

برآورد بیلان حجمی آب و الگوی رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در محیط متخلخل

افشین خورسند، محمد بزانه، سینا بشارت* و کامران زینالزاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳)

چکیده

سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، بیشترین تحویل آب و مواد غذایی به منطقه ریشه را در مقایسه با سیستم‌های آبیاری دیگر (کرتی و جویچه‌ای) دارا هستند. اهداف این پژوهش، ارزیابی پیشروی جبهه رطوبتی شبیه‌سازی شده آبیاری قطره‌ای زیرسطحی توسط مدل HYDRUS 2D با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه است. در این پژوهش، آبیاری قطره‌ای با روش T-Tape در مزرعه‌ای با خاک لوم‌شنی توسط دو قطره‌چکان در زمان‌های مختلف انجام گرفت. برای تعیین میزان رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج Wet استفاده شد. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک با استفاده از ضریب تعیین و پارامترهای خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده انجام گرفت. بر اساس نتایج، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده پیش‌بینی رطوبت حجمی خاک برای قطره‌چکان‌های عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب در محدوده ۱۰ تا ۱۹ و ۱۰ تا ۱۳ درصد محاسبه شد. همچنین متوسط خطای نسبی برای قطره‌چکان‌های عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب در محدوده ۱۶- تا ۵- و ۸ تا ۱۱ درصد محاسبه شد. مقدار متوسط ضریب تعیین برای قطره‌چکان‌های عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب، ۰/۸۷ و ۰/۹۸ به دست آمد. همچنین پنج سناریو (F1، F2، T1، T2 و S1) برای بررسی مقدار عمق آب ذخیره شده در پروفیل خاک و بیلان حجمی آب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل در پیش‌بینی رطوبت حجمی خاک، دارای دقت قابل قبول است.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، سناریو، عمق آب ذخیره شده، مدل روزتا، مدل هایدروس

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: s.besharat@urmia.ac.ir

مقدمه

حرکت آب در خاک عمدتاً به وسیله جریان توده‌ای ایجاد شده و به وسیله اختلاف پتانسیل فشار حرکت می‌کند. حرکت این پدیده در خاک غیراشباع در منطقه ریشه توسط خصوصیات فیزیک خاک، فیزیولوژی گیاهی و فاکتورهای هواشناسی کنترل می‌شود. حرکت رطوبت در خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل آب و خاک همیشه مورد بحث بوده است. در کشاورزی، انتقال رطوبت و جذب آب توسط ریشه دو فرایند غیرقابل تفکیک هستند که پیش‌بینی دقیق آنها می‌تواند بسیار حائز اهمیت است. مناسب‌ترین سیستم آبیاری در مناطق کم آب، آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا است. برای اطمینان از مرطوب شدن محدوده مورد نظر خاک توسط قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای، نیازمند مشخص بودن الگوی خیس‌شدگی (جبهه رطوبتی) خاک است. بر اساس این الگوها می‌توان فاصله مناسب قطره‌چکان‌ها را تعیین کرد (۳).

تحقیقات زیادی با استفاده از مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای تخمین الگوی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای انجام شده است. شوارتزمن و زور (۲۵) از اولین کسانی بودند که به منظور تخمین ابعاد پياز رطوبتی، گام‌های مؤثری برداشتند. ایجاد رطوبت بهینه و جلوگیری از هدرروی آب به طریق نفوذ عمقی و همچنین کاهش تلفات آب ناشی از تبخیر از سطح خاک از جمله مسائلی است که پژوهشگران را بر آن داشته تا به ارائه روش‌های جدید و مقرون به‌صرفه در مدیریت صحیح آب آبیاری اقدام کنند (۱۴ و ۳۰). دقت مدل‌های شبیه‌سازی، به دقت داده‌های ورودی بستگی داشته و در صورت واسنجی صحیح، بدون محدودیت زمانی و مکانی در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری به‌کار روند (۱۸). طرح‌های اولیه طراحی مدل HYDRUS را می‌توان از مطالعات ون‌گنوختن (۳۲) و (۳۳) در مدل‌های SUMARTA و WORM جستجو کرد. در مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی جریان آب، از حل عددی معادله ریچاردز استفاده می‌شود (۲۴).

سیال و اسکاگز به بررسی الگوی پخش آب ایجادشده با لوله‌های سفالی به طول ۲۰ متر و عمق ۴۰ سانتی‌متر برای چهار ارتفاع فشار در مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی پاکستان پرداختند. مقایسه نتایج حاصل و داده‌های واقعی نشان داد که مدل HYDRUS کارایی بالایی در تخمین الگوی رطوبتی دارد (۳۰). اسکاگز و همکاران (۳۱) طی تحقیقی مدل HYDRUS 2D را یک ابزار طراحی با دقت بسیار بالا عنوان کردند و اظهار داشتند که می‌توان جریان در تیپ (آبیاری قطره‌ای) را خطی در نظر گرفت و در دو بعد بررسی کرد، همچنین ایشان نشان دادند که نتایج حاصل از این مدل، تطابق بالایی با داده‌های واقعی دارد. طبق نتایج به‌دست آمده، برای خاک‌هایی با هدایت هیدرولیکی کم (خاک‌هایی با بافت‌های ریز) و یا برای شبیه‌سازی با شدت کاربرد آب بالا لازم است مقدار جریان را در طول آبیاری ثابت نگه‌داشت. در هنگام آبیاری در خاک با نفوذپذیری کم، فشار مثبت قابل توجهی در اطراف خاک اشباع شده ایجاد خواهد شد. اژدری (۱) برای بررسی نحوه توزیع رطوبت به صورت افقی و عمودی در ناحیه ریشه گیاه تحت آبیاری قطره‌ای از مدل HYDRUS 2D استفاده کرد. نتایج نشان داد که با دور آبیاری مناسب (۴۸ ساعت) و آبدهی مناسب قطره‌چکان، در تمام طول فصل زراعی، رطوبت خاک در ناحیه ریشه در حد ظرفیت زراعی نگه‌داشته شد و کاهش آن در طول ۴۸ ساعت تدریجی بود و رطوبت لازم برای گیاه در حد مطلوب نگه‌داشته می‌شود. در واقع آبیاری قطره‌ای، پتانسیل بهبود مدیریت مواد مغذی را دارد (۱۷). سامانه آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با ایجاد الگوی رطوبتی یکپارچه، عملکرد بهتری نسبت به قطره‌چکان‌ها دارد (۲۱).

