

شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت آبیاری قطره‌ای با آب شور با استفاده از مدل SWAP

مهدی تابعی^{۱*}، سعید برومندنسب، امیر سلطانی محمدی و علی حیدر نصراللهی

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

tabie_2011@yahoo.com

استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

boroomandsaeed@yahoo.com

استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

a_soltani60@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

aliheidar200@gmail.com

چکیده

تعیین شکل توزیع رطوبت در خاک مستلزم صرف وقت و انجام آزمایش‌های صحرایی پرهزینه است. مدل‌های شبیه‌ساز جایگزین مناسبی در پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به حرکت و توزیع آب هستند. در این پژوهش، شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای با مدل SWAP انجام گرفت و کارایی مدل فوق در مقایسه با نتایج میدانی ارزیابی شد. مدل SWAP براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده از مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز تحت کشت ذرت و مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ و پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمده از مدل RETC ارزیابی گردید. داده‌های مورد نیاز این پژوهش با استفاده از دو تیمار شوری آب آبیاری شامل تیمار T_1 (آب رودخانه کارون با شوری سه دسی زیمنس بر متر) و تیمار T_2 با شوری $3/5$ دسی زیمنس بر متر جمع آوری شد. روش کاشت به صورت دستی و در داخل کرت‌هایی شامل چهار ردیف سه متری با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام شد. سیستم آبیاری قطره‌ای از نوع نوارهای تیپ با فاصله روزنه‌های ۲۰ سانتی‌متر و با آبدهی $2/2$ لیتر بر ساعت با فشار $0/6$ بار بود. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده تا عمق ۹۰ سانتی‌متری در روی پشته، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان در قالب ترسیم نموداری و محاسبه بیشینه خطا (ME)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب باقیمانده (CRM) انجام شد. مقادیر NRMSE و CRM در ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان به ترتیب برابر با $0/02$ ، $14/41$ و $-0/016$ - سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب. در ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان $0/07$ ، $15/49$ و $-0/036$ - سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و در روی پشته $2/1$ ، $12/52$ و $-0/036$ - سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد. روند تغییرات دقت مدل SWAP در برآورد رطوبت از نزدیک قطره‌چکان به سمت دورتر از قطره‌چکان کاهش یافته بود که می‌تواند به دلیل دقت پایین مدل در شوری‌های بالا باشد. به طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل SWAP نشان داد که این مدل می‌تواند توزیع رطوبت در خاک را تحت آبیاری قطره‌ای با آب شور با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نماید و می‌توان آن را به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی توزیع رطوبت در اطراف قطره‌چکان قلمداد کرد.

واژه‌های کلیدی: مزرعه ذرت، مدل RETC، آبیاری قطره‌ای از نوع نوارهای تیپ.

۱- آدرس نویسنده مسئول: دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

*- وصول: آبان ۱۳۹۴ و تصویب: اردیبهشت ۱۳۹۵

مقدمه

رضایت‌بخشی داشته و در این بین پیش‌بینی مدل SWAP به واقعیت نزدیکتر بوده است. سینگ و همکاران (۲۰۱۰) جریان آب در خاک را با استفاده از مدل SWAP و روش سنجش از دور در مزارع تحت کشت گندم در غرب چین شبیه‌سازی نمودند و نتایج نشان داد که از مدل SWAP می‌توان به عنوان ابزاری مفید برای شبیه‌سازی حرکت و توزیع رطوبت در خاک استفاده نمود.

جیانگ و همکاران (۲۰۱۱) برای شبیه‌سازی انتقال آب تحت شرایط کم‌آبایی با آب شور، از مدل SWAP استفاده و بیان نمودند که مدل رطوبت را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی نمود. بررسی نتایج به دست آمده از تحقیقات و ارزیابی‌های مدل SWAP نشان می‌دهد که کاربرد مدل فوق به صورت منطقه‌ای بوده و برای هر گیاه بعد از واسنجی، جهت پیش‌بینی توزیع رطوبت خاک به کار می‌رود. لذا پژوهش حاضر، با هدف شبیه‌سازی توزیع رطوبت در یک خاک تحت کشت ذرت با استفاده از مدل SWAP به روش آبیاری قطره‌ای با آب شور در منطقه اهواز انجام گرفت.

توصیف مدل

مدل SWAP، با استفاده از معادله عمودی و یک بعدی ریچاردز (۱۹۳۱) که ترکیبی است از دو معادله داریسی و پیوستگی، جریان انتقال آب را شبیه‌سازی می‌کند. معادله دیفرانسیلی فوق به شرح زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] - S(\theta) \quad (1)$$

که در آن:

θ : رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$) ، t : زمان (T) ، K : هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1}) ، z : عمق خاک (L) و S : شدت تخلیه آب خاک به وسیله گیاه ($L^3 L^{-3} T^{-1}$) می‌باشد همچنین D ضریب پخشیدگی آب در خاک بوده ($L^2 T^{-1}$) و به صورت زیر تعریف می‌شود (برسler، ۱۹۷۵):

برای آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در ناحیه ریشه، آزمایش‌های صحرائی وقت گیر و پرهزینه‌ای لازم است که دامنه اعتبارشان از نظر شرایط فیزیکی و منطقه‌ای دارای محدودیت‌هایی است در حالی که مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی وضعیت رطوبت خاک در یک سیستم آبیاری هستند (خیام و گوهری، ۱۳۸۳). امروزه مدل‌های شبیه‌سازی معتبری برای پیش‌بینی توزیع رطوبت ارائه شده‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل آگرو هیدرولوژیکی SWAP بوده که بر پایه ارتباط فیزیکی بین پارامترهای آب، خاک، اتمسفر و گیاه است و از زیر مجموعه‌های مختلفی از جمله شبیه‌سازی مدیریت آبیاری، جریان آب و انتقال املاح و حرارت در خاک تشکیل شده است (هیگن و همکاران، ۲۰۰۵). کیانی (۱۳۸۶) با استفاده از مدل SWAP اقدام به شبیه‌سازی انتقال آب و عملکرد نسبی گندم طی دو سال زراعی نمود. وی به استناد تحلیل‌های آماری، دریافت که مدل SWAP با وجود متغیرهای متعدد در شرایط مزرعه‌ای، مقدار رطوبت و عملکرد نسبی گندم را به خوبی شبیه‌سازی نمود و در همه موارد، ضریب همبستگی بالاتر از ۸۰ درصد و میانگین مربعات خطا کمتر از انحراف معیار داده‌ها بود. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل SWAP، الگوی توزیع رطوبت خاک را تحت آبیاری قطره‌ای، شبیه‌سازی و مشاهده کردند که مدل برای شبیه‌سازی رطوبت در منطقه ریشه دقت مناسبی داشت.

