

شبیه‌سازی عددی توزیع رطوبت در خاک تحت تأثیر مالچ و آب زیرزمینی شور و کم‌عمق

اشکان یوسفی^۱، احمد فرخیان فیروزی^{۲*}، میلاد امین زاده^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مالچ کاه و کلش بر روی توزیع رطوبت در نیمرخ خاک و شبیه‌سازی جریان آب در خاک تحت تأثیر آب زیرزمینی و شور، با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D انجام شد. بدین منظور، آزمایش لایسی‌متری در دو خاک با بافت‌های شنی و لوم با سه سطح مختلف شوری آب زیرزمینی شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، با و بدون پوشش مالچ و در سه تکرار، در بازه زمانی ۳ ماهه انجام شد. مقدار رطوبت به‌وسیله دستگاه TDR در عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و همچنین مقدار تبخیر با استفاده از سیستم بطری ماریوت، به‌صورت روزانه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که پوشش مالچ، به ترتیب منجر به نگهداشت ۱۵ و ۲۰ درصدی رطوبت در لایه سطحی و کاهش تبخیر ۲۷ و ۸ درصدی به ترتیب در خاک لوم و شنی شد. در این مطالعه، بین داده‌های رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار HYDRUS-1D، همبستگی ۰/۸۹-۰/۹۷ برای خاک لوم و همبستگی ۰/۹۰-۰/۹۶ برای خاک شنی به‌دست آمد. علاوه بر این، مدل HYDRUS-1D، مقدار رطوبت را با میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ و $0/121 - 0/489$ و $0/129 - 0/521 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ به ترتیب برای خاک لوم و خاک شنی شبیه‌سازی نمود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده نشان داد که رطوبت شبیه‌سازی‌شده در لایه‌های نزدیک به سطح ایستابی، در همه تیمارها بیش از مقدار اندازه‌گیری برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، رطوبت، شوری، مالچ، HYDRUS-1D

یوسفی ا.، فرخیان فیروزی ا.، امین‌زاده م. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی عددی توزیع رطوبت در خاک تحت تأثیر مالچ و آب زیرزمینی شور و کم‌عمق. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۳. صفحه: ۱۷۲-۱۸۷.

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز (مکاتبه‌کننده).

۳- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

* پست الکترونیک: a.farrokhian@scu.ac.ir

مقدمه

کمبود منابع آب یکی از عوامل اصلی محدود کننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران است (Shahidi *et al.*, 2009). متوسط ریزش‌های جوی ایران در حدود ۲۲۴ میلی‌متر در سال، یعنی کمتر از یک سوم بارندگی سالانه جهان می‌باشد. درحالی‌که مقدار تبخیر و تعرق در حدود ۳ برابر متوسط جهانی است (Chitsazan & Akhtari, 2006). این امر ایران را در گروه کشورهای درگیر با بحران آب قرار داده است (Bargahi & Mousavi, 2006).

شناخت کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان یک منبع مهم در منابع آبی دارای اهمیت است. سطح ایستابی کم‌عمق، منبعی از آب است که به‌هنگام مدیریت آب در کشاورزی فاریاب، معمولاً از آن چشم‌پوشی می‌شود. چنانچه دارای کیفیت مناسب باشد، می‌تواند با مدیریت و شرایط صحیح، به‌صورت درجا یا زهاب همراه با آب آبیاری مورد استفاده قرار گیرد (Li *et al.*, 2018). تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی در حال حاضر یکی از مشکلات بزرگ در راه توسعه کشاورزی کشور به‌ویژه در استان خوزستان است. در بسیاری از مناطق استان خوزستان، به‌دلیل بالا بودن سطح ایستابی و دمای بالای هوا، تبخیر از سطح خاک باعث اتلاف مقادیر زیادی از آب می‌گردد. به‌نحوی که در اثر تبخیر، آب زیرزمینی از عمق به سطح خاک آمده و منجر به تجمع املاح در سطح خاک می‌گردد (Izadpanah *et al.*, 2011). در نتیجه، شوری آب و خاک منجر به محدودیت رشد گیاهان می‌شود (Ramos *et al.*, 2012). استفاده از مالچ (خاکپوش) علاوه بر نگهداشت و ذخیره رطوبت در خاک، می‌تواند با محدود کردن تبخیر و کنترل جریان آب و گرما در خاک، شرایط و محیط موجود در نیمرخ خاک را تغییر دهد (Kader *et al.*, 2017). موادی که به‌عنوان مالچ در کشاورزی استفاده می‌گردند، عمدتاً به محل، هدف استفاده و در دسترس بودن آن بستگی دارد (Huang *et al.*, 2005). مالچ کاه و کلش با حفظ ساختمان خاک و تسهیل نفوذ آب باران، منجر به کاهش میزان رواناب و فرسایش خاک می‌گردد (Li *et al.*, 2018). همچنین کاه و کلش با کاهش جریان تبخیر از سطح به اتمسفر، نقش بسزایی در حفظ رطوبت

خاک دارد (Pramanik *et al.*, 2015). بر اساس نتایج اختر و همکاران (Akhtar *et al.*, 2019)، استفاده از مالچ گندم در مزارع سویا باعث نگهداشت ۷/۴ درصدی رطوبت خاک در مقایسه با خاک لخت گردیده است. همچنین طبق گزارش مک میلن (McMillen, 2013)، استفاده از مالچ کاه گندم، با ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر، باعث افزایش ۱۰ درصدی رطوبت خاک شده است. در پژوهشی دیگر، کای و همکاران (Cai *et al.*, 2015) دریافتند که کاه و کلش گندم منجر به افزایش کارایی مصرف آب و نگهداشت رطوبت در مقایسه با تیمارهای بدون پوشش در مزارع تحت کشت ذرت گردید. علاوه بر این، مالچ‌ها با تغییر ویژگی‌های حرارتی خاک، باعث کاهش نوسانات دمایی در پروفیل خاک می‌گردند. بنابراین، حرکت آب، املاح و گرما در نیمرخ خاک تحت مالچ‌های مختلف عمدتاً با پوشش سطحی، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی کنترل می‌شود.

ناحیه غیراشباع خاک به‌عنوان بخش جدانشدنی از چرخه هیدرولوژیکی، نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرآیندها مانند نفوذپذیری، ذخیره رطوبتی خاک، تبخیر، جذب آب توسط ریشه، تغذیه مجدد آب زیرزمینی، رواناب و فرسایش دارد (Simunek *et al.*, 2016). از سویی، بخش بزرگی از خاک‌ها و حجم چشمگیری از منابع آبی موجود در کشور، با درجات مختلف، به شوری مبتلا هستند. بنابراین، جهت آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در نیمرخ خاک، آزمایش‌های صحرایی وقت‌گیر و پرهزینه بوده و دامنه اعتبار آن‌ها از نظر شرایط فیزیکی و منطقه‌ای دارای محدودیت می‌باشد. امروزه مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی وضعیت رطوبتی در نیمرخ خاک بوده و می‌توان از آن‌ها در شرایط مختلف استفاده نمود (Mohammadi, 2001). یکی از ابزارهای پیشرفته در ارتباط با مدل‌سازی حرکت یک‌بعدی آب، املاح و گرمای خاک، نرم‌افزار HYDRUS-1D می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران (Simunek *et al.*, 1998) در آزمایشگاه شوری امریکا بسط داده شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی جریان آب و املاح در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و توانایی تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را دارد (Zhao *et al.*, 2010). باین‌حال، شبیه‌سازی عددی وجود مالچ در سطح خاک با استفاده از

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

این پژوهش در تابستان ۱۳۹۷ (از تاریخ ۱۳۹۷/۴/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱) بصورت لایسی‌متری در مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز با مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 48'$ شرقی و $18^{\circ} 31'$ شمالی و ارتفاع ۱۷ متر از سطح دریا اجرا شد. اهواز دارای تابستان‌های گرم و طولانی و زمستان‌های معتدل و کوتاه است و علت انجام کار در این بازه زمانی، حداکثر دما و پتانسیل تبخیر بود. براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی، میانگین سالیانه دمای اهواز ۲۶ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی سالیانه در این منطقه ۲۲۳ میلی‌متر و اقلیم منطقه مطابق با اقلیم نمای آمریکا، بیابانی گرم میانه است (Khuzestan Meteorological Organization, 2018). جدول ۱ پارامترهای هواشناسی شامل حداقل و حداکثر دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی را در بازه زمانی انجام آزمایش نشان می‌دهد.