در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، قطره‌چکان‌ها زیر سطح خاک قرار می‌گیرند و با کاربرد مستقیم آب در منطقه توسعه ریشه گیاه، می‌توان تبخیر آب از سطح گیاه را به حداقل رساند (۲۸). تحقیقات مشابه دیگری برای ارزیابی نحوه پیشروی جبهه رطوبتی تحت منبع قطره‌ای صورت گرفته است (۳، ۴، ۷، ۱۱، ۱۶ و ۲۰). پوریزدان‌خواه و خالدیان (۲) با بررسی اثر

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

عمق (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	رطوبت خاک (%)
۰-۱۰۰	لوم شنی	۵۴/۸	۳۹/۶	۵/۶	۱/۵۵	۲۸
					مکش ۳۳ (kPa)	مکش ۱۵۰۰ (kPa)

یکنواختی بیشتر شخم زده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد. نتایج خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق از روش آبیاری قطره‌ای T-Tape استفاده شد. قطر لوله‌ها دو سانتی‌متر و فاصله قطره‌چکان‌ها روی لوله یک متر بود. زمان‌های آبیاری بر اساس ساعات کارکرد نرمال در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۱، ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری و ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شده است. مقدار دبی قطره‌چکان‌ها بر اساس اندازه‌گیری حجمی، چهار لیتر در ساعت و در طول آزمایش ثابت بود. بر اساس دبی قطره‌چکان‌ها و زمان کاربرد، حجم آب کاربردی به ترتیب برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۹۶ لیتر و برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری ۴، ۸ و ۱۶ لیتر به دست آمد. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، زمین تا عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری حفر شد و لوله‌های T-Tape در این عمق قرار گرفتند، سپس روی لوله‌ها خاک ریخته شد. برای تعیین میزان رطوبت خاک، از دستگاه رطوبت‌سنج Wet استفاده شد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در نقاط مختلف، سنسورهای دستگاه رطوبت‌سنج Wet در خاک منطقه مورد مطالعه قرار داده شد و رطوبت‌های خاک در آن نقاط قرائت شد (شکل ۱). سنسور Wet دارای سه شاخه است که با قرار دادن آن در خاک می‌توان درصد رطوبت را مشاهده کرد. این سنسور علاوه بر رطوبت، شوری و دمای خاک را در نقطه مورد نظر اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه ساخت شرکت Delta-T انگلستان با دقت ± 0.03 است.

تشریح مدل HYDRUS 2D/3D

با توجه به عدم هم‌پوشانی قطره‌چکان‌ها (به دلیل فواصل

اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS 2D به این نتیجه رسیدند که در شبیه‌سازی با این مدل، لحاظ کردن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک، نقش مهمی در بهبود نتایج شبیه‌سازی ایفا می‌کند، به‌ویژه این تغییرات بعد از اولین آبیاری بسیار مشهود است. کوتاه و همکاران (۱۰) انتقال رطوبت و مواد محلول را در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که طراحی و مدیریت درست سیستم در خاک‌های با نفوذپذیری کم و بافت ریز، می‌تواند خصوصیات هیدرولیکی خاک را بهبود بخشد. سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به دیگر روش‌های آبیاری، به علت کفایت آب کاربردی بیشتر، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است.

در تحقیقات محدودی ارزیابی پیاز رطوبتی آبیاری زیرسطحی مورد ارزیابی قرار گرفته و آبیاری دوگانه آبیاری زیرسطحی به صورت دو عمق به صورت روش جدید برای مصرف، تاکنون مورد بحث قرار گرفته نشده است. اهداف این پژوهش، ارزیابی چگونگی پیشروی جبهه رطوبتی دو بعدی آب و مقایسه داده‌های مزرعه‌ای با داده‌های شبیه‌سازی شده آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای قطره‌چکان‌های عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری و برآورد بیلان حجمی آب است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های میدانی

آزمایش‌های میدانی روی خاکی با بافت لوم شنی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه با مختصات ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی، ۴۵ درجه و ۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۳۲ متر انجام گرفت. خاک محل آزمایش تا عمق ۸۰ سانتی‌متری، برای



شکل ۱. پروفیل رطوبتی خاک برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، محل قطره‌چکان‌ها و دستگاه رطوبت‌سنج Wet

هیدرولیکی خاک از مدل ون‌گنوختن معلوم و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با مدل معلوم، طبق معادلات (۲ و ۳) به دست می‌آید:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^1 \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

که در آن؛ θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقیمانده در خاک ($L^3 L^{-3}$)، I پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک (معمولاً ۰/۵ در نظر می‌گیرند)، h

قطره‌چکان‌ها و تأثیر بافت خاک)، روند حرکت آب در طول نفوذ و توزیع، به صورت متقارن در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی نفوذ و توزیع رطوبت خاک، مدل HYDRUS 2D استفاده شد (۲۷). معادله حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتروپیک خاک، معادله ریچاردز است که از ترکیب معادله داری و قانون بقای جرم به دست آمده و به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad (1)$$

که در آن؛ θ رطوبت حجمی آب خاک، h پتانسیل فشاری آب، t زمان، r محور افقی، z محور عمودی (رو به بالا، مثبت) و $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع است (۱۰). ویژگی‌های

جدول ۲. تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل Rosetta

پارامترهای هیدرولیکی خاک						عمق (cm)
$\theta_s \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^{-3}} \right)$	$\theta_r \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^{-3}} \right)$	$K_s \left(\frac{\text{cm}}{\text{day}} \right)$	$n (-)$	$\alpha \left(\frac{1}{\text{cm}} \right)$	$l (-)$	۰-۱۰۰
۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۱۳/۷۶	۱/۷۹	۰/۰۰۲۵	۰/۵	

کار مدل Rosetta استفاده از روش‌های بهینه‌سازی شبکه عصبی است که می‌تواند پارامترهای هیدرولیکی خاک را بر اساس یک سری از اطلاعات ورودی تخمین بزند. در مدل Rosetta از خصوصیات ساده (زود یافت مانند درصد شن، سیلت و رس)، خصوصیات پیچیده خاک (دیر یافت مانند مقادیر هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک) برآورد می‌شوند. شاپ و لیژ (۲۲) طی تحقیقی بر روی ۱۲۰۹ نمونه خاک‌های دنیا، سعی کردند با استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، پارامترهای مدل منحنی مشخصه رطوبتی و ن‌گن‌وختن را حدس بزنند. در این مدل، پنج سطح داده مورد نیاز استفاده شده و هر سطح نسبت به سطح قبلی، نیازمند تعداد ورودی بیشتری است. به همین دلیل آنها این روش را روش سلسله مراتبی (Hierarchical) نامیدند. کلاس‌بندی بافت خاک در مدل Rosetta، ضعیف‌ترین روش برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک بوده و دارای دقت پایینی است. پیچیده‌ترین روش بر اساس درصد شن، سیلت و رس، چگالی ظاهری، درصد رطوبت حجمی خاک در پتانسیل ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال است (جدول ۲) (۲۷).

سناریوهای مورد مطالعه

در این تحقیق، پنج سناریو توسط مدل HYDRUS 2D تعریف شد تا تأثیر این سناریوها روی پیشروی جبهه رطوبتی و مقدار آب ذخیره شده در پروفیل خاک ارزیابی شود. این سناریوها عبارت‌اند از: ۱- کارکرد ۲۴ ساعته قطره چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری (F1)، ۲- کارکرد ۲۴ ساعته قطره چکان در عمق ۴۰ سانتی‌متری (F2)، ۳- کارکرد قطره چکان عمق ۲۰

