نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و سوم، شماره دوم، ۱۳۹۵
http://jwsc.gau.ac.ir

شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D

*سینا بشارت[۱] و سودابه ملایی‌توانی[۲]
[۱]استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، [۲]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه
تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۳

چکیده

سابقه و هدف: سیستم آبیاری قطره‌ای یکی از مؤثرترین راهکارها برای افزایش بهره‌وری و استفاده بهینه از منابع آب موجود می‌باشد. درک توانایی‌های کامل روش‌های آبیاری قطره‌ای نیازمند بهینه‌سازی پارامترهای در دسترس می‌باشد. مهم‌ترین این پارامترها شامل دور، شدت و زمان آبیاری می‌باشند. در آبیاری زیر سطحی نیز با حذف تبخیر از سطح خاک مقدار مصرف آب کاهش می‌یابد. در این راستا مدل‌های عددی با صرفه‌جویی در زمان و هزینه به‌منظور مطالعه کارکرد سیستم‌های آبیاری و بهینه‌سازی پارامترهای مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طراحی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، شکل و ابعاد پیاز رطوبتی عامل اصلی در استقرار محل قطره‌چکان‌ها است بدین منظور از مدل‌های مختلف با داشتن مشخصات هیدرولیکی خاک، دبی و زمان کارکرد جهت تخمین دقیق پیاز رطوبتی استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش اندازه‌گیری پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، آزمایش‌ها جهت بررسی پروفیل رطوبتی خاک، تحت روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه اجرا گردید. اندازه‌گیری‌ها با نصب لوله‌های T-TAPE در فواصل یک متر از هم و اعمال دبی ۴ لیتر درساعت به‌صورت سطحی و زیرسطحی انجام گرفت. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی لوله‌ها در عمق ۰/۲ متری نصب شد. اندازه‌گیری رطوبت در هر دو سیستم آبیاری با استفاده از رطوبت‌سنج WET انجام شد. اندازه‌گیری رطوبت به‌صورت دوبعدی در عمق و شعاع مشخص و در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه ثبت شد. در این پژوهش شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D هماهنگی قابل‌قبولی با داده‌های مشاهداتی داشت (RMSE بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۴). بر اساس نتایج تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده (R^2) در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در زمان کاربرد ۲۴ ساعت به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۱ و برابر ۰/۹۰۶ می‌باشد. در این پژوهش از مدل شبکه عصبی ROSETTA جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده شد. با استفاده از سه تابع تخمین موجود در مدل، پارامترهای هیدرولیکی در ROSETTA ارزیابی شد.

* مسئول مکاتبه: sina323@yahoo.com

نتیجه‌گیری: براساس مقادیر خطای به‌دست آمده مشاهده شد که اختلاف میزان خطا در دو مدل FULL ROSETTA و ROSETTA LITE ناچیز بوده و تنها در بعضی از عمق‌ها مقدار خطای مدل FULL ROSETTA کم‌تر از مدل ROSETTA LITE بوده است. در حالت کلی بر اساس نتایج می‌توان گفت داده‌های اندازه‌گیری تطابق خوبی با نتایج FULL ROSETTA دارد. نتایج نشان داد که می‌توان از نرم‌افزار HYDRUS در طراحی آبیاری قطره‌ای استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، پروفیل رطوبتی خاک، حرکت آب در خاک، شبیه‌سازی

مقدمه

در سال‌های اخیر هم‌زمان با رشد جمعیت و افزایش تقاضا و مصرف آب استفاده از روش‌های نوین آبیاری به‌منظور کاهش تلفات منابع آب و افزایش تولید محصولات کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آبیاری قطره‌ای با کم‌ترین اثر سوء بر منابع آب و خاک و با کنترل کاربرد آب، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها تأثیر به‌سزایی در رفع این چالش دارد (۱۸). در شرایط آب و هوایی ایران یکی از عمده‌ترین موانع افزایش تولید، عدم استفاده بهینه از منابع آب می‌باشد. چرا که قسمت عمده آب استحصالی در بخش کشاورزی مصرف شده و از طرف دیگر راندمان مصرف آب در این بخش حدوداً ۳۰ تا ۳۳ درصد می‌باشد (۶). با توسعه دقیق تکنولوژی آبیاری، سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌علت کارایی مصرف آب بیش‌تر، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به دیگر روش‌های آبیاری داشته است. در این روش 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 (۵، ۱۹).