در این آزمایش، با توجه به اجرای زهکش‌های زیرزمینی کم‌عمق در منطقه و شعاع حاصله از آن، عمق ۶۰ سانتی‌متر برای سطح ایستابی در نظر گرفته شد. دامنه شوری آب زیرزمینی در طول سال در محدوده ۲-۴۵ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است (Khuzestan Water and Power Authority, 2011). در این پژوهش، برای آب زیرزمینی، سه تیمار شوری $S_1=5$ ، $S_2=10$ و $S_3=15$ دسی‌زیمنس با افزودن نمک‌های سدیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید به آب آبیاری، اعمال گردید. در طراحی لایسی‌مترها، از لوله‌های پلی‌اتیلن (PVC) با قطر داخلی ۲۵ سانتی‌متر و طول ۷۵ سانتی‌متر استفاده گردید. جهت سهولت در حرکت آب و جلوگیری از گرفتگی منافذ لوله، در قسمت انتهایی هرکدام از این ستون‌ها، لایه‌ای از شن و ماسه به‌عنوان فیلتر قرار داده شد (Gowing et al., 2009). با توجه به این‌که این لایسی-مترها در سطح خاک قرار داشتند، به‌منظور جلوگیری از گرمای جانبی، از عایق پشم‌شیشه استفاده شد. در این مطالعه، به‌منظور ثابت نگه‌داشتن عمق سطح ایستابی، از یک مخزن مدرج و از دستگاهی که بر اساس اصول سیستم بطری ماریوت کار می‌کرد و آب را از مخزن به-

مدل HYDRUS-1D به دلیل تعاملات سطح مالچ-خاک و بررسی درست لایه‌های مرزی و تخمین دقیق تبخیر خاک، پیچیده می‌شود (Li et al., 2015; Simunek et al., 2016). پژوهش‌های پیشین نشان داده است که با تغییر در شرایط مرزی، می‌توان تأثیر مالچ‌های پلاستیکی و آلی بر روی توزیع رطوبت و گرما (Zhao et al., 2018) در خاک را با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D شبیه‌سازی نمود. طی پژوهشی کادسوا و همکاران (Kodesova et al., 2014) به شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با استفاده از HYDRUS-1D تحت پوشش چمن و پوست درختان پرداختند و دریافتند که بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، تفاوت ناچیزی وجود دارد. کادر و همکاران (Kader et al., 2019) با شبیه‌سازی مقدار رطوبت تحت کاه و کلش برنج در ژاپن دریافتند که نرم‌افزار HYDRUS مقدار رطوبت را با ضریب همبستگی بالا شبیه‌سازی نمود. علاوه بر این، مدل HYDRUS-1D توانایی بالایی در شبیه‌سازی رطوبت در نیمرخ خاک تحت تأثیر مالچ پلاستیکی دارد (Chen et al., 2018).

همان‌گونه که ذکر شد، اطلاع از حرکت عمودی آب در خاک تحت مدیریت‌های مختلف زراعی، جهت پیش‌بینی حرکت آب و سناریوهای مختلف، بسیار بااهمیت است. در استان خوزستان علاوه بر بالا بودن سطح ایستابی، مشکلات دیگری مانند شوری نیز وجود دارد که موجب کاهش کیفیت این آب‌ها گردیده است (Ramezani et al., 2016). با توجه به مطالعات اندک در زمینه بررسی تأثیر همزمان مالچ و آب زیرزمینی بر توزیع رطوبت و حرکت آب در خاک، این پژوهش به شبیه‌سازی اثر مالچ کاه و کلش بر روی توزیع رطوبت و جریان آب در خاک، تحت شوری‌های مختلف آب زیرزمینی کم‌عمق در خاک‌هایی با بافت متفاوت با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D می‌پردازد. در نهایت، یافته‌های شبیه‌سازی عددی با نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های دقیق در شرایط طبیعی مقایسه می‌گردد تا بتوان به ارزیابی منطقی از عملکرد HYDRUS-1D برای مدل‌سازی‌های آبی دست‌یافت.

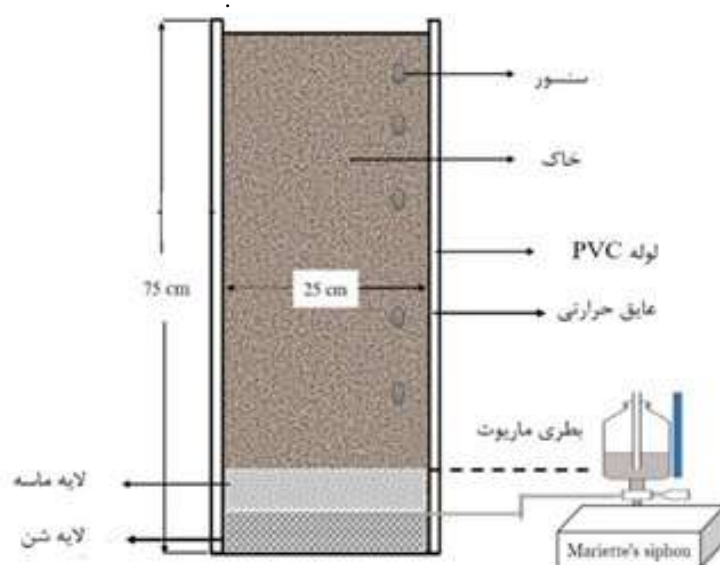
شیمیایی آن‌ها در جدول (۲) آمده است و در دو سطح پوشش خاک (با M1= بدون مالچ و M2= مالچ)، انجام گردید. جزئیات بیشتر آزمایش‌ها و تجهیزات مورد استفاده در پژوهش یوسفی و همکاران (Yusefi *et al.*, 2019) قابل مشاهده است.

وسیله لوله‌های رابط شفاف به درون لایسی‌مترها انتقال می‌داد، استفاده گردید (شکل ۱). همچنین برای تیمار-های مالچ از کاه و کلش گندم به مقدار ۳۵۰ گرم در مترمربع استفاده گردید. این پژوهش در دو خاک با بافت مختلف (شنی و لومی) که مشخصات فیزیکی و

جدول ۱- پارامترهای هواشناسی در مدت زمان انجام آزمایش

Table 1. The meteorological parameters during experiment

	(Sunshine hours)	Wind Speed (m s ⁻¹)	Relative Humidity (%)		Air temperature (°C)			
	Average	Average	Average	Max	Min	Average	Max	Min
June	11.8	8	19	68	3	40.6	52.4	26.9
August	11.6	9.2	15	37	6	39	50.2	27.6
September	10.9	6.4	36	92	8	37.2	48	25



شکل ۱- نمایی از لایسی‌مترهای مورد استفاده در این پژوهش

Figure 1. Experimental setup for the research

مورد نظر قرار گرفتند و نمونه‌های خاک در فواصل زمانی مختلف برداشت گردید. بدین ترتیب که پس از خروج آب ثقلی، اندازه‌گیری روزانه نمونه‌ها تا جایی که تغییرات رطوبت اندک باشد، ادامه یافت. هم‌زمان با اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه TDR، رطوبت خاک هر نمونه به روش وزنی اندازه‌گیری شد و در نهایت بهترین معادله بر داده‌های اندازه‌گیری شده، برازش داده شد. جهت اندازه‌گیری مقدار تبخیر در لایسی‌مترها، ساده‌ترین شکل تعادل آب در خاک که از رابطه توازن بین

اندازه‌گیری رطوبت و تبخیر از خاک

برای اندازه‌گیری توزیع رطوبت در نیمرخ خاک، از پراب-های دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتال خاک (TDR) مدل HD2 ساخت شرکت ایمکو آلمان (دقت ۱ درصد) استفاده گردید. بدین منظور، در عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک، مقدار رطوبت به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. باتوجه به اینکه در این آزمایش از دو خاک با بافت مختلف استفاده گردید، قبل از شروع آزمایش، کالیبراسیون پراب‌های TDR انجام شد. پراب‌ها در داخل گلدان‌هایی مجزا و در داخل خاک

هدایت هیدرولیکی غیراشباع (cm day^{-1}) را نشان می‌دهد. همچنین $S(z, h)$ مقدار جذب آب (برای مثال توسط ریشه) می‌باشد. مدل HYDRUS-1D از روش عناصر محدود برای حل معادلات فوق استفاده می‌نماید.