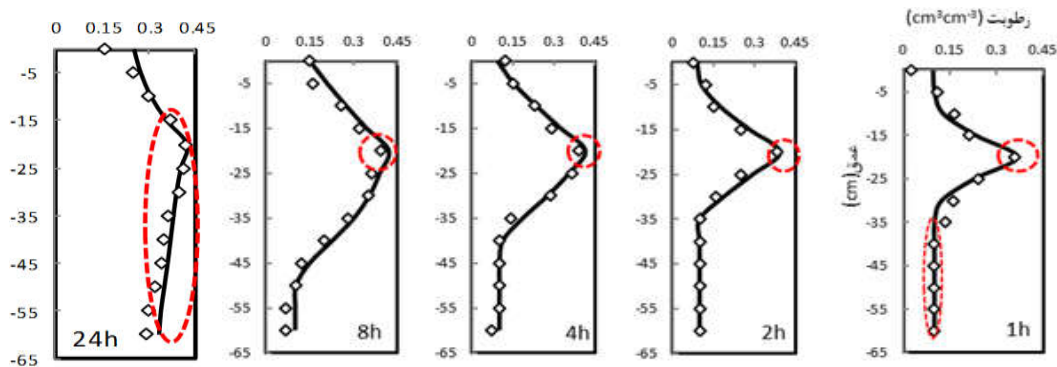
مکش ماتریک (L)، n و m پارامترهای شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، α عکس مقدار ورود هوا (L^{-1}) و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (LT^{-1}) هستند. مدل HYDRUS-2D از روش عناصر محدود خطی نوع گالریکین برای حل معادلات (۱ تا ۳) استفاده می‌کند. در شبیه‌سازی توسط مدل، قسمت راست پیاز رطوبتی در نظر گرفته شد. مش‌بندی مرزها در روش عناصر محدود مستطیلی و در لبه‌های جبهه رطوبتی خاک به صورت مثلثی در نظر گرفته شد. در طول کاربرد آب در مرز، شدت جریان ثابت ۳/۱۸۳ سانتی‌متر بر ساعت برای لوله مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس متوسط شدت کاربرد آب، چهار لیتر بر ساعت در واحد متر در نظر گرفته شد.

شرایط اولیه و مرزی

رطوبت اندازه‌گیری شده خاک قبل از انجام آزمایش، به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد و این مقدار در تمام پروفیل خاک دارای مقداری ثابت بود. پس از اتمام آبیاری، شرایط مرزی لوله قطره چکان به صورت شرایط مرزی با جریان صفر و سطح خاک به‌عنوان شرایط مرزی بالادست در نظر گرفته شد که برابر مقدار تبخیر از سطح خاک است. زهکشی آزاد برای حرکت آب در مرز پایین دست در نظر گرفته شد.

مدل Rosetta

اجرای مدل HYDRUS-2D به پارامترهای هیدرولیکی خاک (θ_s ، θ_r ، K_s ، n ، l و α) نیاز دارد. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل Rosetta که در HYDRUS-2D گنجانده شده است، برآورد شد (۲۳). بر اساس



شکل ۲. مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده (نقاط خالی) و شبیه‌سازی شده (خط ممتد) توسط مدل HYDRUS-2D

که در آن: S_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰ درصد است. NRMSE در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عدم اطمینان از مدل است (۲۹). آماره RMSE نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است، این شاخص هر چه به سمت عدد صفر میل کند نشان از دقت تخمین بهتر مدل خواهد بود. آماره CRM نشانگر تمایل مدل برای بیش‌برآورد و یا کم برآورد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. مقدار مثبت خطای نسبی (RE) نشانگر کم‌برآوردی مدل و مقدار منفی نشانگر بیش‌برآوردی مدل است. ضریب تعیین از صفر تا یک متغیر است (۶).

نتایج و بحث

شبیه‌سازی رطوبت حجمی

مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مزرعه و پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS 2D در شکل ۲ به صورت عمقی، برای فاصله صفر سانتی‌متر در مدت زمان‌های ۱، ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۲) بیشترین رطوبت حجمی (حدود ۴۰ درصد) در عمق ۲۰ سانتی‌متری و کمترین رطوبت در عمق‌های پایینی

سانتی‌متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت دوم (T1) (۱۲)، ۴- کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت دوم (T2) (۱۲)، ۵- کارکرد هم‌زمان ۱۲ ساعته دو قطره‌چکان (S1).

ارزیابی مدل HYDRUS 2D

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل با نتایج اندازه‌گیری در سطح مزرعه و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از یک‌سری شاخص‌های ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب باقیمانده (CRM)، خطای نسبی (RE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد (۶ و ۲۹). روابط استفاده‌شده به شرح زیر هستند:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$CRM = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad (6)$$

$$RE = \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - S_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (8)$$

جدول ۳. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری

زمان (ساعت)	R ² (-)	RE* (%)	CRM (-)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	NRMSE (%)
۱	۰/۸۵۵	-۱۵/۰۵۸	۰/۰۱۶	۰/۰۲۷	۱۸/۴۳۹
۲	۰/۹۷۷	-۶/۵۶۹	-۰/۰۷۷	۰/۰۲۰	۱۳/۲۹۲
۴	۰/۹۶۶	-۵/۷۶۱	-۰/۰۳۹	۰/۰۲۱	۱۱/۲۱۷
۸	۰/۹۷۳	-۱۶/۷۳۶	-۰/۱۰۷	۰/۰۲۷	۱۲/۴۳۱
۲۴	۰/۵۷۵	-۹/۲۶۴	-۰/۰۶۵	۰/۰۳۵	۱۰/۵۲۹
متوسط	۰/۸۶۹	-۱۰/۶۷۸	-۰/۰۵۴	۰/۰۲۶	۱۳/۱۸۲

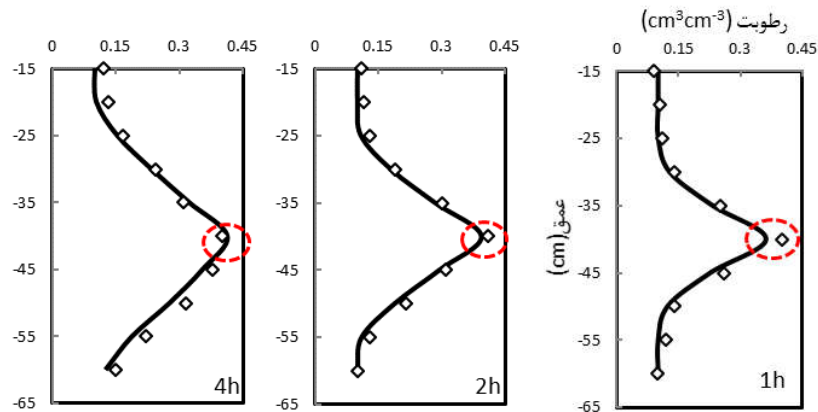
* مقادیر مثبت، کم‌برآورد و مقادیر منفی بیش‌برآورد هستند.

HYDRUS 2D تمایل به بیش‌برآورد دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که این مدل در این زمان‌ها رطوبت را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی می‌کند. متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی رطوبت، در پنج زمان در محدوده ۵ تا ۱۷ درصد (از نظر قدر مطلق) محاسبه شد. همچنین بیشترین خطای نسبی بیش‌برآورد، مربوط به زمان ۸ ساعت است که مقدار آن ۱۶/۷۴ درصد (از نظر قدر مطلق) محاسبه شد. نمایه ضریب تعیین (R²) پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده را نسبت به هم نشان می‌دهد. ضریب تعیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت حجمی برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری در زمان‌های ۲، ۴ و ۸ ساعت خیلی نزدیک به یک بود و بالای ۹۰ درصد محاسبه شد. همچنین این آماره برای زمان ۱ ساعت بالای ۸۰ درصد و برای ۲۴ ساعت کمترین همبستگی (نزدیک ۶۰ درصد) نسبت به سایر زمان‌ها به‌دست آمد (جدول ۳).

مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل، برای فاصله صفر سانتی متر در زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که بیشترین رطوبت حجمی (حدود ۳۶ تا ۴۱ درصد) در عمق ۴۰ سانتی متری و کمترین رطوبت در عمق‌های ۱۵ تا ۲۵ و ۵۰ تا ۶۰ سانتی متری اتفاق افتاده است. مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری در جدول ۴ آورده شده است. مقدار NRMSE برای

(۴۰ تا ۶۰ سانتی متری) اتفاق افتاده است. همچنین گفتنی است که در زمان ۲۴ ساعت در عمق‌های ۱۵ تا ۶۰ سانتی متر، رطوبت حجمی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد متغیر است و این بدان معناست که رطوبت خاک در عمق‌های ۳۵ تا ۶۰ سانتی متر برای زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت کم بوده (۱۰ درصد) و با گذشت زمان رطوبت در این اعماق افزایش یافته و به حد اشباع رسیده است. مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در پیش‌بینی رطوبت حجمی، در جدول ۳ آورده شده است. مقدار NRMSE برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری در هر پنج زمان مختلف، کمتر از ۲۰ درصد (در محدوده ۱۰ تا ۱۹ درصد) به‌دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی، مناسب است. کمترین و بیشترین مقدار خطای نرمال شده برای زمان ۲۴ و ۱ ساعت به‌دست آمد که مقادیرشان به ترتیب برابر با ۱۰/۵۳ و ۱۸/۴۴ درصد است (جدول ۳). مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در هر پنج زمان مختلف، کمتر از ۰/۰۴ (در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ cm³cm⁻³) به‌دست آمد که نزدیک به عدد صفر است. استفاده از این معیار برای مقایسه اختلاف نتایج مدل برای شبیه‌سازی یک فرایند مناسب است و هر چه کوچک‌تر و نزدیک‌تر به صفر باشد، آن مدل مناسب خواهد بود (جدول ۳).

با توجه به جدول ۳، مقدار آماره CRM در زمان یک ساعت، مثبت به‌دست آمد که نشان داد، مدل HYDRUS 2D کمی تمایل به کم‌برآورد دارد. در زمان‌های ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت، مقدار این آماره منفی به‌دست آمد که نشان داد، مدل



شکل ۳. مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده (نقاط خالی) و شبیه‌سازی شده (خط ممتد) توسط مدل HYDRUS-2D

جدول ۴. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری

NRMSE (%)	RMSE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	CRM (-)	RE* (%)	R ² (-)	زمان (ساعت)
۱۲/۲۵۵	۰/۰۲۱	۰/۰۹۳	۸/۲۲۷	۰/۹۸۷	۱
۱۰/۵۹۸	۰/۰۲۲	۰/۰۹۱	۱۰/۳۳۴	۰/۹۸۲	۲
۹/۵۸۴	۰/۰۲۳	۰/۰۶۸	۹/۲۹۲	۰/۹۶۶	۴
۱۰/۸۱۲	۰/۰۲۲	۰/۰۸۴	۹/۲۸۴	۰/۹۷۸	متوسط

* مقادیر مثبت، کم‌برآورد و مقادیر منفی، بیش‌برآورد هستند.

زمان مختلف مربوط به زمان دو ساعت است. ضریب تعیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت حجمی برای قطره‌چکان ۴۰ سانتی‌متری در سه زمان مختلف نزدیک به یک و بالای ۹۰ درصد محاسبه شد (جدول ۴).

سیال و اسکاگز (۳۰) برای شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک در بافت‌های مختلف (شنی، لوم شنی، لومی و سیلتی) در آبیاری قطره‌ای از نرم‌افزار HYDRUS 2D بهره بردند. آنها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی درصد رطوبت حجمی خاک با استفاده از این مدل همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد (ضریب تعیین ۰/۹۸ به‌دست آمد). در تحقیق حاضر ضریب تعیین رطوبت حجمی برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در مدت زمان‌های ۲، ۴ و ۸ ساعت و برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت بالای ۹۰ درصد محاسبه شد که با نتایج سیال و اسکاگز تطابق مناسبی دارد.

زمان‌های ۴ ساعت کمتر از ۱۰ درصد (۹/۵۸ درصد) به‌دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی برای این زمان، ایده‌آل است. مقدار NRMSE برای زمان‌های ۱ و ۲ ساعت کمتر از ۲۰ درصد (در محدوده ۱۰ تا ۱۳ درصد) به‌دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی، مناسب است (جدول ۴). مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در هر سه زمان مختلف کمتر از ۰/۰۳ (در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) به‌دست آمد که نزدیک به عدد صفر است. مثبت بودن مقادیر CRM نشان می‌دهد که در مجموع مدل HYDRUS 2D، رطوبت را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند. محدوده CRM برای قطره‌چکان ۴۰ سانتی‌متری در سه زمان مختلف بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۰ است (جدول ۴). با توجه به جدول ۴، متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی رطوبت حجمی، در ۱، ۲ و ۴ ساعت در محدوده ۸ تا ۱۱ درصد محاسبه شد که بیشترین خطا در بین سه

نتایج شان و همکاران (۲۶)، کاندلوس و سیمونک (۱۵)، نقوی و همکاران (۹) و خرمی و همکاران (۵) تطابق بهتر و مناسب‌تری دارد.