سلطانی محمدی (۱۳۹۰) با ارزیابی شبیه‌سازی انتقال آب تحت تنش شوری و کم آبی توسط مدل SWAP، نشان داد که این مدل توزیع رطوبت را با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌نماید. ایتزینگر و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی در اتریش، شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک در طول فصل رویش تحت شرایط خاک‌های مختلف را به وسیله مدل‌های CERES.WOFOST و SWAP مورد مقایسه قرار دادند و بیان کردند که هر سه مدل نتایج

ثانیه طول شرقی، ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه عرض شمالی و با ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا واقع گردیده است. آمار هواشناسی این محدوده زمانی (تهیه شده از ایستگاه هواشناسی مؤسسه تحقیقات خرما)، نشان داد که میزان بارندگی در طول دوره کشت، ۳۴ میلی‌متر و متوسط دمای ماهانه در طی کشت، ۳۴/۱۱ درجه سلسیوس بود. برای انجام این پژوهش، زمینی به مساحت ۱۰۸ متر مربع انتخاب گردید و به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از مراحل آماده‌سازی زمین، در بهمن ماه ۱۳۹۱ قبل از کاشت نمونه‌های مرکبی از سه نقطه محدوده کشت و از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و بعد از خشک کردن، خرد کردن و عبور از الک دو میلی‌متری، توزیع اندازه ذرات با استفاده از دستگاه مسترسایز و روش الک اندازه‌گیری گردید.

پتاسیم قابل جذب با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر، فسفر قابل جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر و درصد کربن آلی از طریق تعیین نیتروژن کل به روش کج‌جدال اندازه‌گیری شدند. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری هر لایه خاک، نمونه‌های دست نخورده با استوانه‌های نمونه‌برداری تهیه گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی در جدول ۱ ارائه شده است. آب مورد نیاز از رودخانه کارون (دارای شوری سه دسی‌زیمنس بر متر) تأمین شد و برای بررسی اثر شوری بر روی توزیع رطوبت، تیمار دیگری با شوری ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر داشتیم که از طریق اضافه کردن نمک‌های کلسیم، سدیم و منیزیم تهیه شد. در دوم اسفند ماه سال ۱۳۹۱ عملیات کاشت ذرت صورت گرفت. روش کاشت به‌صورت دستی و در داخل کرت‌هایی شامل چهار ردیف سه متری با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام شد. سیستم آبیاری قطره‌ای از نوع نوارهای تیپ با فاصله روزنه‌های ۲۰ سانتی‌متر و آبدهی ۲/۲ لیتر بر ساعت با فشار ۰/۶ بار بود. آب آبیاری توسط فیلتر توری تصفیه و حجم آن توسط کنتور حجمی کنترل

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (2)$$

وان گنوختن و همکاران (۱۹۹۱) بر اساس روابط معلم (۱۹۷۶)، محدوده وسیعی از میزان رطوبت خاک را برای پیش‌بینی K غیر اشباع ارائه داده است:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha \cdot h|^n)^m} \quad \theta_r \leq \theta \leq \theta_s \quad (3)$$

θ_s و θ_r : به ترتیب رطوبت باقی‌مانده و اشباع در خاک است. m, n و α پارامترهای تجربی هستند که از رگرسیون معادله ۳ بر اساس اطلاعات صحرائی قابل محاسبه هستند. α : برابر عکس بار فشاری است (L^{-1}) و به لحاظ فیزیکی می‌توان آن را شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک دانست و m نیز برابر است با:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

با به کار بردن نظریه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک معلم و معادله ۳، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $K(h)$ به‌صورت معادله ۵ به‌دست می‌آید (وان گنوختن، ۱۹۸۰):

$$K(h) = K_s S_e \lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5)$$

که در آن:

K_s : هدایت هیدرولیکی خاک اشباع (LT^{-1}) و S_e : درصد اشباع مؤثر می‌باشد و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

برای برآورد ضرایب معادله‌های غیرخطی فوق، وان گنوختن و همکاران (۱۹۹۱) برنامه RETC را پیشنهاد کردند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی شماره یک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ (کشت بهاره) انجام گرفت که از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه و ۶۸

هزینه‌های کارگری در آبیاری با دور کم به دلیل خودکار نبودن سیستم، دور مناسب آبیاری سه روز در نظر گرفته شد. در جدول ۲ نتایج آزمایش‌های کیفی آب نشان داده شده است.

و فشار آن نیز با استفاده از فشارسنج و شیر کنترل فشار تنظیم شده و پس از عبور از لوله‌های ۴۰ و ۱۶ میلی‌متر توسط نوارهای تپ در اختیار گیاه قرار می‌گیرند. با توجه به کم بودن دور آبیاری در آبیاری قطره‌ای و همچنین

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق (cm)	پتاسیم قابل جذب (mg kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب (mg kg ⁻¹)	کربن آلی (%)	pH	EC _e (ds m ⁻¹)	جرم مخصوص ظاهری (gr cm ⁻³)	بافت خاک	اندازه ذرات خاک		
								رس Clay	سیلت Silt	شن Sand
۰-۳۰	۱۱۰	۱۰/۰	۰/۱۲	۷/۵۰	۳/۹۱	۱/۴۰	Si-L	۲۲/۶	۵۲/۱	۲۵/۳
۳۰-۶۰	۱۲۴	۱۰/۵	۰/۰۸	۷/۵۷	۳/۳۵	۱/۵۵	Si-L	۲۳/۵	۵۱/۵	۲۵
۶۰-۹۰	۱۰۸	۱۰/۱	۰/۰۸	۷/۶۰	۲/۷۸	۱/۶۰	Si-L	۲۳/۲	۵۱/۷	۲۳/۲

جدول ۲ - خصوصیات شیمیایی آب رودخانه کارون

زمان نمونه برداری	EC (dS/m)	PH	TDS (mg/lit)	Ca ²⁺ (meq/lit)	Mg ²⁺ (meq/lit)	Na ⁺ (meq/lit)	K ⁺ (meq/lit)	Hco ₃ ⁻ (meq/lit)	Cl ⁻ (meq/lit)	So ₄ ⁻ (meq/lit)
اسفند	۲/۹۴	۸	۱۸۹۲	۷/۸۹	۳/۹۹	۱۲/۹	۰/۰۸	۳/۶	۱۲/۳۳	۸/۳۱
فروردین	۲/۴۹	۷/۶	۱۵۸۵	۸/۱۳	۴/۴۴	۱۳/۵۹	۰/۰۹	۳/۵	۱۳/۵۸	۸/۹۵
اردیبهشت	۲/۵	۷/۴	۱۶۱۲	۷/۹۳	۳/۸۹	۱۴/۰۶	۰/۰۹	۳/۴	۱۳/۹۲	۸/۴۵
خرداد	۲/۵۸	۶/۶	۱۶۵۴	۸/۶	۴/۱۳	۱۶/۴	۰/۰۹	۳/۲	۱۴/۴	۱۱/۵۵

همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفت. در این تحقیق، با هدف کاربرد مدل SWAP، تحلیل حساسیت با میزان کاهش یا افزایش داده‌های ورودی به مقدار ۵۰ درصد انجام گرفت. پس از انجام محاسبات، ضرایب حساسیت به دست آمده (Sc) با دامنه تغییرات پیشنهادی لیو و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه گردید. به منظور واسنجی مدل ابتدا مدل را برای نقاط مشخص شده به صورت جداگانه اجرا و توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده در نقاط مختلف را تعیین می‌کنیم. سپس توزیع رطوبت اندازه‌گیری شده با توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده در نقاط مختلف را مقایسه کرده و پارامترهای هیدرولیکی خاک را تعیین می‌کنیم. برای واسنجی از ۷۰ درصد داده‌های نمونه‌برداری که در طول فصل کشت گرفته شده، استفاده شد. هدف از صحت-سنجی مدل SWAP، اثبات صحت کارایی مدل به منظور استفاده در مطالعات آینده و یا تخمین‌های دراز مدت می‌باشد. روش کار به این صورت بود که پس از واسنجی، رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را در برابر هم رسم نموده و ضریب تعیین را مشخص می‌کنیم. بعد از انجام واسنجی مدل، جهت اطمینان از نتایج آن و اعتبار بخشیدن به نتایج مدل، عملیات صحت‌سنجی صورت

حجم آب آبیاری با توجه به رطوبت باقیمانده در خاک در روز قبل از آبیاری، مورد محاسبه قرار گرفت. رطوبت خاک به صورت وزنی تعیین گردید. برای این منظور از اعماق خاک توسط اگر نمونه‌برداری صورت گرفت و پس از توزین و خشک شدن در آون رطوبت آن‌ها محاسبه گردید. برای بررسی توزیع رطوبت، نمونه-برداری در تیمارهای T₁ و T₂ تا عمق ۹۰ سانتی‌متر و به‌ازای هر ۱۰ سانتی‌متر در چهار سری زمانی روز قبل و بعد از آبیاری چهاردهم و بیست و چهارم (دوره‌های آبیاری در طول دوره کشت، ۳۰ مرحله می‌باشد) در سه فاصله روی پشته، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان انجام گرفت.

تحلیل حساسیت^۱، واسنجی^۲ و صحت‌سنجی^۳ مدل SWAP به منظور شبیه‌سازی توزیع شوری خاک با مدل SWAP، پس از فراهم نمودن داده‌های ورودی، تحلیل حساسیت مدل با استفاده از روش پیشنهادی لیو و

^۱- Sensitivity analysis

^۲- Kalibration

^۳- Verification

نتایج و بحث

برای تعیین ضرایب توابع هیدرولیکی خاک، نمونه‌های خاک از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متر برداشت و با استفاده از دستگاه‌های صفحه فشاری و محفظه فشاری رطوبت حجمی خاک در مکش-های مختلف اندازه‌گیری شد. به کمک داده‌های فوق و برنامه RETC ضرایب توابع هیدرولیکی خاک و از روش بار افتان نیز هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) تعیین شد. جدول ۳ نتایج برآورد ضرایب توابع هیدرولیکی خاک و همچنین مقادیر مورد نیاز برای حل معادله ۶ را به تفکیک هر عمق نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل SWAP

تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل به عمق آب آبیاری دارای حساسیت زیاد و بارندگی و شوری آب آبیاری دارای حساسیت متوسط می‌باشد. ضریب حساسیت پارامترهای مورد ارزیابی در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی کارایی مدل SWAP، مدل برای توزیع رطوبت واسنجی گردید. در جدول ۵ پارامترهای هیدرولیکی خاک ($\theta_s, K_s, \theta_{res}, n, \alpha$) برای بررسی توزیع رطوبت واسنجی گردید. نتایج نشان داد که مدل SWAP با واسنجی دقیق و کامل، در تخمین توزیع رطوبت در شرایط شوری خاک از دقت خوبی برخوردار است. نمونه‌ای از نتایج صحت‌سنجی مدل در شکل ۱ نشان می‌دهد که این مدل برای هر زمان مشخصی شبیه‌سازی توزیع آب در خاک را به‌طور مناسب انجام می‌دهد.

شبیه‌سازی توزیع رطوبت در پروفیل خاک با استفاده از

مدل SWAP

در شکل‌های ۲ تا ۵ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل نسبت به عمق در مراحل زمانی روز قبل و بعد از آبیاری چهاردهم و بیست و چهارم (به ترتیب ۴۵ و ۷۵ روز پس از کاشت) در سه فاصله روی پشته (۱۰-، ۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان)، ۱۰-

گرفت. صحت‌سنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های باقیمانده رطوبتی انجام شد. ارزیابی نتایج واسنجی و شبیه‌سازی از طریق محاسبه معیارهای آماری، بیشینه خطا^۱ (ME)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده^۲ ($NRMSE$)، ضریب تعیین^۳ (R^2) و ضریب باقیمانده^۴ (CRM) در فواصل روی پشته، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان انجام گرفت (لوگ و گرین، ۱۹۹۱).

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (7)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

که در آن‌ها:

P_i : مقادیر پیش‌بینی شده، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده)، n : تعداد نمونه‌های به کار رفته و \bar{O} : مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده است. کمینه مقدار ME ، $NRMSE$ و R^2 صفر است. CRM می‌تواند مقدار منفی داشته باشد. مقدار زیاد ME نشان‌گر کارکرد ضعیف مدل است، در حالی که مقدار زیاد $NRMSE$ نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) چقدر است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. آماره CRM نشان‌گر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های ME ، $NRMSE$ ، CRM برابر صفر و مقدار R^2 برابر یک خواهد شد.