شرایط مرزی

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در HYDRUS-1D، تعیین شرایط مرزی ناحیه مورد بررسی می‌باشد. در این پژوهش، باتوجه به وجود آب زیرزمینی کم‌عمق (۶۰ سانتی‌متر)، شرط رطوبت ثابت برای پایین‌دست در نظر گرفته شد و برای شرایط مرزی بالادست، مجاورت با اتمسفر اعمال گردید. همچنین، اثر مالچ با تعریف یک لایه اضافی بر روی سطح خاک مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به اینکه پارامترهای هواشناسی رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، حداقل و حداکثر دما در ایستگاه هواشناسی به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شدند و برای شبیه‌سازی تبخیر در نرم‌افزار HYDRUS-1D نیاز به اندازه‌گیری دقیق‌تر این پارامترها می‌باشد، مقدار تبخیر روزانه اندازه‌گیری شده به‌وسیله بطری ماریوت، به‌عنوان ورودی به مدل داده شد. همچنین، مقدار رطوبت در روز ابتدایی آزمایش در عمق‌های مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر)، به‌عنوان شرایط اولیه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

بهبودسازی پارامترها

شبیه‌سازی عددی رطوبت خاک در بازه زمانی اول تیر تا انتهای شهریور در مدت ۳ ماه در تیمارهای مختلف انجام شد. در ابتدا، پارامترهای منحنی رطوبتی ون-گنوختن (van Genuchten, 1980)، $(n, \alpha, \theta_r, \theta_s)$ و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به روش حل معکوس به دست آمد. بدین منظور، در محیط برنامه RETC، با برآزش مدل منحنی رطوبتی بر داده‌های منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده، پارامترهای فوق تخمین زده شد (Homaei & Farrokhian Firouzi, 2008). از آنجایی که ممکن است خاک در طول مدت زمان انجام آزمایش دچار تغییراتی شود که بر روی پارامترهای هیدرولیکی تأثیرگذار هستند، مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با توجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، نمی‌تواند به‌عنوان مقادیر ثابت در مدل مورد استفاده قرار گیرند (Kader et

مقدار ورودی و خروجی آب می‌باشد، استفاده گردید که به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Hillel, 2004).

$$E_s = P + I + G_o - R_o - T_r - \Delta W \quad (1)$$

که در آن، E_s تبخیراز سطح خاک (میلی‌متر)، P مقدار بارندگی (میلی‌متر)، I مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، G_o مشارکت آب زیرزمینی در تبخیر (در اینجا مقدار آب مصرفی از بطری ماریوت)، R_o رواناب، T_r تعرق و ΔW تغییرات رطوبت در نیمرخ خاک (میلی‌متر) می‌باشد. با توجه به اینکه این پژوهش بصورت لایسی‌متری انجام شد، هیچ‌گونه آبیاری صورت نگرفت ($I=0$) و گیاهی کشت نشد ($T_r=0$). همچنین این مطالعه در تابستان انجام و بارندگی و مقدار رواناب نیز صفر بود.

تعیین منحنی رطوبتی خاک

برای رسم منحنی رطوبتی دو خاک فشاری در مکش-های ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر استفاده گردید (شکل ۲). پس از رسم منحنی رطوبتی، مدل ون‌گنوختن (van Genuchten, 1980) بر داده‌های بافت متفاوت، از دستگاه Sandbox در مکش‌های ۰/۱، ۲/۵، ۱۰، ۳۱/۵ و ۶۱ سانتی‌متر و دستگاه صفحات اندازه‌گیری شده برآزش داده شد و پارامترهای آن به روش معکوس برآورد شدند (رابطه ۲).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad (2)$$

که در آن؛ θ_s و θ_r به‌ترتیب رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، پارامتر α تقریباً برابر عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک (cm^{-1}) و n و m پارامترهای شکل منحنی هستند که $m=1-1/n$ در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-1D

حرکت آب در خاک در تیمارهای مختلف شوری آب زیرزمینی و مالچ با استفاده از مدل HYDRUS-1D شبیه‌سازی شد. معادله حاکم بر جریان آب در خاک معادله ریچاردز می‌باشد (رابطه ۳).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(z, h)$$

که در آن، θ رطوبت حجمی ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، h بار آبی (cm)، t زمان (روز)، z جهت عمودی (cm) و $K(h)$

نرم‌افزار هستند. در مرحله واسنجی، پس از وارد کردن مقادیر اولیه هر کدام از این متغیرها، نرم‌افزار به پردازش داده‌ها می‌پردازد و مقادیر نهایی را برآورد می‌نماید. در هر تکرار، همزمان با برآورد متغیرها، مقدار SSQ نیز محاسبه گردید. پس از هر بار اجرای نرم‌افزار، مجدداً مقادیر بهینه‌شده در مدل قرار گرفت و این عمل تا زمانی که مقدار SSQ به یک مقدار ثابت و حداقل میل کند، ادامه یافت.

ارزیابی مدل HYDRUS-1D

جهت ارزیابی شبه‌سازی عددی انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار و قابلیت کاربرد مدل در برآورد مقدار رطوبت در تیمارهای مختلف، از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید (روابط ۵ و ۶).

(۵)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I}_i)^2}$$

(۶)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}}$$

در این روابط، N تعداد مشاهدات، I_i مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده، \hat{I}_i مقدار پیش‌بینی شده برای داده موردنظر در خاک می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. مطابق این جدول، شوری اولیه در دو خاک لومی و شنی به ترتیب ۲/۶ و $1/8 \text{ dS m}^{-1}$ بوده است. شکل ۲ منحنی رطوبتی دو خاک با بافت شنی و لومی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک لومی و شنی به ترتیب ۱۰ و ۱ درصد می‌باشد.

آنالیز حساسیت

(al., 2019). بنابراین، نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای به‌دست‌آمده فوق می‌باشد. از آنجایی که این پژوهش در سه تکرار انجام گردید، از تکرار اول جهت واسنجی و تعیین پارامترهای مدل و از دو تکرار دیگر، برای اعتبار-سنجی مقادیر به‌دست آمده استفاده شد. در نهایت، جریان آب در خاک لخت لومی و شنی با استفاده از پارامترهای بهینه‌سازی شده، شبه‌سازی گردید. در تیمارهای تحت مالچ، یک لایه کاه و کلش در بالای سطح خاک باعث شد که نیم‌رخ خاک در این تیمارها از دو لایه تشکیل گردد. به‌طور معمول، کاه و کلش همانند یک لایه خاک با بافت درشت عمل می‌کند. بنابراین، رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی بزرگ‌تری نسبت به خاک‌های مورد آزمایش، به‌عنوان مقادیر اولیه آن‌ها برای بهینه‌سازی انتخاب شدند. به‌طور کلی، لایه کاه و کلش در مقایسه با خاک دارای تخلخل و هدایت هیدرولیکی بیشتر است (Kodesova et al., 2014). در تیمارهای تحت مالچ در هر دو خاک شنی و لومی، بهینه‌سازی نهایی پارامترهای توابع هیدرولیکی برای لایه مالچ ($n, l, \theta_r, \theta_s, \alpha, K_s$) با استفاده از روش حل معکوس و داده‌های اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های حاوی خاک پوشیده شده با مالچ شبه‌سازی شد. در این تیمارها نیز از تکرار اول جهت واسنجی، و تکرارهای بعد برای صحت‌سنجی استفاده شد.

از میان پارامترهای مختلف هیدرولیکی، با استفاده از تحلیل حساسیت، پارامترهای اصلی که با تغییر مقدار آن‌ها نتایج مدل دستخوش تغییرات می‌شوند، شناسایی شد. در مرحله بعد، این پارامترها به‌روش حل معکوس بهینه شدند. در روش حل معکوس، اطلاعات رطوبتی دو خاک مختلف در نقاط مشاهده‌ای و در زمان‌های مختلف برای مدل تعریف شد و مقادیر بهینه خصوصیات هیدرولیکی، توسط نرم‌افزار واسنجی شد. ملاک عمل برای به پایان رساندن اجرای برنامه و قبول پارامترهای تعیین شده توسط مدل، نمایه SSQ می‌باشد که به‌صورت رابطه ۴ تعریف گردید.