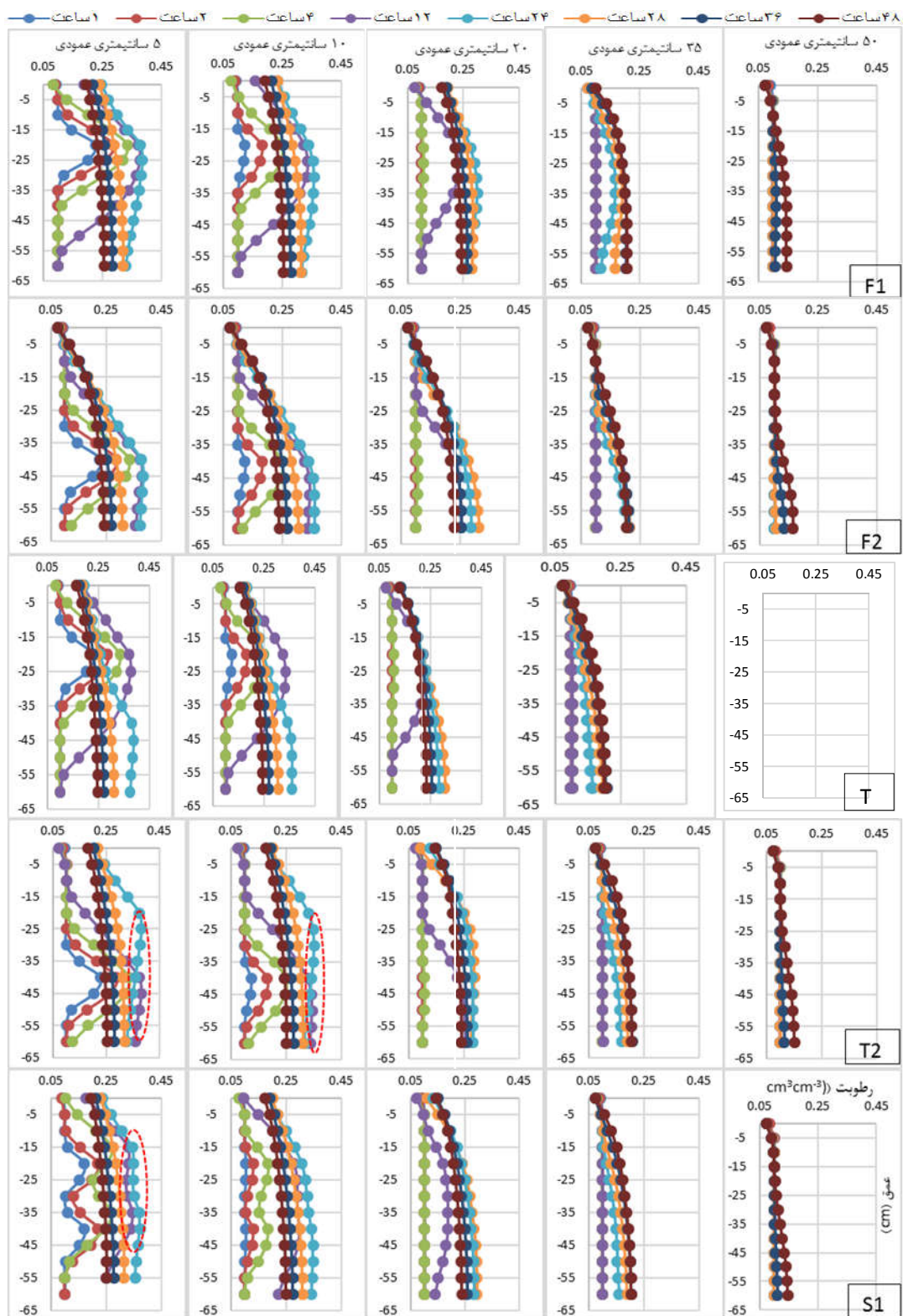
سناریوهای مختلف

در شکل ۴ توزیع رطوبت حجمی در فواصل عمودی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ سانتی‌متری (۸، ۱۲ و ۱۹) از قطره‌چکان برای آنالیز سناریوهای مختلف (کارکرد ۲۴ ساعته قطره‌چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری (F۱)، کارکرد ۲۴ ساعته قطره‌چکان در عمق ۴۰ سانتی‌متری (F۲)، کارکرد قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت دوم (T۱)، کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت دوم (T۲) و کارکرد هم‌زمان ۱۲ ساعته دو قطره‌چکان (S۱) در مدت زمان‌های ۱، ۲، ۴، ۱۲، ۲۴، ۲۸، ۳۶ و ۴۸ ساعت بعد از شروع نفوذ (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که در سناریوی F۱ (شکل ۴) مشاهده می‌شود، بیشترین رطوبت حجمی (حدود ۳۸ درصد) در عمق ۲۰ سانتی‌متری (محل استقرار قطره‌چکان) برای زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متری عمودی و کمترین رطوبت حجمی (۵ درصد) در عمق‌های بالایی (۰ تا ۱۰ سانتی‌متری) و پایینی (۳۵ تا ۶۰ سانتی‌متری) برای زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متری عمودی اتفاق افتاده است. قابل ذکر است که در زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت، رطوبت خاک کم بوده و با گذشت زمان (در زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت) رطوبت خاک تا حد اشباع افزایش یافته است و چون قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری یک روز به‌طور کامل کار کرده، لذا در زمان‌های ۲۸، ۳۶ و ۴۸ ساعت، رطوبت خاک از حد اشباع به ۲۶ تا ۱۸ درصد در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متری عمودی کاهش یافته است.

در سناریوی F۲ بیشترین رطوبت حجمی (۳۵ درصد) جایی که قطره‌چکان قرار دارد برای زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت

تحقیقی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS حرکت آب در اطراف قطره‌چکان در یک خاک لومی رسی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری ابعاد پیاز رطوبتی و مقدار رطوبت حجمی خاک در شرایط آزمایشگاهی و در شرایط مزرعه‌ای مقایسه شد. مقدار RMSE برای فواصل مختلف قرارگیری قطره‌چکان بین ۰/۱۱ تا ۰/۴۵ رطوبت حجمی خاک و ۰/۹۸ تا ۴/۳۶ سانتی‌متر پیشروی رطوبت در خاک متفاوت بوده است (۱۴ و ۱۵).

شان و همکاران آزمایش‌های صحرایی را روی نحوه توزیع رطوبت حجمی در آبیاری قطره‌ای انجام داده، سپس به شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی خوبی دارد به طوری که حداقل میزان ضریب تعیین ۰/۸۶ و RMSE در پیش‌بینی میزان رطوبت حجمی کمتر از ۱/۷ درصد به‌دست آمد (۲۶). نقوی و همکاران (۹) در تحقیقی به بررسی پیش‌بینی توزیع رطوبت در خاک اطراف یک قطره‌چکان با شبیه‌سازی توسط مدل HYDRUS 2D پرداختند. حداکثر میزان خطای RMSE، ۰/۰۵ به‌دست آمد که به ازای زمان ۱/۵ ساعت از شروع آبیاری در عمق ۳۰ سانتی‌متری در محل نصب قطره‌چکان مشاهده شد. برآوردها با سپری شدن ۷۲ ساعت از اتمام آبیاری و میانگین خطای RMSE، ۰/۰۰۲ به‌دست آمد که به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده بود. در تحقیق دیگری شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و توزیع مجدد رطوبت در خاک در آبیاری قطره‌ای توسط مدل HYDRUS 2D انجام گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده میزان RMSE در درصد رطوبت حجمی خاک برای بازه‌های زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته کمتر از ۱۰ درصد بود که نشان از قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی دارد. بیشترین میزان حداکثر خطا پنج درصد حجمی رطوبت و میانگین مطلق خطا ۲/۰۵ درصد حجمی رطوبت بوده است (۵). تحقیق حاضر از نظر ضریب تعیین و RMSE رطوبت حجمی خاک برای قطره‌چکان‌های عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری آبیاری قطره‌ای با



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع رطوبت حجمی عمودی در فواصل مختلف (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ سانتی متری) برای سناریوهای مختلف