در سیستم‌های آبیاری زیرسطحی در زیر سطح خاک به اندازه نیروی کاپیلاری در منطقه ریشه‌ها آب تراوش می‌شود. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کارایی مصرف آب بالایی دارد یعنی محصولات بالایی به‌ازای واحد مقدار آب کاربردی، تولید می‌شود. مقادیر کارایی مصرف آب به‌وسیله پارامترهای طراحی سیستم مثل عمق، شدت جریان، وضعیت اشباع خاک و مدت کاربرد آب مشخص می‌شود (۳، ۲۰). طراحی و مدیریت کارآمد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نیازمند فهم الگوی توزیع آب و املاح در خاک است (۶). به‌عبارتی دیگر برای بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی نیازمند است پیش‌بینی دقیقی از هندسه پروفیل رطوبتی و توزیع آب در خاک موجود باشد (۲۴).

برای مدل کردن جریان آب در خاک در قطره‌چکان‌های سطحی و یا زیرسطحی می‌توان از مدل‌های ریاضی یا عددی با استفاده از فرض‌های مشخص استفاده کرد. مدل‌های ریاضی مفهومی سریع از تعیین موقعیت جبهه پیشروی رطوبت ارائه می‌دهند (۷، ۱۷). برخی از این مدل‌های تحلیلی، عددی و یا تجربی جهت برآورد ابعاد منطقه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های تجربی با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی و مشاهدات مزرعه‌ای توسعه یافته‌اند و مدل‌های تحلیلی و عددی در حل معادلات حاکم بر جریان برای شرایط اولیه و مرزی خاص استفاده می‌شوند (۵، ۱۹). در برخی پژوهش‌ها از آنالیز ابعادی جهت شبیه‌سازی تغییرات رطوبتی خاک در پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای استفاده می‌شود. بر این اساس مدل‌های مختلفی بسط داده شده است که نتایج با مدل HYDRUS نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است (۱۳). در این پژوهش بیان

شده است که استفاده از مدل‌های عددی مانند HYDRUS به‌علت نیاز به اطلاعات ورودی زیاد در برخی موارد کارایی کم‌تری نسبت به مدل‌های تجربی دارند.

مطالعه قانی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که نوع و میزان شخم زمین تأثیر معنی‌داری بر روی فرصت زمان نفوذ و عمق آب نفوذیافته دارد و افزایش عمق شخم موجب کاهش چگالی ظاهری خاک و به تبع آن باعث افزایش حجم آب نفوذیافته در پروفیل خاک خواهد شد. همچنین النصر و همکاران (۲۰۱۴) خاطرنشان کردند که وجود یک لایه متراکم یا مرز غیرقابل نفوذ تأثیر بیش‌تری نسبت به دبی و تعداد قطره‌چکان در توزیع آب در ناحیه ریشه دارند (۹، ۱۱).

افزایش کارایی مصرف آب نیازمند تحلیل سیستم پیچیده آب و خاک توسط مدل‌های عددی می‌باشد. در این راستا الگوی رطوبتی خاک در آبیاری سطحی و تحت فشار توسط تعدادی از پژوهشگران اندازه‌گیری شده و به‌صورت تئوریک مورد تحلیل قرار گرفته است. از جمله این پژوهشگران عبارتند از بریسلر (۱۹۷۸)، اسولین (۲۰۰۲)، کوت و همکاران (۲۰۰۳)، مولاوا و اور (۲۰۰۳)، اسکاگز و همکاران (۲۰۰۴)، گاردناس و همکاران (۲۰۰۵)، سینگ و همکاران (۲۰۰۶)، وانگ و همکاران (۲۰۰۶)، کوک و همکاران (۲۰۰۶) و سیال و اسکاگز (۲۰۰۹) که برخی از این افراد همانند اسولین (۲۰۰۲)، کوت و همکاران (۲۰۰۳)، مولاوا و اور (۲۰۰۳)، اسکاگز و همکاران (۲۰۰۴)، گاردناس و همکاران (۲۰۰۵) و کوک و همکاران (۲۰۰۶) از مدل HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹) جهت شبیه‌سازی رطوبت خاک استفاده کردند (۱، ۲، ۸، ۱۰، ۲۲ و ۲۳). اسکاگز و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش خود نشان دادند که شبیه‌سازی HYDRUS-2D برای آبیاری قطره‌ای با جزییات اندازه‌گیری‌های صحرایی تطابق خوبی دارد.