(۴)

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (X_{i_{obs}} - X_{i_{sim}})^2$$

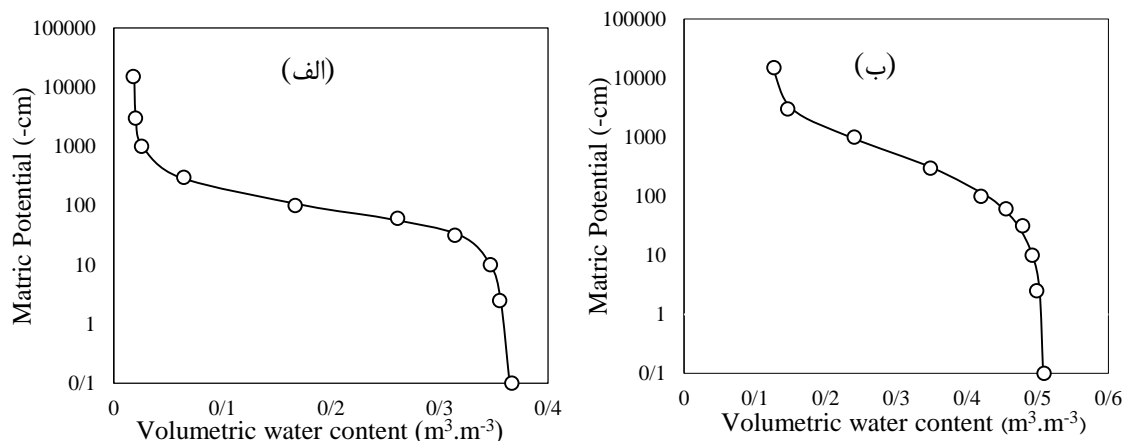
که در آن، $X_{i_{obs}}$ و $X_{i_{sim}}$ به‌ترتیب مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی و مقادیر شبه‌سازی شده به‌وسیله

(Abbasi *et al.*, 2003) دریافتند که دو پارامتر رطوبت باقی مانده (θ_r) و l به عنوان پارامترهای غیرحساس، کمترین تأثیر را در شبیه سازی حرکت آب در خاک به روش حل معکوس داشته و بهتر است در فرآیند مدل سازی به روش معکوس، از بهینه سازی این دو پارامتر صرف نظر نمود. از سوی دیگر، بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، رطوبت اشباع (θ_s) به صورت مستقیم قابل اندازه گیری بوده است. بنابراین، می توان این پارامتر را در مقدار اندازه گیری شده ثابت فرض نمود.

تحلیل حساسیت یکی از جنبه های مهم در مدل سازی به روش حل عددی است. نتایج آزمون حساسیت رطوبت در خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن ($\theta_r, \theta_s, Ks, n, l, \alpha$)، دو خاک شنی و لومی نشان داد که کمترین ضریب حساسیت در خاک لومی و شنی به ترتیب مربوط به رطوبت باقی مانده (θ_r) و پارامتر l و بیشترین ضریب حساسیت در این دو خاک، به ترتیب مربوط به پارامتر شکل منحنی رطوبتی (n) و پارامتر α می باشد. در پژوهشی عباسی و همکاران

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه
Table 2. Physical and chemical properties of studied soils

Properties	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	θ_{FC} (%)	θ_{pwp} (%)	ρ_s (g cm ⁻³)	ρ_b (g cm ⁻³)	EC (dS m ⁻¹)	pH
Loam	46	32	22	23	11	2.57	1.45	2.6	7.75
Sand	88	8	4	9	1	2.65	1.59	1.8	7.5



شکل ۲- منحنی رطوبتی خاک شنی (الف) و خاک لومی (ب)
Figure 2. Soil moisture retention curve of sandy (a) and loamy (b) soils

تفاوت زیادی مشاهده نشد. به طور کلی، مقدار θ_r تا حد زیادی به بافت خاک بستگی دارد. به همین دلیل، مقدار آن در تیمارها متفاوت نبود و در نتیجه بر شبیه سازی رطوبت تأثیر نمی گذارد (Simunek *et al.*, 1998; Ramos *et al.*, 2012). ویژگی های هیدرولیکی لایه کاه و کلش در بالای سطح خاک شنی و لومی نشان داد که مالچ دارای هدایت هیدرولیکی و رطوبت اشباع بیشتری در مقایسه با خاک می باشد (جدول ۳). همچنین، مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی در خاک لومی نشان داد که با افزایش مقدار شوری آب زیرزمینی، این پارامتر افزایش

در نهایت با کاهش تعداد پارامترهایی که برای بهینه سازی در مدل مورد استفاده قرار می گیرند، احتمال دستیابی به پاسخ های بهینه و با درصد اطمینان بیشتر و در زمان کوتاه تر توسط نرم افزار HYDRUS افزایش یافت (Hopmans *et al.*, 2002). مقادیر تخمین زده شده پارامترهای هیدرولیکی در دو بافت مختلف و مقادیر بهینه این پارامترها در تیمارهای مختلف برای خاک شنی و لومی و لایه کاه و کلش در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق این جدول، مقدار رطوبت باقی مانده بین تیمارهای مختلف در هر دو خاک شنی و لومی،

بهبود ساختمان خاک و قابلیت بیشتر انتقال آب در خاک لومی و کاهش آن در خاک شنی شده است (Gholizadeh & Speakhah, 2013).

پیدا نمود. در صورتی که در خاک شنی، با افزایش شوری، این پارامتر کاهش یافت. در واقع، شوری با تأثیر بر ساختمان خاک و شکل و اندازه منافذ خاک، منجر به

جدول ۳- مقادیر تخمینی و بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی پوشش مالچ و خاک‌های مختلف با نرم‌افزار HYDRUS-1D.
Table 3. Estimated and HYDRUS-1D-optimized values of hydraulic parameters of straw mulch and different soil textures

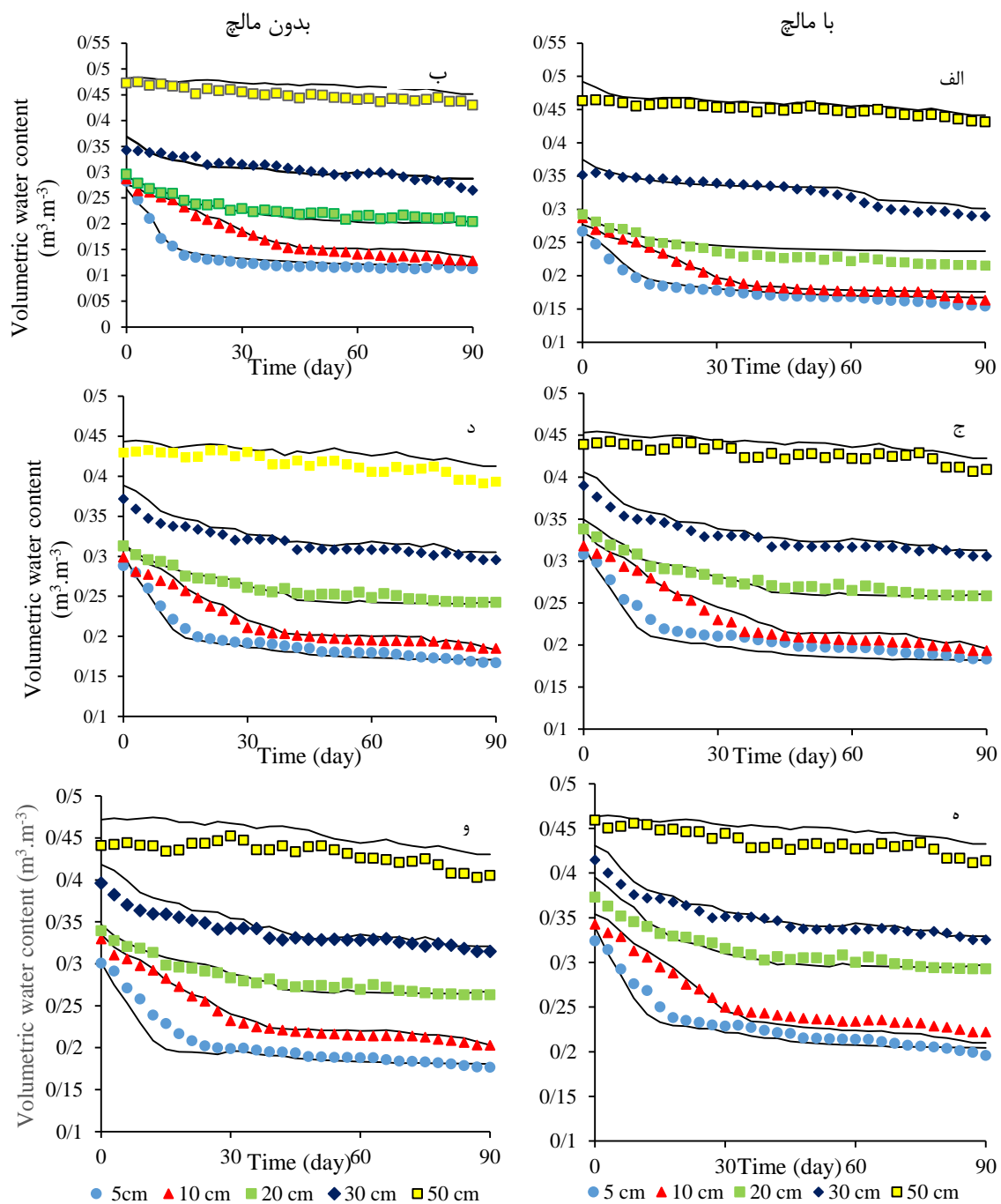
Treatment	Straw mulch	Loam				Sand					
		θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	Ks	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	Ks
Soil layer		0.07	0.51	0.09	1.21	16	0.01	0.36	0.012	1.71	120
Straw layer		0.002	0.75	0.55	1.45	486	0.001	0.69	0.55	1.56	473
S1	Mulch	0.068	0.43	0.061	1.26	16	0.01	0.37	0.037	1.93	235
	No mulch	0.068	0.42	0.071	1.21	16	0.01	0.35	0.034	2.03	239
S2	Mulch	0.07	0.44	0.065	1.24	17.4	0.01	0.40	0.04	1.87	230
	No mulch	0.072	0.43	0.062	1.25	18	0.01	0.37	0.036	1.91	232
S3	Mulch	0.072	0.46	0.069	1.26	21	0.01	0.41	0.039	1.83	215
	No mulch	0.072	0.44	0.065	1.22	21.7	0.01	0.40	0.036	1.88	217