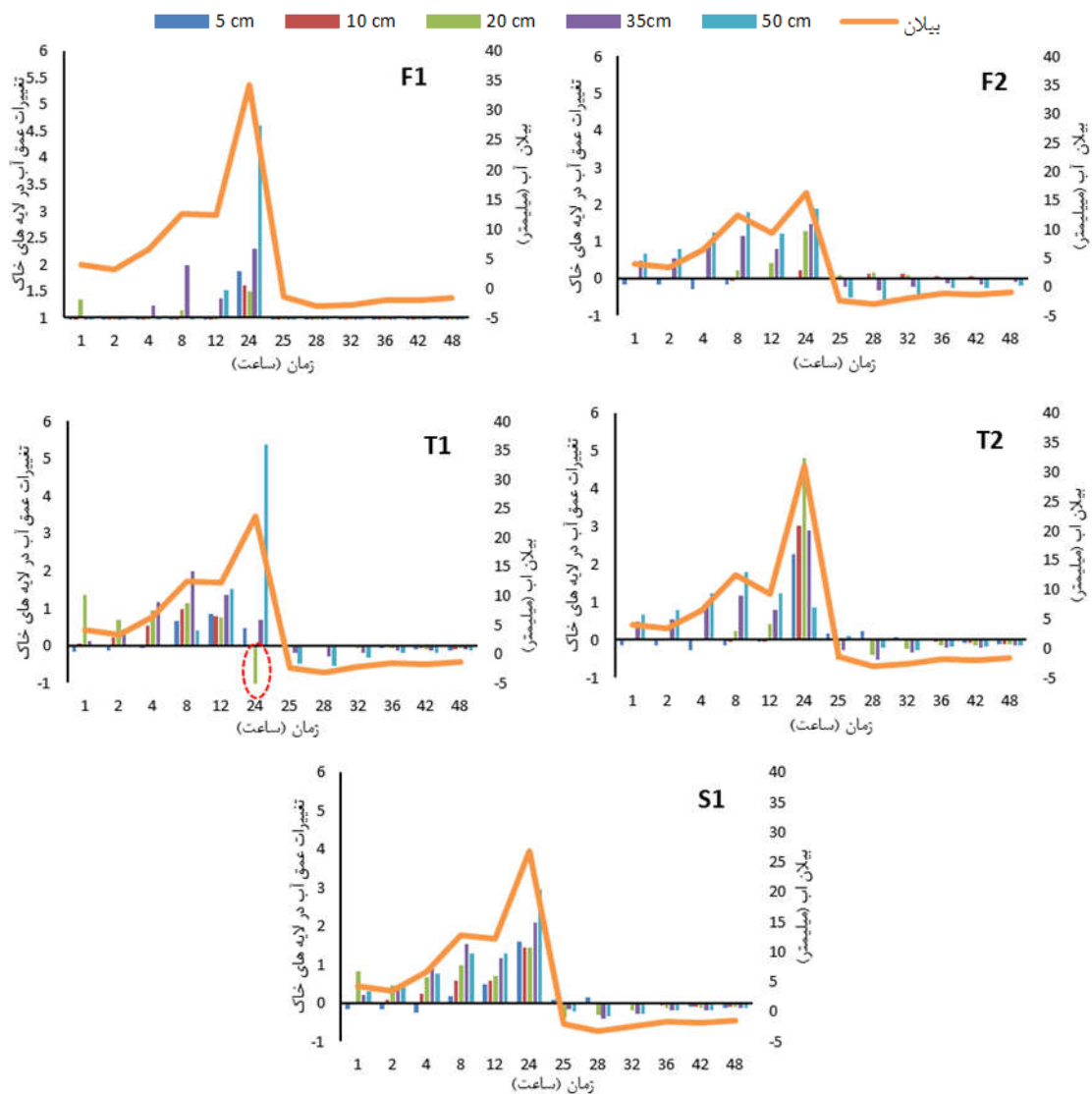
شکل مشخص شده است). در نهایت در سناریوی آخر (S1) دو قطره‌چکان اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری به طور هم‌زمان در نیمه اول روز (۱۲ ساعت اول) کار می‌کنند. در فاصله ۵ سانتی متری عمودی در مدت زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت رطوبت حجمی از ۵ (بدون قطره‌چکان) تا ۲۵ درصد (وجود دو قطره‌چکان در اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری) افزایش یافته که این اتفاق در چهار سناریوی اول در اعماق بالا و پایین به طور هم‌زمان رخ نداده بود. بیشترین رطوبت در زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت در فاصله ۵ سانتی متری عمودی، به مقدار ثابتی (تقریباً ۳۵ درصد) مابین دو قطره‌چکان رسیده است (روی شکل این قسمت مشخص است). لازم به ذکر است که در تمامی سناریوها در فاصله ۵۰ سانتی متری عمودی در مدت زمان‌های ۲۸، ۳۶ و ۴۸ ساعت، رطوبت حجمی خاک به صورت عمودی شبیه‌سازی شده و رطوبت از ۵ (اعماق بالا) تا ۱۵ درصد (اعماق پایین) متغیر بوده است.

در شکل ۵ مقادیر عمق آب ذخیره شده در لایه‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ سانتی متری خاک و بیلان رطوبتی پروفیل خاک در زمان‌های مختلف برای پنج سناریو تعریف شده توسط مدل HYDRUS را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیلان آب در پنج سناریو از ساعت ۲۵ تا ۴۸ در لایه‌های مختلف خاک دارای مقدار منفی است و تخلیه آب در این پنج سناریو تقریباً ۱۲- سانتی متر است. همچنین در سناریوی T1 در زمان ۲۴ ساعت و برای عمق ۲۰ سانتی متری، ۱- سانتی متر تخلیه آب داریم (قسمت مشخص شده روی شکل). بیلان آب در ۲۴ ساعت اول دارای مقدار مثبتی (تخلیه آب صورت نگرفته) است و این نشان‌دهنده ذخیره آب در لایه‌های مختلف خاک طی مدت زمان ۲۴ ساعت اول است. بیشترین عمق آب ذخیره شده در عمق ۵۰ سانتی متری برای سناریوهای F1 و T1 در زمان ۲۴ ساعت اتفاق افتاد که مقادیرشان به ترتیب برابر ۴/۸ و ۵/۳ میلی متر است.

همچنین در سناریوی T2 بیشترین عمق آب ذخیره شده به مقدار ۴/۹ میلی متر در زمان ۲۴ ساعت در لایه ۲۰ سانتی متری

در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متری عمودی و کمترین رطوبت حجمی (۵ درصد) در عمق‌های بالایی (۰ تا ۳۰ سانتی متری) و پایینی (۵۰ تا ۶۰ سانتی متری) برای زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متری عمودی رخ داده است. همچنین در زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت رطوبت خاک کمتر بود و در زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت رطوبت تا حد اشباع افزایش یافته و چون قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری یک روز به طور کامل کار کرده (همانند قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری)، لذا با گذشت زمان بیشتر (زمان‌های ۲۸، ۳۶ و ۴۸ ساعت) رطوبت خاک از ۳۵ به ۲۷ تا ۵ درصد در فواصل پنج و ۱۰ سانتی متری عمودی کاهش یافته است.

در سناریوی T1 دو قطره‌چکان در اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری به ترتیب در نیمه اول روز (۱۲ ساعت اول) و نیمه دوم روز (۱۲ ساعت دوم) کار کردند. با توجه به شکل ۴ متوجه خواهیم شد که در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متری عمودی، بیشترین رطوبت حجمی در جاهایی که قطره‌چکان‌ها قرار دارند به دست آمده‌اند، لذا برای زمان ۱۲ و ۲۴ ساعت مقدار این رطوبت به ترتیب ۳۴ تا ۳۶ و ۳۷ تا ۳۵ درصد است. همچنین در سناریوی T2 همانند سناریوی T1 دو قطره‌چکان وجود دارد با این تفاوت که در نیمه اول روز قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری و در نیمه دوم روز قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری کار می‌کنند. در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متری عمودی، بیشترین رطوبت حجمی برای زمان ۱۲ و ۲۴ ساعت به دست آمد. گفتنی است که رطوبت حجمی در زمان ۲۴ در ۱۲ ساعت اول کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری، در اعماق ۲۰ تا ۶۰ سانتی متری پروفیل خاک کاهش چشمگیری نداشت، لذا می‌توان گفت در عمق ۴۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت اول، رطوبت خاک به حد اشباع رسید و زمانی که رطوبت حجمی می‌خواهد باگذشت زمان کاهش یابد، قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت دوم شروع به کار می‌کند و جلوی کاهش رطوبت حجمی اعماق پایین پروفیل خاک گرفته‌شده و رطوبت حجمی به مقدار ثابتی می‌رسد (در سناریوی T2 روی