¹ - Maximum Error

² - Normalized Root Mean Square Error

³ - Coefficient of determination

⁴ - Coefficient of Residual Mass

و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان در تیمار T₁ مشخص شده است. در این شکل‌ها علائم O و S به ترتیب مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۳- ضرایب توابع هیدرولیکی خاک با استفاده از برنامه RETC

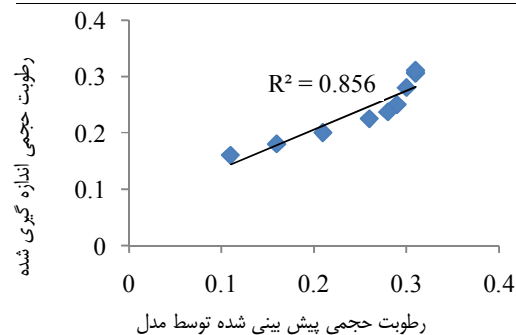
عمق خاک (cm)	θ	θ	k	α (cm ⁻¹)	n	m
۰-۳۰	۰/۰۵	۰/۴۳	۱۴/۲۰	۰/۰۱۴	۱/۱۸	۰/۱۵۷
۳۰-۶۰	۰/۰۷	۰/۴۷	۱۵/۵۰	۰/۰۱۶	۱/۲۵	۰/۲۰۳
۶۰-۹۰	۰/۰۷	۰/۴۶	۱۴/۷۰	۰/۰۱۸	۱/۱۸	۰/۱۵۷

جدول ۴- ضرایب حساسیت محاسبه شده

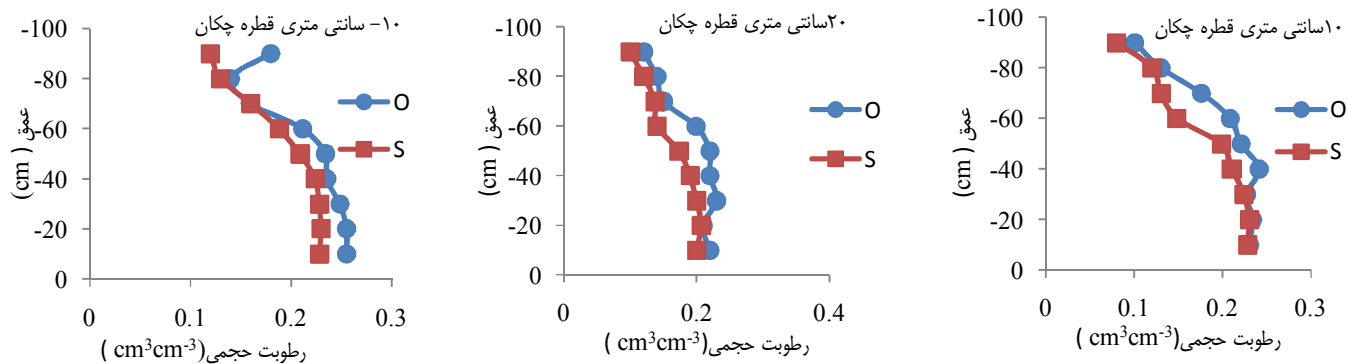
پارامتر ورودی	ضریب حساسیت
حداکثر درجه حرارت (+۵۰)	۰/۰۹
حداقل درجه حرارت (+۵۰)	۰/۱۱
بارندگی (+۵۰)	۱/۴۷
ضرایب هیدرولیکی لایه های خاک (-۵۰)	۰/۷۵
پارامترهای انتقال املاح خاک (-۵۰)	۰/۲۵
عمق آب آبیاری (+۵۰)	۲/۸۱
شوری آب آبیاری (-۵۰)	۱/۳۳
عمق ریشه (-۵۰)	۱/۰۱
شاخص سطح برگ (+۵۰)	۰/۰۵

جدول ۵- مقادیر متوسط پارامتر هیدرولیکی خاک در واسنجی مدل SWAP

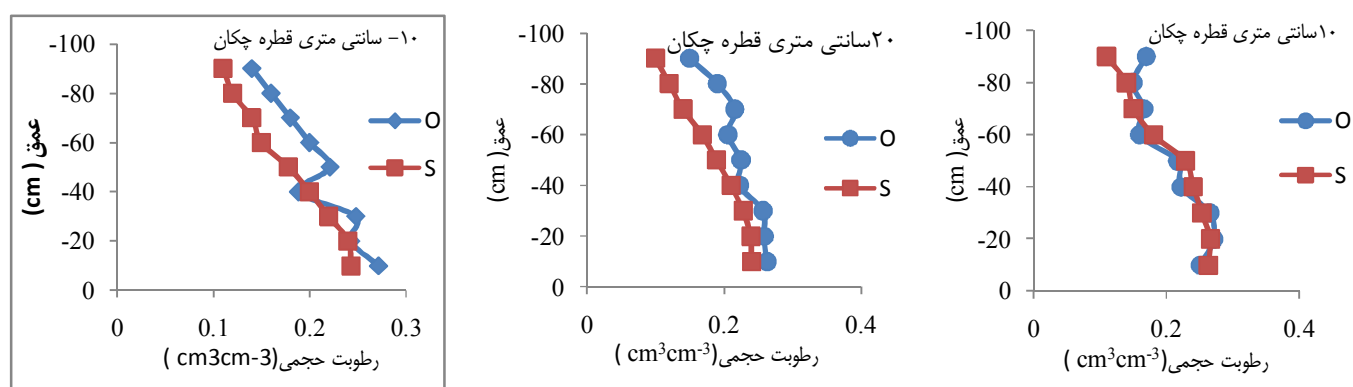
پارامتر	مقدار
α (cm ⁻¹)	۰/۰۲۰۵
n(-)	۱/۲۷۲۷
θ_{res} (cm ³ cm ⁻³)	۰/۰۱
K_s (cmday ⁻¹)	۵۸/۷
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	۰/۴۳
طول انتشار (cm)	۵
ضریب پخشیدگی مولکولی	۰/۰۱