همچنین سیال و اسکاگز (۲۰۰۹) با استفاده از مدل HYDRUS(2D/3D) تغییرات رطوبت خاک در آبیاری زیرسطحی را مطالعه نمودند و ارتباط پارامترهای هیدرولیکی و فیزیکی خاک را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی رطوبت خاک با استفاده از مدل HYDRUS همبستگی‌های خوبی با داده‌های مشاهداتی داشت (۴، ۲۱). کاندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) در مطالعه خود نشان دادند که مدل سه‌بعدی HYDRUS از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی‌های پیچیده و نیز همپوشانی پخش آب در آبیاری قطره‌ای برخوردار است (۱۲، ۱۵). خان‌محمدی و همکاران (۲۰۱۲) و رحیم‌زادگان و همکاران (۱۹۷۷) مطالعاتی در خصوص تأثیر مشخصات هیدرولیک خاک فقط برای آبیاری قطره‌ای سطحی انجام داده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مشخصات هیدرولیک خاک تأثیر قابل‌توجهی در شکل پروفیل رطوبتی خواهد داشت. در این زمینه مطالعات محدودی در خصوص بررسی تأثیر خصوصیات هیدرولکی خاک در پخش رطوبت در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به‌صورت هم‌زمان انجام گرفته است (۱۴، ۱۶).

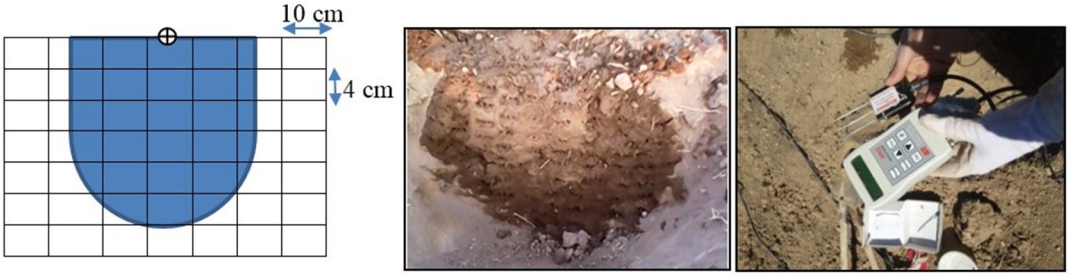
هدف از این پژوهش اندازه‌گیری دقیق میدانی پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و مقایسه نتایج با شبیه‌سازی انجام شده با مدل HYDRUS-2D می‌باشد. در این پژوهش قابلیت مدل جهت مدیریت بهتر آبیاری قطره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با روش‌های مختلف ارزیابی شد. بر این اساس با استفاده از تخمین دقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک مدل مورد نظر واسنجی گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش مطالعات در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه انجام گرفت. بافت خاک مزرعه لوم رسی و