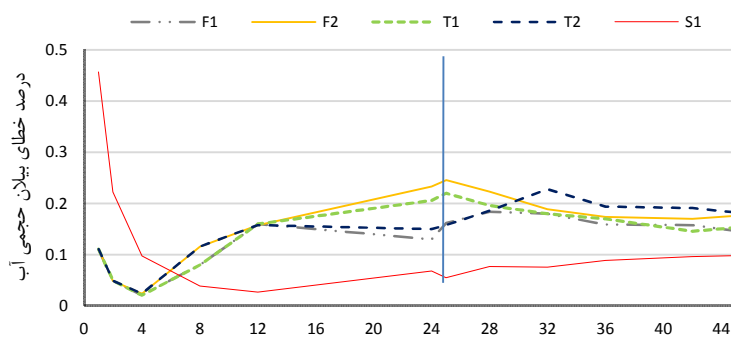
شکل ۵. تغییرات عمق آب ذخیره شده و بیلان آب در زمان‌های مختلف برای پنج سناریو

دلیل استقرار قطره‌چکان‌ها در عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری و نیز درصد بالای شن خاک (بافت خاک لوم شنی است) و کم بودن صعود مویینگی باشد. با توجه به جدول ۵، بیلان نهایی آب حاکی از آن است که بیشترین و کمترین مقدار آب ذخیره شده در پروفیل خاک مربوط به سناریوهای F1 و F2 به ترتیب به میزان ۶۰/۱۱۸ و ۴۱/۱۷۸ میلی‌متر است. به نظر می‌رسد که استفاده از سناریوی S1 در مقایسه با چهار سناریوی دیگر به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. چراکه می‌توان با نصف

رخ داده است، به دلیل اینکه در این سناریو قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی‌متری در ۱۲ ساعت دوم شروع به کار کرده است، لایه‌های اولیه پروفیل خاک (۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری) دارای عمق آب ذخیره شده بیشتری نسبت به لایه‌های پایینی هستند. جدول ۵ مقادیر عمق آب ذخیره شده در لایه‌های مختلف پروفیل خاک را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار آب جمع شده برای لایه‌های بیشتر از ۲۰ سانتی‌متری برای پنج سناریوی F1، F2، T1، T2 و S1 به دست آمده که می‌تواند به

جدول ۵. مقادیر عمق آب ذخیره شده (mm) در پروفیل ۶۰ سانتی متری خاک برای پنج سناریو

S1	T2	T1	F2	F1	عمق لایه خاک (cm)
۱/۶۹۴	۱/۷۳۲	۱/۲۳۹	-۰/۶۲۸	۲/۵۷	۰-۵
۲/۶۶۵	۲/۷۰۲	۲/۲۹۳	۰/۵۸۴	۳/۴۷۹	۵-۱۰
۳/۳۳۷	۳/۳۸۳	۳/۰۰۵	۱/۵۵۷	۴۴/۱۱	۱۰-۱۵
۳/۸۴۲	۳/۹۰۳	۳/۵۲۵	۲/۳۳۹	۴/۵۹	۱۵-۲۰
۴/۲۶۴	۴/۳۴۳	۳/۹۵۶	۳/۰۱۹	۴/۹۸۱	۲۰-۲۵
۴/۶۲۸	۴/۷۲۴	۴/۳۳۶	۳/۶۲۶	۵/۲۹۲	۲۵-۳۰
۴/۹۴۶	۵/۰۵۶	۴/۶۷۱	۴/۱۷۴	۵/۵۳۶	۳۰-۳۵
۵/۲۲۳	۵/۳۴۲	۴/۹۶۵	۴/۶۶۲	۵/۷۱۹	۳۵-۴۰
۵/۴۵۲	۵/۵۷۶	۵/۲۲۰	۵/۰۷۶	۵/۸۵۲	۴۰-۴۵
۵/۶۳۳	۵/۷۶۲	۵/۴۲۸	۵/۴۰۰	۵/۹۴۵	۴۵-۵۰
۵/۷۶۴	۵/۸۹۶	۵/۵۷۸	۵/۶۲۶	۶/۰۰۲	۵۰-۵۵
۵/۸۳۳	۵/۹۶۶	۵/۶۵۸	۵/۷۴۳	۶/۰۲۹	۵۵-۶۰
۵۳/۲۸۲	۵۴/۳۸۵	۴۹/۸۷۴	۴۱/۱۷۸	۶۰/۱۱۸	بیان آب (mm)



شکل ۶. درصد خطای بیان حجمی آب طی ۲۴ و ۴۸ ساعت برای پنج سناریو

نتیجه‌گیری

برای بررسی اعتبار مدل با نتایج اندازه‌گیری از یکسری شاخص‌های آماری R^2 , RE, CRM, $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ RMSE و NRMSE استفاده شد که متوسط مقادیر به دست آمده آنها برای قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۱۰/۶۸، -۰/۰۵۴، ۰/۰۲۶ و ۱۳/۱۸ و مقادیر این پارامترها برای قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری به ترتیب برابر با ۰/۹۸، ۹/۲۹، ۰/۰۸۴، ۰/۰۲۲ و ۱۰/۸۱ به دست آمدند که نتیجه گرفته شد مدل HYDRUS 2D قادر است مقادیر رطوبت حجمی خاک را با دقت بهتر و مناسب‌تری شبیه‌سازی کند. همچنین در این تحقیق پنج سناریوی کارکرد ۲۴ ساعته

کردن ساعات کارکرد سیستم آبیاری قطره‌ای در زمان آبیاری صرفه‌جویی کرد.

شکل ۶ درصد خطای بیان حجم برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. حداکثر خطای بیان حجم ۰/۴۵۷ درصد برای سناریوی S1 رخ داده و کمترین خطای بیان حجمی آب ۰/۱۱ درصد برای سناریوهای F1، F2، T1 و T2 رخ داده است. طبق نظر دابرال و همکاران (۱۱) برای حصول نتایج مطلوب، مقدار این خطا نباید از یک درصد تجاوز کند. همچنین در این تحقیق بیشترین خطای بیان حجمی آب ۰/۳۸ درصد برای بافت خاک شنی و ۰/۲۸ درصد برای بافت لومی به دست آمد. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر بافت خاک، لوم شنی است.

مختلف خاک دارای مقدار منفی و در ۲۴ ساعت اول دارای مقدار مثبتی است. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار آب جمع شده برای لایه‌های بیشتر از ۲۰ سانتی متری برای پنج سناریوی F1، F2، T1، T2 و S1 به دست آمد. بیلان نهایی آب حاکی از آن است که بیشترین و کمترین مقدار آب ذخیره شده در پروفیل خاک مربوط به سناریوهای F1 و F2 به ترتیب به میزان ۶۰/۱۱۸ و ۴۱/۱۷۸ میلی متر است. بیشترین خطای بیلان حجمی آب برای سناریوی S1 (بافت خاک لوم شنی) به دست آمد که مقدارش برابر ۰/۴۵۷ درصد است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از سناریوی S1 در مقایسه با چهار سناریوی دیگر به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. چرا که می‌توان با نصف کردن ساعات کارکرد سیستم آبیاری قطره‌ای در زمان آبیاری صرفه‌جویی کرد.