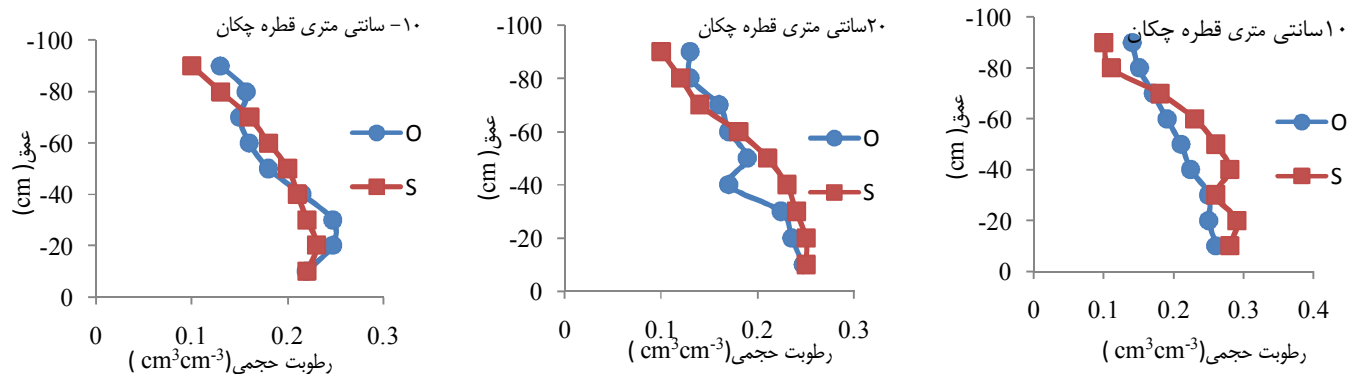
شکل ۱- مقایسه مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده (درصد حجمی) در ۷۵ روز پس از کاشت



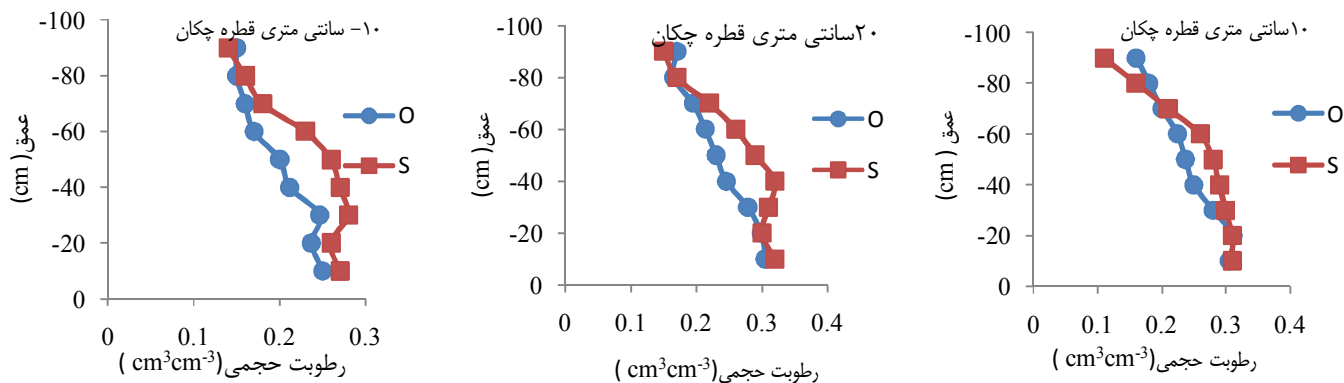
شکل ۲- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T_1 روز قبل از آبیاری چهاردهم



شکل ۳- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T_1 روز بعد از آبیاری چهاردهم



شکل ۴- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T_1 روز قبل از آبیاری بیست و چهارم



شکل ۵- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T₁ روز بعد از آبیاری بیست و چهارم.

در فاصله ۱۰ سانتی‌متر قطره‌چکان مشهود می‌باشد. همچنین در ابتدای فصل به دلیل وجود دمای بالا و عمق پایین آبیاری میزان رطوبت در روزهای قبل و بعد از آبیاری در لایه‌های بالایی برابر می‌باشد که نیاز به آبیاری مجددی نمی‌باشد. زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۹) نیز به نتایج مشابهی در کشت پیاز رسیدند. بعد از گذشت ۷۵ روز از زمان کشت، میزان رطوبت در روز بعد از آبیاری در اعماق ۴۵ تا ۹۰ سانتی‌متر کمتر از اعماق بالا می‌شود.

با توجه به این که بیشینه توسعه عمقی و سطحی ریشه گیاه ذرت ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد می‌توان گفت که بخش اعظم رطوبت، در اعماق بالا تجمع می‌یابد و ریشه سبب نگهداشت رطوبت در این ناحیه می‌شود، لذا حرکت و نفوذ به اعماق کمتر صورت می‌گیرد و مقدار رطوبت کمتر می‌شود. وضعیت رطوبت در محل ۱۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان نیز نشان می‌دهد رطوبت در لایه سطحی بیشینه و مقدار آن در اعماق با افزایش طول دوره رشد افزایش یافته است. علت افزایش رطوبت در اعماق را می‌توان به تکرار عملیات آبیاری و گسترش توزیع عمودی و افقی ریشه گیاه نسبت داد. در حقیقت کاشت گیاه در محل ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان و گسترش عمودی و افقی ریشه در اطراف این محل سبب نگهداشت بیشتر رطوبت در خاک شده است. وضعیت رطوبت در ماه‌های مختلف کشت بیان‌کننده آن است که میزان رطوبت با توجه به کوتاه بودن دور آبیاری، همچنان در حد ظرفیت زراعی مزرعه است ولی میزان رطوبت با گذشت

همان‌طور که در شکل‌های ۲ تا ۵ ملاحظه می‌گردد بیشینه مقدار رطوبت در سطح خاک ۳۳ درصد حجمی می‌باشد و به‌ازای افزایش عمق، رطوبت روند کاهشی داشت. در روز بعد از آبیاری مقدار ذخیره رطوبتی در همه اعماق افزایش می‌یابد و با توجه به تأخیر زمانی برای رسیدن رطوبت به لایه‌های پایینی، افزایش از لایه‌های بالا به پایین کم می‌شود. در روز قبل از آبیاری، با توجه به غالب شدن تبخیر و تعرق از بالا و نفوذ عمقی در خاک میزان ذخیره رطوبتی در خاک کاهش می‌یابد.

همچنین در روزهای بعد از آبیاری به دلیل غالب شدن رطوبت، مخصوصاً در ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان تفاوت رطوبت در لایه‌های اولیه بیشتر می‌شود ولی در فاصله روی پشته به دلیل شوری بالا و عدم رطوبت کافی در اعماق پایین فاصله روز قبل از آبیاری و بعد از آبیاری زیاد می‌شود. عدم تغییر مقدار رطوبت و ثابت بودن آن در عمق‌های پایین از سطح خاک در نزدیکی قطره‌چکان نشان‌دهنده عدم انتقال رطوبت سطحی به این عمق است. به عبارت دیگر در لایه‌های فوقانی به‌علت بالا بودن نیروی مکش خاک در از دست ندادن رطوبت نسبت به نیروی ثقل، عدم افزایش رطوبت در لایه انتهایی نسبت به رطوبت اولیه منطقی به نظر می‌رسد و در دو نقطه انتهایی شرایط غیر اشباع ماندگار برقرار است. در اعماق پایین به دلیل عدم توسعه ریشه در ابتدای فصل کشت (طول دوره کشت ۱۰۰ روز می‌باشد)، میزان رطوبت در روزهای قبل و بعد از آبیاری تقریباً برابر می‌باشد که این موضوع

دیگر نکات قابل توجه شکل‌های ۲ تا ۵، تفاوت کلی روند رطوبتی در سه مکان اندازه‌گیری است. علت این امر می‌تواند در گسترش عمقی ریشه گیاه در محل کاشت آن باشد. کاشت گیاه در نزدیکی قطره‌چکان در محل ۱۰ سانتی‌متری بوده و سیستم رشد منجر به هدایت رطوبت به سوی گیاه و انتقال آن به سمت اعماق پایین‌تر شده است.