S1، S2 و S3 به ترتیب آب زیرزمینی با شوری‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد و واحد هدایت هیدرولیکی سانتی‌متر در روز می‌باشد.

اندکی بین روزهای اول آزمایش روی داد و در روز بیستم، به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش رطوبت با و بدون پوشش مالچ صورت پذیرفت و تا پایان آزمایش در همین حدود باقی ماند. در لایه‌های پایین‌تر، تغییرات رطوبت تا پایان دوره آزمایش در هر دو تیمار اندک بود و تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار رطوبت خاک مشاهده نگردید (تقریباً در حدودی که هنگام شروع آزمایش بود، باقی ماند). دلیل آن احتمالاً نزدیک بودن به سطح ایستابی، خیز موئینگی و جبران کاهش رطوبت از سطح ایستابی در این ناحیه است. نتایج پژوهش جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2015) نیز نشان داد که تغییرات رطوبت در عمق‌های نزدیک به سطح آب زیرزمینی، بسیار اندک می‌باشد. در خاک شنی و بدون پوشش مالچ (شکل ۴ ب)، تغییرات رطوبت در روزهای ابتدایی آزمایش در لایه ۵ سانتی‌متری سطحی خاک بسیار سریع بود و کاهش رطوبت به ۶۰ درصد رسید و در روز پانزدهم، به $3/65 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ رسید و تا پایان آزمایش ثابت ماند. مقدار رطوبت خاک در حضور مالچ (شکل ۴ الف) در ۵ روز ابتدایی ۴۱ درصد کاهش پیدا نمود. نتایج نشان داد که پوشش مالچ باعث حفظ و نگهداشت رطوبت در حدود ۲۰ درصدی در لایه سطحی خاک شنی در مقایسه با خاک لخت گردید.

توزیع رطوبت در نیمرخ خاک

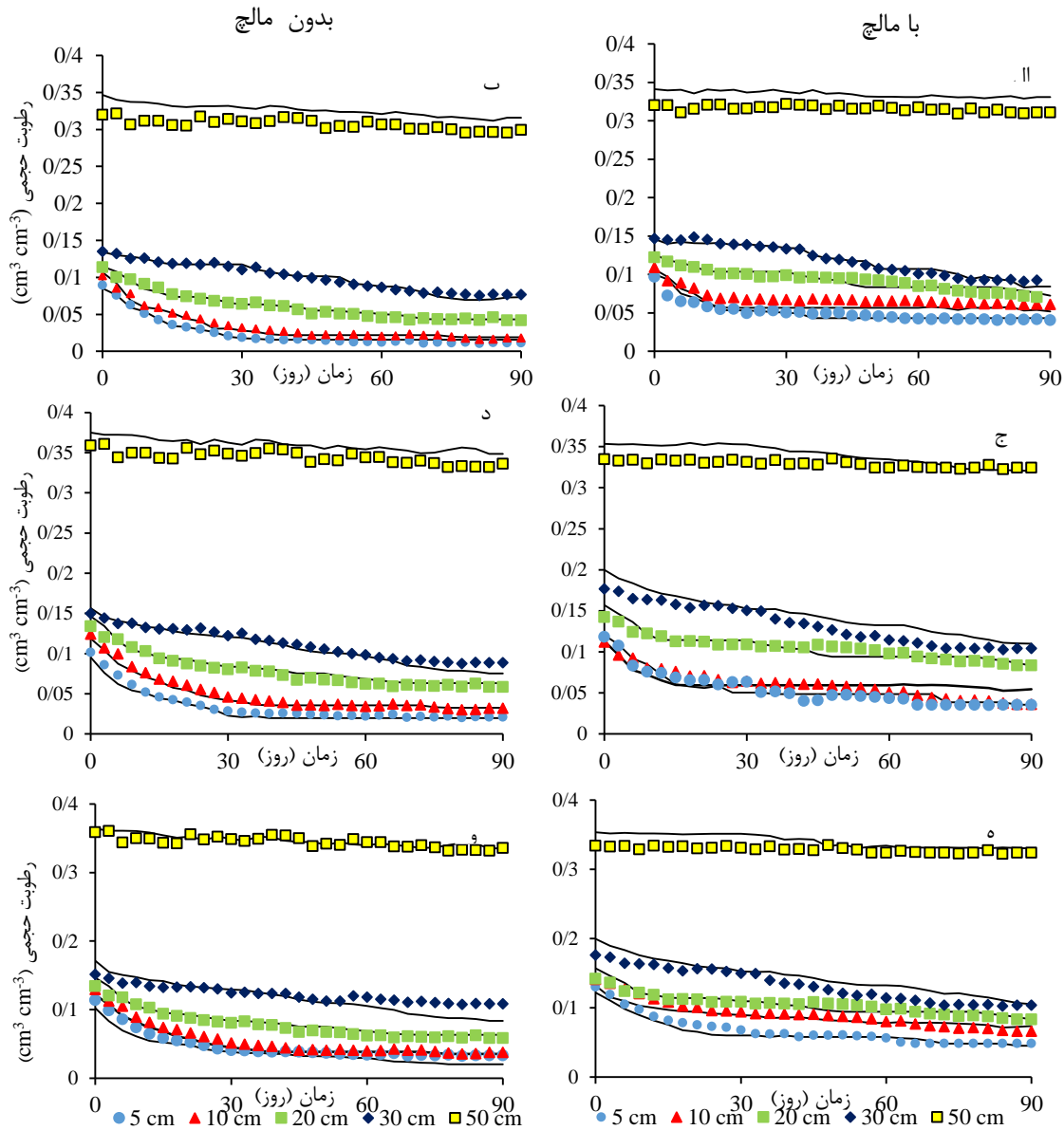
شکل‌های ۳ و ۴ داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده را به تفکیک عمق در سه شوری آب زیرزمینی (۵، ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر) با و بدون مالچ در دو خاک شنی و لومی در بازه زمانی ۹۰ روزه نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت خاک با نزدیک شدن به سطح خاک کاسته شده است، اما شدت تغییرات در لایه‌های سطحی بیشتر از تغییر در لایه‌های نزدیک به سطح ایستابی بوده است (Rose et al., 2005). در شکل ۳ الف) مشاهده می‌گردد که رطوبت حجمی در عمق ۵ سانتی‌متری خاک لومی ۱۰ روز پس از شروع آزمایش از $26/68 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به $22/71 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ رسید و در حدود ۱۶ درصد کاهش رطوبت داشته است. در صورتی که در همان عمق و در تیمار بدون مالچ (شکل ۳ ب)، رطوبت ۳۱ درصد کاهش یافته است. این موضوع به این دلیل است که پوشش مالچ با کاهش مقدار تبخیر سطحی، منجر به حفظ و نگهداشت رطوبت در نیمرخ خاک گردیده است. در عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک و با گذشت ۱۰ روز، رطوبت این لایه به ترتیب در حضور و بدون حضور مالچ (شکل ۳ الف و ب)، از $28/53 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به $25/07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و از $28/24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به $22/54 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ رسیده است و در پایان دوره، کاهش اندکی در رطوبت رخ داده است. در لایه ۲۰ سانتی‌متری، کاهش رطوبت



شکل ۳- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در خاک لومی، در تیمارهای با و بدون پوشش مالچ به ترتیب در شوری آب زیرزمینی ۵ (الف، ب)، شوری ۱۰ (ج، د) و شوری 15 dS m^{-1} (ه، و).

