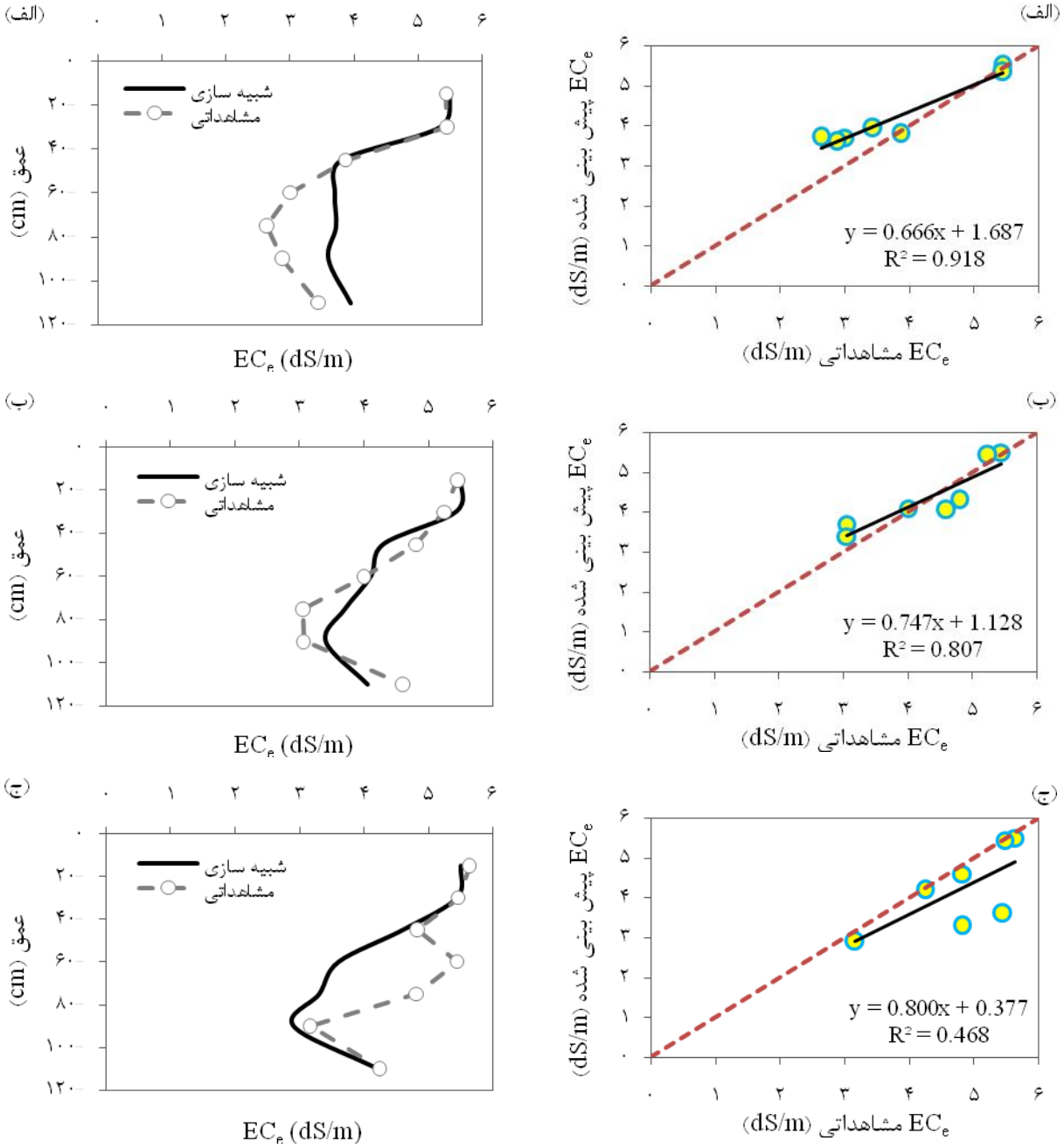
نتایج اعتبارسنجی نشان دادند که، مدل قادر به پیش‌بینی روند مشاهده‌ای رطوبت در فواصل 10 و 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان بود اما در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان این روند بخوبی پیش‌بینی نشد و بیش‌برآورد صورت گرفت. در مرحله اعتبارسنجی مدل، بیش‌ترین خطا در فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان اتفاق افتاد به‌طوری‌که 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 90 سانتی‌متری، لحاظ شرایط اولیه شوری متناسب با فواصل نزدیک‌تر 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.