به‌همین دلیل تفاوت در مقدار رطوبت سه محل قابل توجیه است. ضمن آنکه تشابه رفتاری در سه زمان مورد مطالعه، نشان‌دهنده صحت تغییرات می‌باشد. این نتایج مشابه نتایج مطالعه اژدری (۱۳۸۷) می‌باشد که با به‌کارگیری مدل دو بعدی HYDRUS، به تفاوت رطوبت خاک در محل قطره‌چکان و ۱۰ سانتی‌متری آن و تشابه رفتار رطوبت در مزرعه زیر کشت گیاه ترب اشاره داشته است. با توجه به شکل‌های ۲ تا ۵ این گونه به نظر می‌رسد که مدل SWAP، نسبت به مقادیر مشاهداتی به مقدار بسیار جزئی کم دارای رفتار بیش برآورد است که در جدول ارزیابی آماری مدل به بررسی آن پرداخته شد. در تأیید این مطلب، کیانی (۱۳۸۶)، زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۹)، ایتزینگر و همکاران (۲۰۰۴) و یوتست و همکاران (۲۰۰۷) نیز بیان داشتند که برآوردهای مدل SWAP معمولاً کمتر از مقادیر واقعی می‌باشد اما این اختلاف قابل اغماض است. شکل‌های ۶ و ۷ تأثیر شوری آب آبیاری بر توزیع رطوبت در خاک و شبیه‌سازی آن توسط مدل SWAP را نشان می‌دهد.

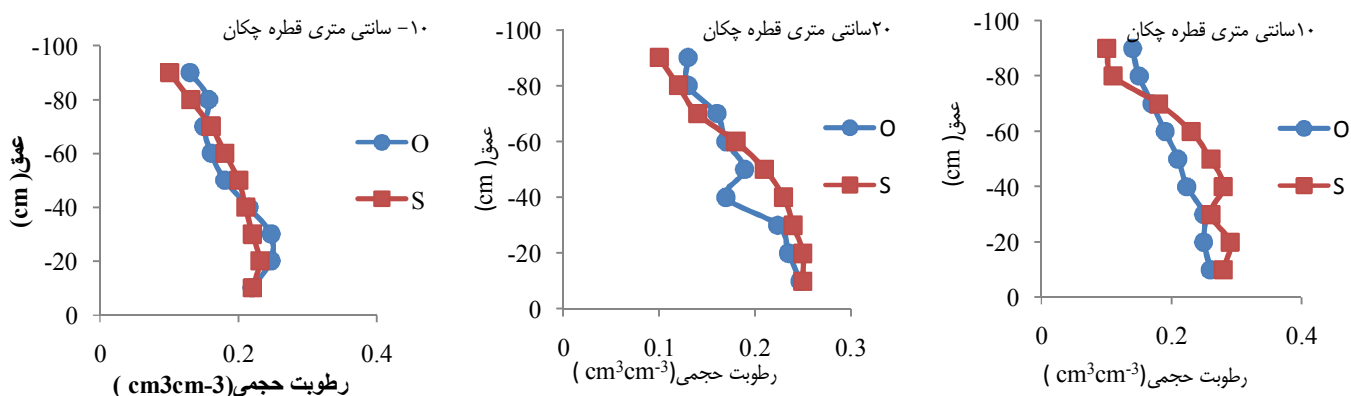
براساس این شکل‌ها محدوده تغییرات رطوبت نسبت به عمق برای تیمار شاهد برای روز قبل از آبیاری بیست‌و‌چهارم در فاصله ۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان در محدوده ۲۳ تا ۲۵ درصد حجمی می‌باشد و مقدار آن در عمق کمتر از سطح می‌باشد ولی تغییرات رطوبت برای روز قبل از آبیاری بیست‌و‌چهارم در تیمار T₂ و در فاصله ۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان در محدوده ۲۴ تا ۲۶ می‌باشد که این نشان می‌دهد که با افزایش شوری آب آبیاری، درصد رطوبت حجمی خصوصاً در آبیاری‌های آخر که عمق آبیاری بیشتر است، افزایش جزئی دارد که این ناشی

از زمان و انجام آبیاری‌های پی در پی در اعماق پایینی روند افزایشی دارد. مدل SWAP نیز در فاصله‌های نزدیک قطره‌چکان توانایی شبیه‌سازی بیشتری نسبت به فاصله‌های دیگر از قطره‌چکان دارا است که این می‌تواند به دلیل توانایی بالای مدل SWAP در شوری‌های کمتر باشد که بیشترین تطابق مدل در روزهای آبیاری چهاردهم و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان می‌باشد. دامنه تغییرات در لایه‌های ۴۰-۰ سانتی‌متری خاک بیشتر از عمق می‌باشد یعنی رطوبت در سطوح بالایی خاک، بیشتر از سطوح پایینی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد و گیاه نیز در شرایط مطلوب رطوبتی، بیشترین آب را از لایه سطحی خاک جذب می‌کند.