Figure 3. Measured and simulated soil-moisture content in loam soil, mulch and no mulch cover in S1 (a, b), S2 (c, d) and S3 (e, f).

نقاط رنگی، مقدار اندازه‌گیری شده و خطوط ممتد (—)، مقدار شبیه‌سازی شده در عمق‌های مختلف می‌باشد.



شکل ۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده در خاک شنی، در تیمارهای با و بدون پوشش مالچ به ترتیب در شوری آب زیرزمینی ۵ (الف، ب)، شوری ۱۰ (ج، د) و شوری ۱۵ dS m⁻¹ (ه، و).

Figure 4. Measured and simulated soil-moisture content in sand, mulch and no mulch cover in S1 (a, b), S2 (c, d) and S3 (e, f).

نقاط رنگی، مقدار اندازه‌گیری شده و خطوط ممتد (—)، مقدار شبیه‌سازی‌شده در عمق‌های مختلف می‌باشد.

در شکل ۳ (ج، د) مشاهده می‌شود، در شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر، درصد رطوبت حجمی در لایه سطحی خاک لومی بدون پوشش پس از ۱۰ روز، ۹ درصد نسبت به خاک دارای پوشش کمتر بوده است و سپس در روزهای بعدی، کاهش اندکی پیدا نمود. اما در خاک شنی، رطوبت حجمی در این لایه (۵ سانتی متری سطحی)، ۲۰ درصد در مقایسه با خاک دارای پوشش در این شوری، کاهش پیدا نمود (شکل ۳ و ۴، ج، د) و در لایه‌های زیرین حالت نسبتاً ماندگاری داشت و تقریباً ثابت باقی ماند. در مورد تیمارهای مختلف با شوری آب زیرزمینی ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، تغییرات رطوبتی

در پژوهشی کادر و همکاران (Kader *et al.*, 2017) دریافتند که استفاده از کاه و کلش به‌عنوان مالچ، باعث حداکثر نگهداشت آب در ۵ سانتی‌متر لایه سطحی خاک و در نتیجه افزایش بهره‌وری آب گردید. به‌طور مشابه، در لایه دوم پس از روز پانزدهم، رطوبت ۳۶ و ۵۰ درصد به ترتیب در حضور و عدم حضور مالچ در این خاک کاهش پیدا کرد. در لایه‌های زیرین (عمق پایین‌تر از ۲۰ سانتی‌متری) در هر دو تیمار خاک شنی، رطوبت خاک تقریباً ثابت بود که مقدار آن در اعماق مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است و پوشش مالچ بر مقدار رطوبت لایه‌های پایین‌تر، تقریباً بی‌اثر بوده است. همان‌گونه که

(al) نیز نشان داد که مدل HYDRUS-1D در رطوبت-های بالا، مقدار شبیه‌سازی را بیش از مقدار واقعی نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان داد که در شوری 15 dS m^{-1} در خاک شنی، در لایه‌های سطحی (عمق‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری)، مقدار رطوبت شبیه‌سازی‌شده با مدل HYDRUS-1D در روزهای ابتدایی آزمایش، کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده بود. اما پس از روز سی‌ام آزمایش، مطابقت بیشتری پیدا نمود. در پژوهشی ساغلام و همکاران (Saglam et al., 2017)، با شبیه‌سازی رطوبت با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D، دریافتند که در عمق ۱۰ سانتی‌متری، بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده تفاوت اندکی وجود داشت. اما در عمق ۲۰ سانتی‌متری، مقادیر اندازه‌گیری شده بیش از مقدار شبیه‌سازی‌شده با مدل بود. جدول ۴ میزان ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار HYDRUS-1D را در تیمار-های مختلف شوری و مالچ در دو خاک لومی و شنی نشان می‌دهد. گزینه‌ای که دارای مقادیر RMSE کوچک‌تر و R^2 بزرگ‌تری باشد، از خطای شبیه‌سازی کمتری برخوردار است. با توجه به این جدول، در خاک لومی بدون پوشش مالچ و در شوری آب زیرزمینی 5 m^{-1} ، بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با ضریب R^2 بالا (۰/۹۷) و RMSE کم (۰/۳۲۱)، همبستگی بیشتری وجود داشت و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار، به داده‌های اندازه‌گیری نزدیک‌تر بود. همچنین در این خاک، کمترین همبستگی مربوط به خاک دارای پوشش کاه و کلش و با شوری آب زیرزمینی 15 dS m^{-1} با ضریب تبیین ۰/۹۰ بوده است. در خاک شنی نیز در تیمار شوری ۵ و ۱۰ و در حضور مالچ، به ترتیب بیشترین و کمترین همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، ۰/۹۷ و ۰/۸۹ مشاهده شد. محمدی و دلبری (Mohammadi & Delbari., 2015) در تحقیقی از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک استفاده کردند و مقدار متوسط ضریب R^2 را ۰/۷۳ بدست آوردند. آن‌ها همچنین بیان نمودند که مدل تمایل دارد رطوبت را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کند.

همانند تیمارهای شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. تنها تفاوت در مورد لایه‌های سطحی در خاک لومی بود (شکل ۳ ه، و). این شکل نشان می‌دهد که با افزایش شوری آب زیرزمینی، درصد رطوبت حجمی افزایش جزئی داشته است که ظاهراً به دلیل تجمع بیشتر نمک در سطح خاک و در اثر ایجاد پوسته نمکی در لایه سطحی، از شدت تبخیر کاسته شده و رطوبت کمتری از سطح خاک خارج گردیده است. با در نظر گرفتن اطلاعات به‌دست آمده در این پژوهش، به نظر می‌رسد که حرکت آب در اثر صعود موئینگی در خاک، با افزایش غلظت محلول خاک، کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از افزایش ویسکوزیته آب باشد. علاوه بر این، تغییر اندک رطوبت در لایه‌های فوقانی خاک تحت شوری زیاد آب زیرزمینی، می‌تواند به دلیل بالا بودن نیروی مکش خاک در حفظ و نگهداشت رطوبت باشد. جلیلی و همکاران (Jalili et al., 2011) با بررسی شوری‌های مختلف آب زیرزمینی، دریافتند که با افزایش شوری آب زیرزمینی، مقدار رطوبت در پروفیل خاک در مقایسه با تیمارهایی با شوری کمتر، بیشتر شد. نتایج این پژوهش با سایر مطالعات در زمینه بررسی سطوح مختلف شوری سطح ایستابی بر مقدار رطوبت در نیم‌رخ خاک، مشابهت دارد (Rose et al., 2005; Gowing et al., 2009).

شبیه‌سازی رطوبت در نیم‌رخ خاک

پس از وارد نمودن مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک در نرم‌افزار، با استفاده از برنامه HYDRUS-1D، تغییرات روزانه مقدار رطوبت در عمق‌های مختلف ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری در تیمارهای مختلف در بازه زمانی ۳ ماهه شبیه‌سازی شد. شکل‌های ۳ (خاک لومی) و ۴ (خاک شنی) مقایسه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، در عمق‌های نزدیک به سطح زمین که دارای رطوبت کمتری هستند، در همه تیمارها، داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار HYDRUS با داده‌های واقعی مطابقت دارند. این در حالیست که در لایه‌های پایین (عمق ۵۰ سانتی‌متر)، به دلیل نزدیکی به سطح آب زیرزمینی که دارای رطوبت بالایی هستند، داده‌های شبیه‌سازی‌شده مقدار رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی برای همه تیمارهای تحت شوری آب زیرزمینی نشان می‌دهد. یافته‌های کادر و همکاران (Kader et al., 2019)

جدول ۴- عملکرد مدل HYDRUS-1D در شبه‌سازی مقدار رطوبت در تیمارهای مختلف

Table 4. Performance of HYDRUS-1D in simulating soil-moisture content in different treatments.