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

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



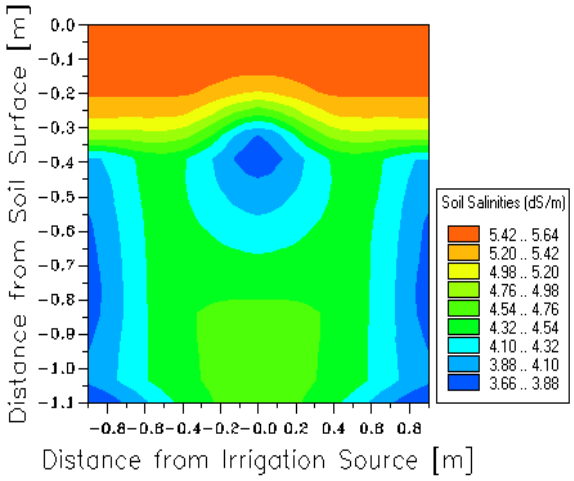
شکل 9- نیم‌رخ شوری خاک بعد از آبیاری شبیه‌سازی شده با مدل SALTMED در تاریخ 92/3/23



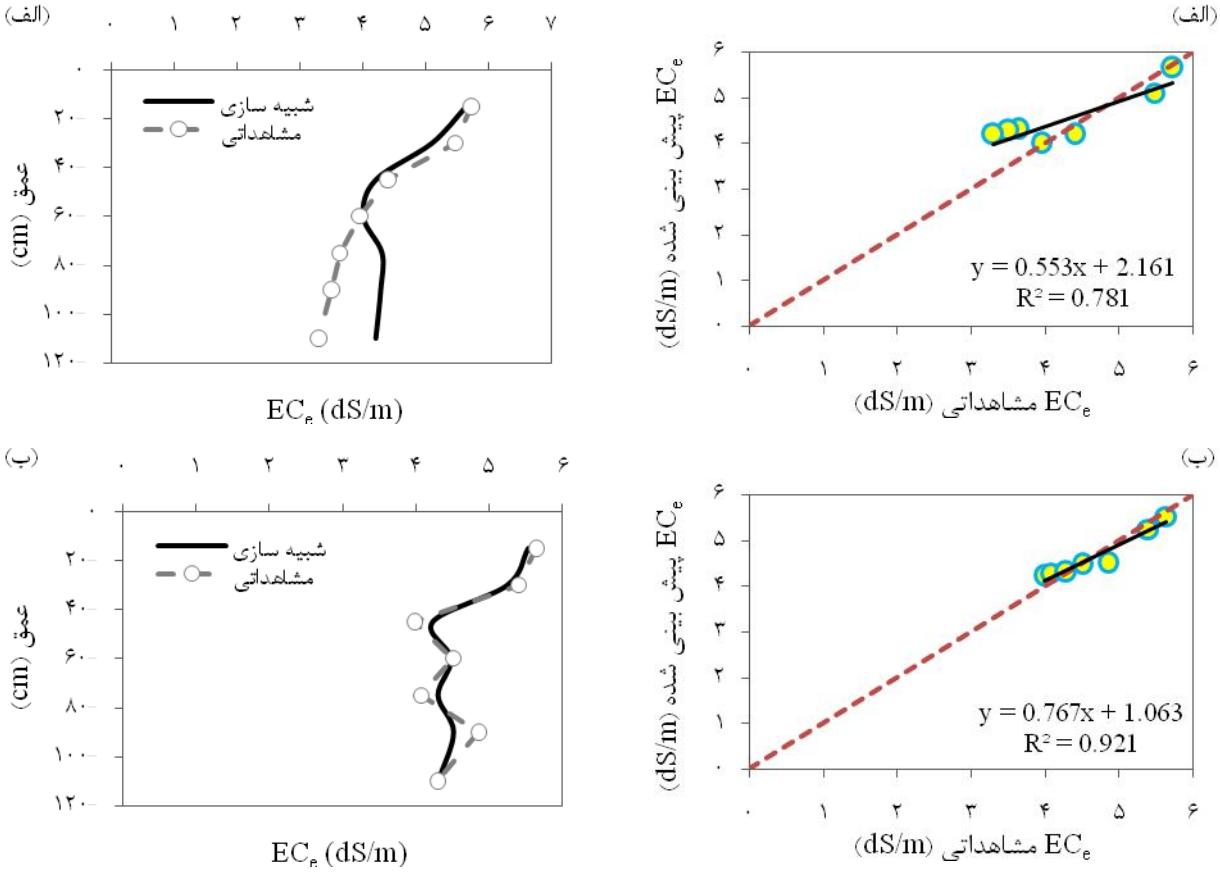
شکل 10- نمودارهای شبیه‌سازی و مشاهداتی EC_e بعد از آبیاری با مدل SALTMED و همبستگی آن‌ها با یکدیگردر تاریخ 92/3/23، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان، (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان و (ج) فاصله 90 سانتی‌متری از قطره‌چکان

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

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



شکل 11- نیم‌رخ 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 یکدیگردر تاریخ 92/4/9، (الف) فاصله 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان و (ب) فاصله 40 سانتی‌متری از قطره‌چکان

منابع

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. 1:9-15

ابریشمی،م.ح. 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.

قربانیان،م.، منجزی،م.ص.، ابراهیمیان،ح. و لیاقت،ع. 1393. ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی و زیرسطحی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 1. 28: 189-179.

Armstrong, F.C and Wilson, T.V. 1983. Computer model for moisture distribution in stratified soils under tickle source. Transcation 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 PaperNo 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 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 Šimůnek, 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

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.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 10, Nov.-Dec. 2016, p. 594-612

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره 5، جلد 10، آذر - دی 1395، ص. 612-594

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[1*], S.M.Mirlatifi[2], H.Dehghanisanij[3]

Recived: 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)