قطره‌چکان در عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری (F1 و F2)، کارکرد قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت دوم (T1)، کارکرد قطره‌چکان عمق ۴۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت اول و کارکرد قطره‌چکان عمق ۲۰ سانتی متری در ۱۲ ساعت دوم (T2)، کارکرد هم‌زمان ۱۲ ساعته دو قطره‌چکان (S1) توسط مدل HYDRUS 2D تعریف شدند. با توجه به نتایج مدل، در چهار سناریوی F1، F2، T1 و T2 بیشترین رطوبت حجمی برای زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت در فواصل ۵ و ۱۰ سانتی متری عمودی، جاهایی که قطره‌چکان‌ها قرار دارند به دست آمد و در سناریوی S1 بیشترین رطوبت حجمی در زمان‌های ۱۲ و ۲۴ ساعت در فاصله پنج سانتی متری عمودی، به مقدار ثابتی (۳۵ درصد) مابین دو قطره‌چکان رسیده است. بیلان آب در پنج سناریو از ساعت ۲۵ تا ۴۸ در لایه‌های

منابع مورد استفاده

- اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی* ۱۱(۴): ۲۸-۱۴.
- پوریزدان‌خواه، ه. و م. خالدیان. ۱۳۹۱. بهبود کارایی مدل HYDRUS-2D در اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک. *نشریه آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد* ۲۶(۶): ۱۴۴۹-۱۴۴۰.
- خانجانی، س. و ر. دلیر حسن‌نیا. ۱۳۹۳. بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دو لایه. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی* ۲۸(۲): ۴۲۹-۴۱۹.
- خان‌محمدی، ن. ح. رضایی، س. بشارت و ج. بهمنش. ۱۳۹۱. ارزیابی شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای بر اساس مشخصات هیدرولیکی خاک و اندازه‌گیری‌های میدانی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران* ۶(۳): ۱۸۷-۱۹۵.
- خرمی، م. ا. علیزاده و ح. انصاری. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک در آبیاری قطره‌ای توسط مدل HYDRUS 2/3D. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)* ۲۷(۴): ۷۰۲-۶۹۲.
- خورسند، ا. و. رضاردی‌نژاد و ع. شهیدی. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی. *مدیریت آب و آبیاری* ۴(۱): ۱۰۴-۸۹.
- زارع ابیانه، ح. ا. فرخی، م. وظیفه‌دوست و خ. اژدری. ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز. *نشریه آب و خاک* ۲۴(۶): ۱۲۰۹-۱۱۹۷.
- قربانیان، م. م. ص. منجزی، ح. ابراهیمیان و ع. لیاقت. ۱۳۹۳. 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)* ۲۸(۱): ۱۸۹-۱۷۹.

۹. نقوی، ه.، م. حسینی‌نیا، ش. کریمی‌گوغری و م. ایران‌دوست. ۱۳۹۱. توانایی مدل HYDRUS 2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک* ۱۶(۶۱): ۵۹-۶۸.
10. Cote, C. M., K. L. Bristow, P. B. Charlesworth, F. J. Cook and P. J. Thorburn. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science* 22: 143-156.
11. Dabral, P. P., P. K. Pandey, A. Pandey, K. P. Singh and M. S. Singh. 2012. Modelling of wetting pattern under trickle source in sandy soil of Nirjuli, Arunachal Pradesh (India). *Irrigation Science* 30(1): 287-292.
12. EL-Nesr, M. N., A. A. Alazba and J. Simunek. 2014. HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science* 32: 111-125
13. Jiusheng, L., J. Zhang and M. Rao. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management* 67: 89-104.
14. Kandelous, M. and J. Simunek. 2010a. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using Hydrus-2D. *Agricultural Water Management* 97: 1080-1076.
15. Kandelous, M. and J. Simunek. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science* 28: 435-444.
16. Li, J., J. Zhang and M. Rao. 2004. Wetting patterns and nitrogen distribution as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management* 67: 89- 104.
17. Mmolava, K. H. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review, *Plant and Soil* 222: 163-190.
18. Mostafazadeh-fard, B., H. Mansouri Mousavi and M. Feyzi. 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135(1): 32-38.
19. Patel, N. and T. B. S. Rajput. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management* 95: 1335-1349.
20. Peter, J., J. Thorburn, F. Cook and K. L. Bristow. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science* 22: 121-127.
21. Roberts, T. L., S. A. White, A. W. Warrick and T. L. Thompson. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management* 95: 669-677.
22. Schaap, M. G. and F. J. Leij. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science* 163: 765-779. Schaap, M. G., F. J. Leij and M. TH. Van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251: 163-176.
23. Schmied, B., R. Schulin, U. Schmidhalter and E. Frossard. 2001. Nitrogen Dynamics and Leaching from Humus-Rich and Tile-Drained Agricultural Soil. Dissertation Submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, for the Degree of Doctor of Natural Science. Swiss. Schwartzman, M. and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112(3): 242-253. Shan, Y., Q. Wang and CH. Wang. 2011. Simulated and measured soil wetting patterns for overlap zone under double points sources of drip irrigation. *African Journal of Biotechnology* 10(63): 13744-13755.
24. Simunek, J., M. TH. Van Genuchten and M. Sejna. 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably- Saturated Media, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress and Prague, Czech Republic.
25. Singh, D. K., T. B. S. Rajput, D. K. Singh, H. S. Sikarwar, R. N. Sahoo and T. Ahmad. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management* 83: 130-134.
26. Singh, A. K., R. Tripathy and U. K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES Wheat and CropSyst models for water-Nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management* 95: 776-786.
27. Siyal, A. A. and T. H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *Agricultural Water Management* 96: 893-904.
28. Skaggs, T. H., T. J. Trout, J. Simunek and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 30: 304-310.
29. Van Genuchten, M. TH. 1978. Mass Transport in Saturated-Unsaturated Media: One-Dimensional Solutions, Research Rep. No. 78-WR-11, Water Resources Program, Princeton Univ., Princeton, NJ.
30. Van Genuchten, M. TH. 1987. A Numerical Model for Water and Solute Movement in and Below the Root Zone. Research Report No 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

Estimation of Water Mass Balance and Soil Wetting Pattern for Subsurface Drip Irrigation in the Porous Media

A. Khorsand, M. Bazaneh, S. Besharat* and K. Zeinalzadeh¹

(Received: June 11-2016 ; Accepted: March 14-2018)

Abstract

Subsurface drip irrigation systems, compared to other irrigation systems (basin and furrow), enhance the delivery of water and nutrients directly into the root zone. The purposes of this study were to determine wetting front advancement in a subsurface drip irrigation and to compare the results with the HYDRUS 2D model simulation. In this study, the irrigation using T-Tape was carried out on a sandy-loam soil by two emitters at different irrigation times. The Wet moisture meter device was used to determine the soil water content. Evaluation of the simulated and measured soil water content was performed by using the adjusted determination coefficient (R^2), relative error (RE), and the normalized root mean square error (NRMSE). Based on the results, the NRMSE of soil water content prediction for the emitters at the depths of 20 and 40 cm was calculated to be in the range of 10 to 19 and 10 to 13 percent, respectively. Also, RE for the emitters at depths of 20 and 40 cm was in the range of -16 to -5 and 8 to 11 percent, respectively. The average R^2 for the emitters at depths of 20 and 40 cm was calculated to be 0.87 and 0.98, respectively. Also, five scenarios (F1, F2, T1, T2 and S1) were evaluated to assess the amount of water stored in the soil profile and water mass balance. The results indicated that the model could be used to predict the soil water content subsurface drip irrigation.

Keywords: HYDRUS Model, Rosetta Model, Scenario, Stored water, Water mass balance

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran.

*: Corresponding Author, Email: s.besharat@urmia.ac.ir