Saline water table	Cover	Loam		Sand	
		R ²	RMSE	R ²	RMSE
S1 (5 dS m ⁻¹)	Mulch	0.9537	0.0273	0.9711	0.0328
	No mulch	0.9729	0.0321	0.9609	0.0281
S2 (10 dS m ⁻¹)	Mulch	0.9438	0.0395	0.8935	0.0521
	No mulch	0.9673	0.0121	0.9326	0.0403
S3 (15 dS m ⁻¹)	Mulch	0.9021	0.0489	0.9103	0.0129
	No mulch	0.9218	0.0422	0.9425	0.0267

با گذشت زمان و کاهش رطوبت خاک، گرادیان مکش افزایش یافته و فرآیند خیز موئینگی از سطح ایستایی به سطح خاک شروع می‌شود. از این به بعد، شرایط اقلیمی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی، تعیین کننده مقدار تبخیر می‌باشند. همچنین با توجه به شرایط خاک، مقدار تبخیر به بافت خاک، مقدار رطوبت اولیه، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت نگهداشت آب، وضعیت زهکشی و سطح آب زیرزمینی بستگی دارد (Steenhuis *et al.*, 2005). از آنجایی که بافت خاک یکی از پارامترهای مهم در نگهداشت رطوبت و تبخیر از خاک می‌باشد، خاک‌های ریزبافت آب بیشتری را نسبت به خاک‌های درشت بافت نگه می‌دارند و در نتیجه، میزان تبخیر آن‌ها بیشتر است (Shokri & Salvucci, 2011). همچنین خاک‌های شنی حساسیت بیشتری در برابر تغییرات ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به خاک‌های ریزبافت دارند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که خاک شنی در مقایسه با خاک لومی، سریعتر آب خود را از دست داد و لایه‌های سطحی سریع‌تر خشک شدند. علاوه بر این، مقدار تبخیر خاک شنی به دلیل کمتر بودن ارتفاع صعود موئینگی به مراتب کمتر از خاک‌های لومی و رسی است (Li *et al.*, 2013; Nachshon *et al.*, 2011). تصور بر این است که جریان رو به بالای ناشی از خیز موئینگی، در خاک‌های ریز بافت مدت زمان طولانی‌تری ادامه می‌یابد، قبل از اینکه منافذ آن‌ها کاملاً خشک شود. با خشک شدن منافذ خاک، اتلاف بخار آب به صورت پخشیدگی درون خاک رخ می‌دهد (Shokri & Sulvucci, 2011; Lehman *et al.*, 2018). این امر باعث ایجاد جریان رو به بالا آب از سطح ایستایی می‌گردد و در نتیجه منجر به افزایش مقدار تبخیر در همه تیمار-های خاک لومی نسبت به خاک شنی گردید.

شبه‌سازی تبخیر از سطح خاک

جدول ۵ مقادیر اندازه‌گیری و شبه‌سازی تبخیر تجمعی در شوری‌های مختلف آب زیرزمینی در دو بافت مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری، بیشترین مقدار تبخیر در هر دو بافت خاک از سطح خاک بدون پوشش و با شوری آب زیرزمینی ۵ dS m⁻¹ و حداقل تبخیر در شوری ۱۵ dS m⁻¹ و خاک دارای پوشش مالچ بوده است. در شوری آب زیرزمینی ۵ دسی‌زیمنس بر متر (S1)، پوشش مالچ به ترتیب باعث کاهش ۲۷ و ۸ درصدی در مقدار تبخیر از خاک‌های لومی و شنی شده است. با اندازه‌گیری سطح آب در مخازن مدرج و محاسبه بیلان آبی در ستون خاک، میزان تبخیر تجمعی برای خاک لومی بدون پوشش مالچ در سه شوری S1، S2 و S3 به ترتیب برابر با ۳۳۹ و ۲۸۴ و ۱۸۷ میلی‌متر و در خاک شنی بدون پوشش، ۲۱۱، ۱۸۵ و ۱۱۹ میلی‌متر بدست آمد. این نتایج نشان داد که با افزایش شوری آب زیرزمینی، میزان تبخیر تجمعی از سطح خاک کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر تبخیر تجمعی اندازه‌گیری و شبه‌سازی در خاک لومی نشان داد که در شوری ۵ dS m⁻¹ آب زیرزمینی، نرم‌افزار HYDRUS-1D مقدار تبخیر را بیش از مقدار اندازه‌گیری، شبه‌سازی نمود. در صورتی که در شوری‌های ۱۰ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، مقدار تبخیر را بیش از مقدار واقعی، برآورد نمود. در خاک شنی نیز در شوری کم (۵ dS m⁻¹)، مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده در هر دو تیمار با و بدون پوشش مالچ، کمتر از مقدار شبه‌سازی بود. اما در شوری‌های آب زیرزمینی ۱۰ و ۱۵ dS m⁻¹، از روند خاصی پیروی ننمود. بطور کلی، در روزهای ابتدایی آزمایش که رطوبت در نیمرخ خاک بالا بود، نرخ تبخیر زیاد و نقش سطح ایستایی در میزان تبخیر از سطح خاک کم بود. در واقع رطوبت کافی برای تبخیر در خاک وجود داشت. در نتیجه، شدت تبخیر در روزهای ابتدایی آزمایش زیاد بود.

جدول ۵ - مقدار تبخیر تجمعی در تیمارهای مختلف (S1, S2 و S3 به ترتیب شوری آب زیرزمینی ۵، ۱۰ و ۱۵ dS m⁻¹).
 Table 5. The amount of cumulative actual evaporation in different treatments. (S1, S2 and S3 are salinity of groundwater with EC 5, 10 and 15 dS m⁻¹).

Saline water table	Cover	observed		Simulated	
		Loamy	Sand	Loamy	Sand
S1 (5 dS m ⁻¹)	Mulch	246	193	232	208
	No mulch	339	211	312	230
S2 (10 dS m ⁻¹)	Mulch	210	173	215	179
	No mulch	284	185	302	202
S3 (15 dS m ⁻¹)	Mulch	153	119	161	113
	No mulch	187	130	192	118

در نیمرخ خاک شور در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر شد. مقایسه مقدار تبخیر تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان داد که در شوری‌های کم آب زیرزمینی، نرم افزار HYDRUS-1D مقدار تبخیر را بیش از مقدار اندازه‌گیری شبیه‌سازی نمود. در صورتی که در شوری‌های ۱۰ و ۱۵ دسی زیمنس بر متر، مقدار تبخیر را بیش از مقدار واقعی برآورد نمود. نتایج این پژوهش اهمیت آب زیرزمینی در تامین بخشی از آب در کشاورزی و استفاده از مالچ بر حفظ و ذخیره رطوبت و کاهش تبخیر از سطح خاک را در شرایط خشک و نیمه-خشک نشان داد که بیانگر ضرورت مطالعات بیشتر در این زمینه است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از دانشگاه شهید چمران اهواز و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح پژوهشی شماره ۹۷۰۱۱۳۳۹) به دلیل حمایت‌های مالی و همچنین از پروفسور Jirka Simunek بخاطر نظرات ارزشمندشان، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

- Abbasi F., Simunek J., Feyen J., Van Genuchten M.T., and Shouse P.J. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil. *Transaction of ASAE*. 46(4): 1085-1095.
- Akhtar K., Wang W., Khan A., Ren G., Afridi M.Z., and Feng Y. 2019. Wheat straw mulching offset soil moisture deficient for improving physiological and growth performance of summer sown soybean. *Agricultural Water Management*. 211 (1): 16-25.
- Bargahi K., and Moosavi S.A. 2006. Effects of shallow water table and groundwater salinity on contribution of groundwater to evapotranspiration of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in Greenhouse. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 10(3): 59-73. (In Persian)
- Cai T., Zhang Y., Huang H., Huang B., Yang Z., and Zhao C. 2015. Effects of different straw mulch modes on soil water storage and water use efficiency of spring maize (*Zea mays* L.) in the Loess Plateau of China. *Plant Soil Environmental*. 61(6): 253-259.

بنابراین، تبخیر به عنوان یک محرک مهم در جریان آب، املاح و حرارت بین لایه‌های سطحی خاک عمل می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر مالچ کاه و کلش بر رطوبت در نیمرخ خاک و شبیه‌سازی حرکت آن با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D تحت سطوح مختلف شوری آب زیرزمینی بود. پس از بدست آمدن پارامترهای هیدرولیکی بهینه، شبیه‌سازی توزیع رطوبت در نیمرخ خاک با مدل عددی انجام شد. مقادیر بالای R² در همه تیمارها، همبستگی بالایی بین مقدار رطوبت نیمرخ خاک اندازه‌گیری شده طی مدت ۹۰ روز و برآورد شده با برنامه HYDRUS-1D نشان داد. علاوه بر این، پوشش مالچ با کاهش مقدار تبخیر سطحی، منجر به حفظ و نگهداشت رطوبت در نیمرخ خاک گردید. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش شوری آب زیرزمینی، در لایه‌های سطحی، به دلیل تجمع بیشتر نمک در سطح خاک و ایجاد پوسته نمکی، از شدت تبخیر کاسته شده و رطوبت کمتری از سطح خاک خارج گردید. علاوه بر این، با افزایش غلظت محلول خاک، به دلیل افزایش ویسکوزیته آب و کاهش صعود موئینگی، مقدار رطوبت