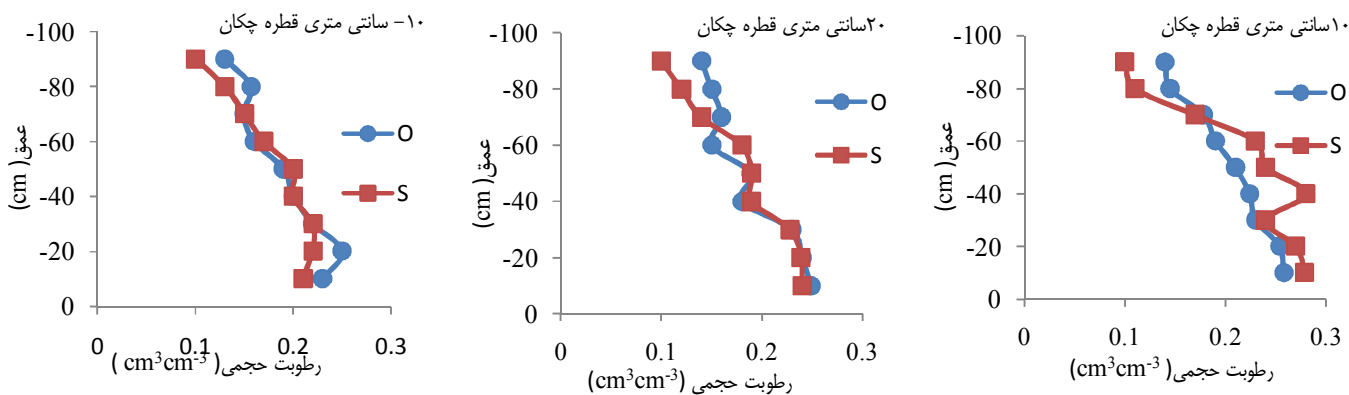
این تغییرات رطوبتی در نزدیکی قطره‌چکان (۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان) به دلیل خصوصیات آبیاری قطره‌ای و رسیدن آب بیشتر، محسوس‌تر می‌باشد. در فاصله ۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان نیز تغییرات رطوبت در لایه‌های پایین در روز بعد از آبیاری نسبت به روز قبل از آبیاری بیشتر می‌باشد که این می‌تواند به دلیل آب کمتر و نفوذ عمقی باشد. همچنین روند افزایش رطوبت از سطح خاک به اعماق پایین با شیب زیاد صورت نگرفته و این به معنای افزایش تدریجی جریان است. این نتایج هم راستا با نتایج مطالعات اژدری و زارع ایبانه (۱۳۸۸) و باک و میرز (۱۹۸۷) می‌باشد. روند تدریجی افزایش رطوبت نسبت به عمق و همچنین افزایش تدریجی رطوبت با گذشت زمان در طول دوره رشد، نشان‌دهنده توزیع مناسب رطوبت از طریق قطره‌چکان، فاصله مناسب آن‌ها و به طور کلی طراحی صحیح سیستم آبیاری است.

پیترو و همکاران (۲۰۰۳) نیز اعتقاد داشتند که بهبود توزیع آب و مواد غذایی در آبیاری قطره‌ای، منوط به ارتباط مناسب بین شدت جریان، فاصله قطره‌چکان‌ها، مشخصات رطوبتی خاک و مدت زمان آبیاری است. همچنین بخشی از افزایش رطوبت در اعماق در ماه‌های دوم و سوم را می‌توان به شکل گرفتن لوله‌های موئین و صعود موئینگی از اعماق پایین به سمت بالا نسبت داد. از

از شور شدن خاک منطقه ریشه و در نتیجه کاهش کمتر جذب آب توسط ریشه گیاه می‌باشد.



شکل ۶- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T_1 روز قبل از آبیاری بیست و چهارم



شکل ۷- مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در تیمار T_2 روز قبل از آبیاری بیست و چهارم

این تغییرات در فاصله روی پشته و ۲۰ سانتی‌متری قطره-چکان که شوری بیشتری دارد نمایان‌تر می‌شود. در این رابطه شهیدی (۱۳۸۷)، سلطانی محمدی (۱۳۹۰) و جیانگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز کاهش جذب آب توسط گیاه را در شرایط شوری آب و خاک گزارش کرده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین تطابق مدل مربوط به تیمار شاهد و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان می‌باشد و با افزایش شوری مدل رطوبت را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند که این مقادیر در روزهای بعد از آبیاری بیست و چهارم و در فاصله ۱۰-۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان مشهود است ولی در روزهای قبل و بعد از آبیاری چهاردهم به دلیل شوری کمتر مدل میزان رطوبت را کمتر پیش‌بینی می‌کند. در این رابطه کیانی (۱۳۸۶) و شهیدی (۱۳۸۷) نیز به این نتیجه رسیدند. به‌طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و واسنجی مدل نشان داد که مدل جهت شبیه‌سازی نحوه حرکت آب در خاک به ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای، مدل مناسبی است. دروگرز (۲۰۰۰)، براندیل و همکاران (۲۰۰۵) و وظیفه‌دوست (۲۰۰۸) طی تحقیقات خود در مدل SWAP، ادعان داشتند که این مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی وضعیت رطوبتی خاک می‌باشد، منوط بر آن که ورودی آن‌ها به درستی انتخاب و وارد شوند. در جدول ۶ شاخص‌های آماری محاسبه شده برای بررسی و مقایسه عملکرد مدل در پیش‌بینی رطوبت در فاصله‌های ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان، ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان و روی پشته (۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان) آمده است.

این تغییرات در فاصله روی پشته و ۲۰ سانتی‌متری قطره-چکان که شوری بیشتری دارد نمایان‌تر می‌شود. در این رابطه شهیدی (۱۳۸۷)، سلطانی محمدی (۱۳۹۰) و جیانگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز کاهش جذب آب توسط گیاه را در شرایط شوری آب و خاک گزارش کرده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین تطابق مدل مربوط به تیمار شاهد و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان می‌باشد و با افزایش شوری مدل رطوبت را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند که این مقادیر در روزهای بعد از آبیاری بیست و چهارم و در فاصله ۱۰-۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان مشهود است ولی در روزهای قبل و بعد از آبیاری چهاردهم به دلیل شوری کمتر مدل میزان رطوبت را کمتر پیش‌بینی می‌کند. در این رابطه کیانی (۱۳۸۶) و شهیدی (۱۳۸۷) نیز به این نتیجه رسیدند. به‌طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و واسنجی مدل نشان داد که مدل جهت شبیه‌سازی نحوه حرکت آب در خاک به ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای، مدل مناسبی است. دروگرز (۲۰۰۰)، براندیل و همکاران (۲۰۰۵) و وظیفه‌دوست (۲۰۰۸) طی تحقیقات خود در مدل SWAP، ادعان داشتند که این مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی وضعیت رطوبتی خاک می‌باشد، منوط بر آن که ورودی آن‌ها به درستی انتخاب و وارد شوند. در جدول ۶ شاخص‌های آماری محاسبه شده برای بررسی و مقایسه عملکرد مدل در پیش‌بینی رطوبت در فاصله‌های ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان، ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان و روی پشته (۱۰- سانتی‌متری قطره‌چکان) آمده است.