درصد شن ۳۶/۸ درصد، سیلت ۲۴/۶ درصد، رس ۳۸/۶ درصد و چگالی ظاهری خاک ۱/۵۵ گرم در سانتی‌مترمکعب و درصد رطوبت خاک در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به‌ترتیب ۲۸ و ۵/۴ درصد محاسبه شد. خاک محل آزمایش جهت یکنواختی بیش‌تر تا عمق ۸۰ سانتی‌متر شخم زده شد. در این پژوهش از روش آبیاری قطره‌ای به روش T-Tape استفاده گردید (ضریب تغییرات ساخت ۰/۰۶ و یکنواختی توزیع ۸۰ درصد). مقدار دبی خروجی بر اساس اندازه‌گیری حجمی ۴ لیتر در ساعت به‌دست آمد و ثابت در نظر گرفته شد. در روش آبیاری قطره‌ای سطحی، قطره‌چکان‌ها در فواصل ۱ متری بر روی لوله‌هایی به قطر ۲ سانتی‌متر روی سطح خاک قرار داده شدند و پس از نصب لوله‌ها آبیاری انجام شد. در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نیز زمین تاعمق ۰/۲ متری حفر گردید و با قرار دادن لوله‌های T-Tape در این عمق، در ساعات مورد نظر و در انتهای هر آبیاری پروفیلی از خاک در وسط جبهه رطوبتی به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت حفر گردید. عمق نصب لوله‌ها در آبیاری زیر سطحی بر اساس مطالعات انجام شده متفاوت بود که عمق ۰/۲ متر بیش‌ترین کاربرد را داشته است (۱۲).

در این پژوهش برای تعیین میزان رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج جدید WET استفاده شد (با دقت ۳±). در خصوص کالیبراسیون دستگاه می‌توان چنین بیان نمود که با دستگاه رطوبت‌سنج WET در این مزرعه کارهای مختلفی انجام شده است که قبلاً این دستگاه برای خاک مورد نظر کالیبره و تأیید شده است. قبل از شروع آزمایش‌ها نیز در نقاط مختلف خاک و رطوبت‌های مختلف نمونه‌های واقعی تهیه و دقت دستگاه تأیید گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت در هر نقطه سنسورهای دستگاه درون خاک منطقه مورد نظر قرار داده شده و رطوبت در آن‌ها قرائت گردید. بر اساس شکل ۱ پروفیل خاک به‌صورت شبکه شطرنجی در نظر گرفته شد و این قرائت‌ها در فواصل افقی ۱۰ سانتی‌متر و فواصل عمودی ۴ سانتی‌متر انجام گرفته است. در انتهای هر آبیاری، پروفیلی از خاک در وسط جبهه رطوبتی حفر گردید. جهت مطالعه کاربردهای آب متفاوت، در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه و ۱، ۲، ۶، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت بعد از شروع آبیاری اقدام به تهیه پروفیل عمودی خاک گردید و با استفاده از دستگاه WET تغییرات رطوبت به‌صورت دوبعدی اندازه‌گیری شد. در کل آزمایش‌ها، تعداد ۲۷۰۰ رطوبت در مکان و زمان ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود در قسمت نتایج از بخشی از اندازه‌گیری‌ها برای مدت زمان آبیاری برای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی ۱، ۸ و ۲۴ ساعت و برای آبیاری زیرسطحی ۸ و ۲۴ ساعت استفاده شد.



شکل ۱- سنسور WET برای اندازه‌گیری رطوبت و پروفیل رطوبتی خاک مربوط به آبیاری قطره‌ای.

Figure 1. WET sensor for water content measuring and soil water content profile for trickle irrigation.

مدل‌سازی عددی: با توجه به عدم همپوشانی بین قطره چکان‌ها روند حرکت آب در طول نفوذ و توزیع به‌صورت متقارن در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی حرکت رطوبت خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶) انجام گرفت. معادله ریچاردز، معادله حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتروپیک خاک است که به‌شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\, K(h)\frac{\partial h}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] \quad (۱)$$

که در آن، θ مقدار رطوبت حجمی، h بار فشاری آب، t زمان، x مختصات افقی، z مختصات عمودی و K هدایت هیدرولیکی می‌باشند. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک توسط رابطه ون‌گنوختن- معلم مدل شده‌اند:

$$K(h) = K_s S_e^{l}[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^{m}]^2 \quad (۲)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{(1+|\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (۳)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r}, \qquad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (۴)$$