- Chen B., Liu E., Mei X., Yan C., and Garré S. 2018. Modelling soil water dynamic in rain-fed spring maize field with plastic mulching. *Agriculture Water Management*. 198: 19-27.
- Chitsazan M., and Akhtari Y. 2006. Evaluating the potential of groundwater pollution in kherran and zoweircherry plains through GIS-based DRASTIC model. *Journal of Water and Wastewater*. 17: 39-51. (In Persian)
- Gholizadeh S., and Sepaskhah A.R. 2013. Effect of zeolite and saline water application on saturated hydraulic conductivity and infiltration in different soil textures. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 59(5): 753-764.
- Gowing J.W., Rose D.A., and Ghamarnia H. 2009. The effect of salinity on water productivity of wheat under deficit irrigation above shallow ground water. *Agriculture Water Management*. 96(3): 517-524.
- Hillel D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. 22nd Ed. Academic Press, USA, 801p.
- Homaee M., and Farrokhian Firouzi A. 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 219-227.
- Hopmans J.W., Simunek J., Romano, N., and Durner W. 2002. Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse methods. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. (J.H. Dane and G.C. Topp, Eds.). SSSA Book Series. 5, pp. 963-1008.
- Huang Y.L., Chen L.D., Fu B.J., Huang Z.L., and Gong E. 2005. The wheat yields and water-use efficiency in the loess plateau: straw mulch and irrigation effects. *Agriculture Water Management*. 72: 209 - 222.
- Izadpanah Z., Behzad M., and Heidari S. 2011. Status of exploitation of groundwater aquifers in Khuzestan province for agricultural purposes. *5th National Conference on Watershed Management and Water Resources Management of the country*, pp. 172-177. (In Persian)
- Jalili S. 2011. Evaluation of salinity effects of groundwater on salt accumulation in bare soil. Ph.D. dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
- Jiang J., Zhao L., Zeng Y., and Zhai Z. 2015. Experimental study of the effect of shallow groundwater table on soil thermal properties. *Front Earth Science*. 12: 1-9.
- Kader M.A., Nakamura K., Seng M., Mojidi M.A., and Kawashima S. 2019. Numerical simulation of water- and heat-flow regimes of mulched soil in rain-fed soybean field in central Japan. *Soil and Tillage Research*. 191: 142-155.
- Kader M.A., Seng M., Mojidi M.A., and Nakamura K. 2017. Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan. *International Soil Water Conservation Research*. 168: 155 - 166.
- Khuzestan Meteorological Organization. 2018. Technical Meteorological Newsletter. (In Persian)
- Khuzestan Water and Power Authority. 2011. Report of semi-detailed soil studies in south Ahvaz (East Karun). (In Persian)
- Kodesova R., Fer M., Klement A., Nikodem A., Tepla D., Neuberger P., and Bures P. 2014. Impact of various surface covers on water and thermal regime of Technosol. *Journal of Hydrology*. 519: 2272 - 2288.
- Lehman P., Merlin O., Gentine P., and or, D. 2018. Soil texture effects on surface resistance to bare soil evaporation. *Geophysical Research Letters*. 45(3): 23-31.
- Li H., Yi J., Zhang J., Zhao Y., Si B., Hill R.L., Cui L., and Liu X. 2015. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe arid wetland, Gansu, China. *Water (Switzerland)*. 7: 2382-2401.
- Li Q., Li H., Zhang L., Zhang S., and Chen Y. 2018. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: a meta-analysis. *Field Crop Research*. 221: 50 - 60.

- Li X., Scott X., and Salifu K.F. 2013. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. *Environmental Review*. 22: 41–50.
- McMillen M. 2013. The Effect of Mulch Type and Thickness on the Soil Surface Evaporation Rate. *California Polytechnic State University, USA*.
- Mohammadi E., and Delbari M. 2015. Simulation of water and salt transport in soil using the HYDRUS-1D software. *Water and soil science*. 25(1): 67-78. (In Persian)
- Mohammadi K. 2001. Numerical solution of one dimensional unsaturated water flow using a reference-operators method. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 5(1): 31-38. (In Persian)
- Nachshon U., Weisbrod N., Dragila M.I., and Grader A. 2011. Combined evaporation and salt precipitation in homogeneous and heterogeneous porous media. *Water Resources Research*. 47(3): 13-35.
- Pramanik P., Bandyopadhyay K.K., Bhaduri D., Bhattacharyya R., and Aggarwal P. 2015. Effect of mulch on soil thermal regimes - a review. *International Journal of Agriculture Environment Biotechnology*. 8: 645-651.
- Ramos T.B., Simunek J., Goncalves M.C., Martins J.C., Prazeres A., and Pereira L.S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agriculture Water Management*. 111: 87–104.
- Rose D., Konukcu F., and Gowing J. 2005. Effect of water table depth on evaporation and salt accumulation from saline groundwater. *Soil Research*. 43(5): 565–573.
- Saglam M., Sintim H.Y., Bary A.I., Miles C.A., Ghimire S., Inglis D.A., and Flury M. 2017. Modeling the effect of biodegradable paper and plastic mulch on soil moisture dynamics. *Agriculture Water Management*. 193: 240-250.
- Shahidi A., Zamani G., Kashkuli H.A., and Amirabadizadeh M. 2009. Managing and scheduling irrigation of two cultivars under salinity and drought stress conditions. *Environmental Stresses in crop sciences*. 3(1):17-25. (In Persian)
- Shokri N., and Salvucci G.D. 2011. Evaporation from porous media in the presence of a water table. *Vadose Zone Journal*. 10(4) : 1309-1318.
- Simunek J., Huang K., and van Genuchten M.T. 1998. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *Geoderma*. 86 : 61–81.
- Simunek J., van Genuchten M.T., and Sejna M., 2016. Recent developments and applications of the HUDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*. 15.
- Steenhuis T.S., Hunt, A.G., Parlange, J.Y., and Ewing, R.P. 2005. Assessment of the application of percolation theory to a water repellent soil. *Australian Journal of Soil Research*. 43(3): 357-369.
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44 (5): 892-898.
- Yusefi A., Farrokhian Firozi A., and Aminzade M. 2019. Effect of mulch on soil moisture, temperature and heat flux variation in the presence of shallow groundwater. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. (In press), DOI: 10.22059/IJSWR.2019.277426.668143. (In Persian)
- Zhao Y., Peth S., Horn R., Krümmelbein J., Ketzer B., Gao Y., Doerner J., Bernhofer C., and Peng X. 2010. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. *Soil Tillage Research*. 109:75-86.
- Zhao Y., Zhai X., Wang Z., Li H., Jiang R., Hill R.L., Si B., and Hao F. 2018. Simulation of soil water and heat flow in ridge cultivation with plastic film mulching system on the Chinese Loess Plateau. *Agriculture Water Management*. 202: 99-112.

Numerical Simulation of Moisture Distribution in Soil as Affected by Mulch and Shallow Saline Groundwater

Ashkan Yusefi¹, Ahmad Farrokhian Firouzi^{2*}, Milad Aminzadeh³

(Received: August 2019 Accepted: October 2019)

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of straw mulch on water content distribution in a soil profile and simulating water flow in soil under shallow saline groundwater using HYDRUS-1D. Lysimetric experiments were conducted in two soil textures (sand and loam) at three water table salinity levels of 5, 10 and 15 dS m⁻¹ mulch and no mulch with three replications in a three-month interval. Soil moisture content was continuously monitored in the depths of 5, 10, 20, 30 and 50 cm. Evaporation was also measured using Marriott bottle technique on a daily basis. The results showed that mulch cover retained soil moisture by 16 % and 20 %, and reduced evaporation by 27 % and 8% in surface layer of loamy and sandy soil, respectively. Our findings highlighted a strong correlation between measured and simulated soil moisture data using HYDRUS-1D with R² ranging from 0.89 to 0.97 and 0.90 to 0.96 in sand and loamy soils, respectively. The numerical model estimated soil moisture with RMSE of 0.0121- 0.0489 cm³ cm⁻³ for loamy and 0.0129-0.0521 cm³ cm⁻³ for sand. The simulation results revealed that HYDRUS-1D overestimates moisture content of layers close to water table.

Key words: HYDRUS-1D, Moisture, Mulch, Soil profile, Water table

Yusefi A., Farrokhian Firouzi A., Aminzadeh M. 2020. Numerical simulation of moisture distribution in soil as affected by mulch and shallow saline groundwater. *Applied Soil Research*. 8(3):172-187.

1. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3. Assistant Professor, Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author Email: a.farrokhian@scu.ac.ir