جدول ۶- ارزیابی آماری مدل SWAP برای رطوبت خاک شبیه‌سازی و مشاهداتی

نقاط مشاهداتی	R ²	ME(cm ³ cm ⁻³)	CRM(cm ³ cm ⁻³)	NRMSE(cm ³ cm ⁻³)
۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان	۰/۸۲۳	۰/۰۲	-۰/۰۰۱۶	۱۴/۴۱
۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان	۰/۷۸۱	۰/۰۷	-۰/۰۳۶	۱۵/۴۹
روی پشته	۰/۷۶۶	۲/۱	-۰/۰۳۶	۱۲/۵۲

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق دقت شبیه‌سازی مدل SWAP در برآورد توزیع رطوبت تحت سیستم آبیاری قطره‌ای با آب شور ارزیابی شد. داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی مربوط به لایه‌های مختلف خاک (تا عمق ۹۰ سانتی‌متری خاک) بود که برای سه نقطه (روی پشته، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان) تجزیه و تحلیل گردید. برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک تا عمق ۹۰ سانتی‌متری سطح خاک از مدل SWAP و برای اجرای مدل فوق از تمامی عوامل هواشناسی، خاک، گیاه و آبیاری در سطح کرت آزمایشی تحت کشت ذرت، در مزرعه دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. تحلیل حساسیت مدل SWAP نشان داد که این مدل نسبت به عمق آب آبیاری بسیار حساس می‌باشد. نتایج واسنجی مدل SWAP نشان داد که بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت تفاوت قابل ملاحظه و معنی‌داری وجود ندارد اگرچه در فاصله‌های دورتر از قطره‌چکان دقت مدل کاسته می‌شود. نتایج این بخش از کار در قالب پارامترهای ضریب تعیین (R²)، حداکثر خطا (ME)،

میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب باقیمانده (CRM) در فواصل روی پشته، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان نشان داده شد. مقادیر R²، ME، NRMSE و CRM در ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان به ترتیب برابر با ۰/۸۲، ۰/۰۲، ۱۴/۴۱ و -۰/۰۰۱۶ - سانتی-متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، در ۲۰ سانتی‌متری قطره-چکان ۰/۷۸، ۰/۰۷، ۱۵/۴۹ و -۰/۰۳۶ - سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و در روی پشته ۰/۷۶، ۲/۱، ۱۲/۵۲ و -۰/۰۳۶ - سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد. روند تغییرات دقت مدل SWAP در برآورد رطوبت از نزدیک قطره‌چکان به سمت دورتر از قطره‌چکان کاهش بود از نظر مکانی، بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت، مربوط به فاصله ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان با ضریب تعیین (۸۲ درصد) می‌باشد و مقدار ضریب تعیین در فاصله‌های بعدی کاهش می‌یابد که این کاهش بیانگر کاهش دقت مدل در پیش‌بینی رطوبت در فواصل مختلف قطره‌چکان و در زمان‌های مختلف می‌باشد، که می‌تواند به دلیل دقت پایین مدل در شوری‌های بالا باشد.

فهرست منابع

۱. اژدری خ، ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۵، شماره ۱، صفحه‌های ۱۶۸ تا ۱۸۰.
۲. اژدری خ و زارع ایبانه ح، ۱۳۸۸. مطالعه تغییرات کود نیتروژن و رطوبت در مزرعه‌ای مجهز به سیستم کود آبیاری قطره‌ای. صفحه‌های ۲۱۴ تا ۲۲۱. مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی منابع آب. ۲۷-۲۵ آبان ماه، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۳. خیام س و گوهری چ، ۱۳۸۳. مدل‌سازی رشد چغندر قند: اهداف و نیازها. مجله اقتصاد کشاورزی و توسعه، جلد ۱۰، شماره ۴۸، صفحه‌های ۹۳ تا ۹۵.
۴. زارع ایبانه ح، فرخی ا، وظیفه دوست م و اژدری خ، ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۶، صفحه‌های ۱۱۹۷ تا ۱۲۰۹.

۵. سلطانی محمدی ا م، ۱۳۹۰. تأثیر تنش رطوبتی و تنش شوری در مراحل مختلف رشد. رساله دکتری آبیاری وزهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
۶. شهیدی ع، ۱۳۸۷. اثر برهم کنش کم‌آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب- شوری در منطقه بیرجند. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
۷. کیانی ع ر، ۱۳۸۶. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب املاح و عملکرد نسبی گندم. مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. ۱۸-۱۶ بهمن ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
8. Brandyle T, Szaty L, Gnatow S and Tomasz O, 2005. Examination of SWAP suitability to predict soil water conditions in a field Peat-Moorsh soil. Department of environmental improvement. Warsaw Agricultural University. Poland.
9. Breseler, E., 1975. Two-dimensional transport of solute during non steady infiltration for a trickle source. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, 604-613.
10. Bucks DA and Myers LE, 1987. Trickle irrigation-application uniformity from simple emitter plugging. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 16 (6): 1108-1111.
11. Droogers P, 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro hydrological model. Journal of hydrology 229: 50-58.
12. Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, Zalud Z and Dubrovsky M, 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecological Modelling 171(3) : 223-246.
13. Huygen J. Van Dam J.C. and Krose J.G .2005. Introduction to SwapGui, the Swap2.0 graphical user interface. Unpublished manual. DLO-Staring Centre and Wageningen Agricultural University. 98p. Record No: H23829.
14. Jiang J, Feng Sh, Huo Z, Zhao Z and Bin J, 2011. Application of the SWAP model to simulate water-salt transport under deficit irrigation with saline water. Mathematical and Computer Modelling 54: 902-911.
15. Loague, K. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. J. cont. Hidrol. 7, 51-73.
16. Liu HF, Genard M, Guichard S and Bertin N, 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. Journal of Experimental Botany 58(13): 3567-3580.
17. Mualem Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resourc Research 12: 513-522.
18. Peter JT, Ian KD, Ian MB, Craig PB, Mike AS and Brain AK, 2003. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. Irrigation Science 22: 201-209.
19. Richards LA, 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics 1: 318-333.
20. Singh UK, Ren L and Kang S, 2010. Simulation of soil water in space and time using an agrohydrological model and remote sensing techniques. Agricultural Water Management 97(8): 1210-1220.

21. Utset A, Velicia H Del Rio B, Morillo R, Antonio Centeno J and Carlos Martines J, 2007. Calibration and validation agrohydrological model to simulate sugarbeet water use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management* 94(1-3): 11-21.
22. Van Genuchten M Th, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
23. Van Genuchten MT, Leij F و Yates SR, 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Office of research and development U.S. environmental protection agency ADA. Oklahoma.
24. Vazifedoust M, Van Dam JC Feddes RA and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management* 95:89-102.