که در آن، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقی‌مانده، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع l، n و α پارامترهای شکل می‌باشند. مدل HYDRUS-2D از روش عناصر محدود (Galerkin-type) برای حل معادلات بالا استفاده کرده است. مش‌بندی مرزها در روش عناصر محدود مستطیلی و فقط در لبه‌های جبهه رطوبتی به‌صورت مثلثی در نظر گرفته شد. لوله قطره‌چکان در مرز به‌صورت یک نیم‌دایره در قسمت مرزی بالا وارد مدل گردید. در طول کاربرد آب در مرز، شدت جریان ثابت ۳/۱۸ سانتی‌متر بر ساعت برای لوله مورد استفاده قرار گرفت.

$$q = \frac{\text{flow rate } (cm^3.h^{-1})}{\text{surface area } (cm^2)} = \frac{4000}{20^2\pi} \quad (۵)$$

شرایط مرزی بالا مهم‌ترین قسمت در ورودی مدل می‌باشد که در حالت آبیاری قطره‌ای سطحی متغیر زمانی و در آبیاری زیر سطحی صفر در نظر گرفته شده است.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های خاک، وارد مدل ROSETTA گردید و در نهایت مشخصات هیدرولیکی مدل در جدول ۱ ارائه شده است. شبیه‌سازی برای تمام زمان‌های مختلف کاربرد آب انجام گرفت. سپس برای زمان مختلف و بر اساس سه روش (Carsel and Parrash، ROSETTA Lite، Full ROSETTA) تخمین مشخصات هیدرولیکی خاک، دوباره شبیه‌سازی انجام شد (۱۸). تخمین پارامترهای هیدوریکی خاک یکی از بخش‌های مهم در مدل بود که در دو مرحله تا رسیدن به جواب صحیح انجام گردید. مرحله اول اطلاعات موجود در خصوص پژوهش‌های انجام شده قبلی بود که در مزرعه مورد مطالعه انجام شده بود در این پژوهش‌ها از روش‌های مختلف حل معکوس و روش وودینگ (Wooding) تخمین دقیق از پارامترها در دست بود. در مرحله بعدی با تعریف سناریوهای مختلف در مدل و با تغییر پارامترهای هیدرولیکی نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقایسه و بهترین مقدار برای پارامترها انتخاب گردید. بر اساس بخشی از داده‌های اندازه‌گیری شده و تغییر در مشخصات هیدرلیکی و شرایط مرزی موجود کالیبراسیون مدل انجام شد که در بخش نتایج بر این اساس دقت مدل مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی خاک استفاده شده در مدل عددی.

Table 1. Soil hydraulic properties used in numerical model.

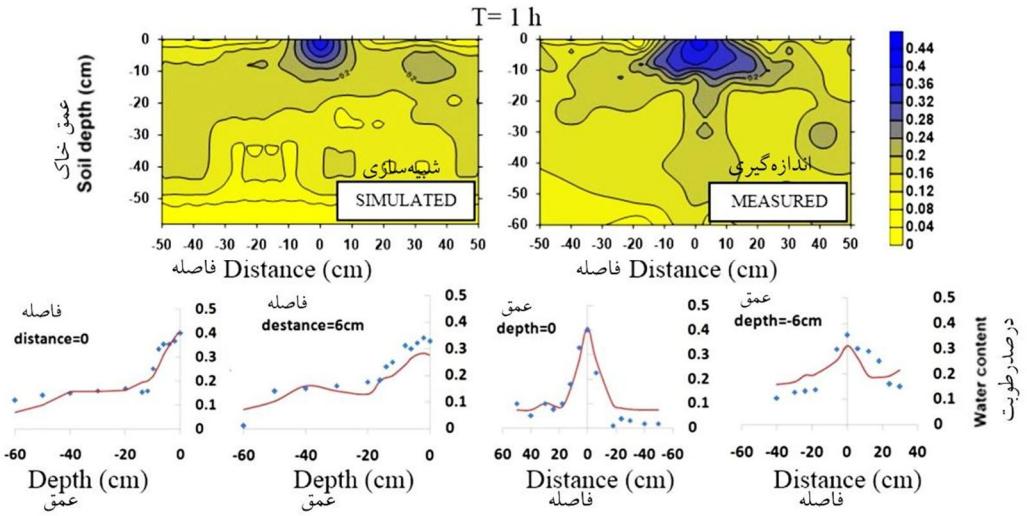
پارامترهای هیدرولیکی خاک (Soil hydraulic properties)						
I	α	n	K	θs	θr	عمق خاک 0-100 cm (Soil depth)
-0.82	0.123	1.42	14.59	0.44	0.054	

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی مدل هایدروس برای توزیع رطوبت خاک و به کمک مدل Surfer برای داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان داده شده است (شکل ۲ تا ۵). نمودارهای تغییرات رطوبت در فواصل و اعماق مختلف و برای دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و دیگری سطحی و در زمان‌های ۱، ۸ و ۲۴ ساعت پس از آبیاری نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در تمامی این نمودارها مشاهده می‌شود در برخی نقاط نتایج شبیه‌سازی بیش‌تر و در برخی نقاط کم‌تر از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌دست آمده است.

شکل ۲ تغییرات رطوبت در آبیاری قطره‌ای سطحی را در ۱ ساعت پس از آبیاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیشروی رطوبت در نتایج شبیه‌سازی شده کم‌تر از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌دست آمده است. اصلی‌ترین دلیل این تفاوت تغییر جزئی مشخصات هیدرولیکی در نقاط مختلف خاک است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود تغییرات رطوبت در تمامی شکل‌ها بین ۰ تا ۰/۴۴ می‌باشد. محل قطره‌چکان دارای حداکثر رطوبت می‌باشد و با گذشت زمان به نقطه اشباع نزدیک می‌شود.

همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود دقت شبیه‌سازی در اطراف قطره‌چکان‌ها نسبت به نقاط دورتر کم‌تر می‌باشد و در نقاط اطراف قطره‌چکان‌ها نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک کم‌تر از نتایج اندازه‌گیری به‌دست آمده است و در کل، نتایج تطابق خوبی داشته است.



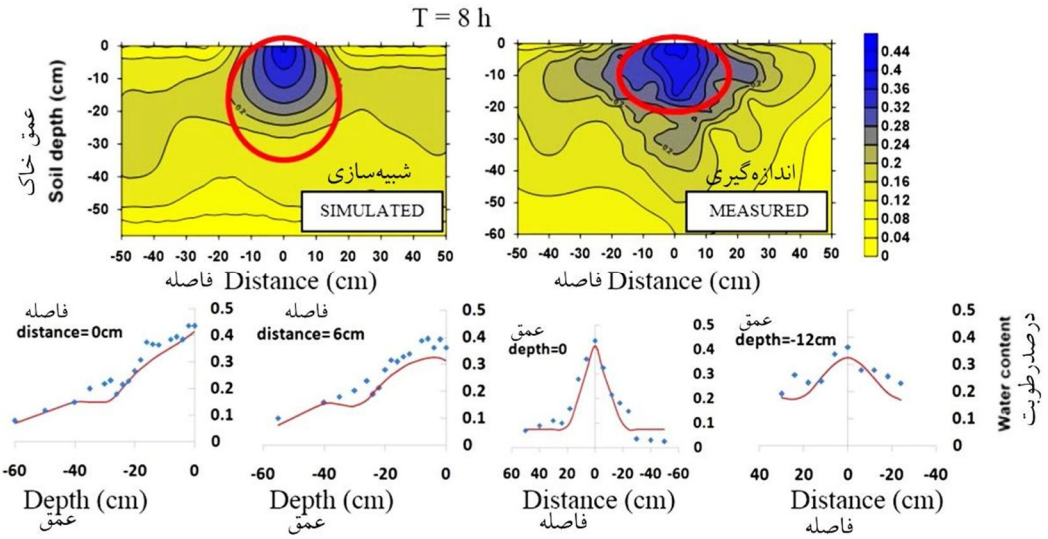
شکل ۲- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در زمان ۱ ساعت پس از آبیاری قطره‌ای سطحی، نقاط داده‌های اندازه‌گیری‌شده و خط ممتد داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

Figure 2. Variation of Measured and simulated water content in 1 hour after surface trickle irrigation, points is measured data and line is simulated data.

پیشروی آب در عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در شکل ۳ نشان می‌دهد که در داده‌های شبیه‌سازی عمق پیشروی رطوبت منظم‌تر بوده و در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری عمق کم‌تری داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در داده‌های شبیه‌سازی در عمق ۲۵ تا ۴۰ سانتی‌متر رطوبت در حداقل مقدار خود یعنی رطوبت ۰/۰۸ تا ۰/۱۶ قرار دارد در صورتی که در داده‌های اندازه‌گیری این نقاط دارای رطوبت ۰/۱۶ تا ۰/۲۴ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که مدل عمق کم‌تری برای پیشروی شبیه‌سازی کرده است.

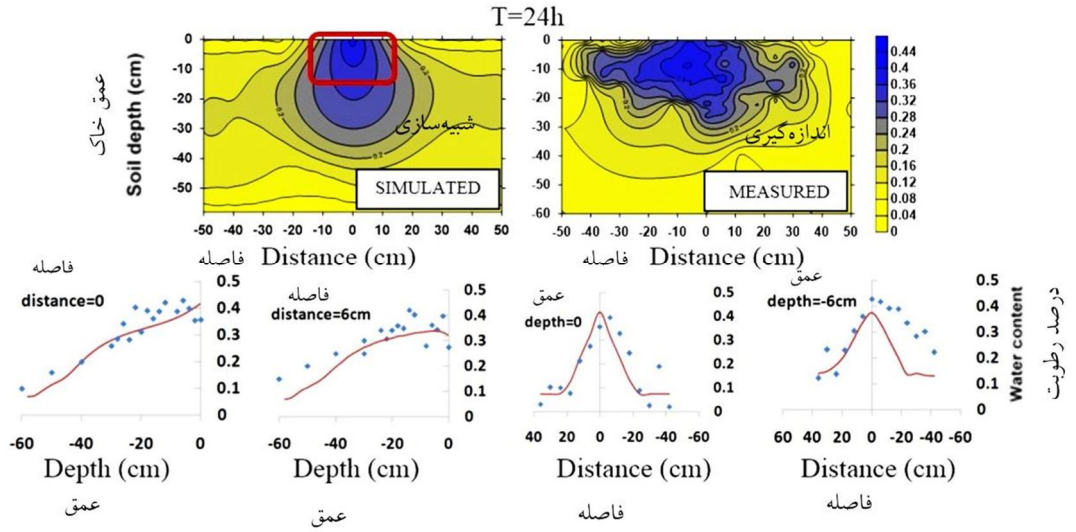
با توجه به شکل ۴ همان‌طور که قابل انتظار بود بیش‌ترین پیشروی رطوبت مربوط به زمان کارکرد سیستم در ۲۴ ساعت بوده است. با توجه به شکل ۴ و کادر قرمز مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر رطوبت اندازه‌گیری شده پس از ۲۴ ساعت کارکرد سیستم در عمق ۱۵ تا ۲۵ و فاصله افقی ۱۰ سانتی‌متری تشکیل شده است در صورتی که در داده‌های شبیه‌سازی حداکثر رطوبت در عمق ۰ تا ۵ و فاصله افقی ۵ سانتی‌متر قرار گرفته است. با این وجود تطابق قابل‌قبولی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی وجود دارد.

در این پژوهش بر اساس نتایج مشاهده شد که مدل عددی HYDRUS-2D دقت بالایی در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک دارد که این نتایج هماهنگ با پژوهشی توسط کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) می‌باشد که در پژوهش خود دقت حرکت آب در آبیاری زیرسطحی را در دو شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D مورد بررسی قرار دادند.



شکل ۳- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در زمان ۸ ساعت در آبیاری قطره‌ای سطحی، نقاط داده‌های اندازه‌گیری‌شده و خط ممتد داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

Figure 3. Variation of Measured and simulated water content in 8 hours after surface trickle irrigation, points is measured data and line is simulated data.



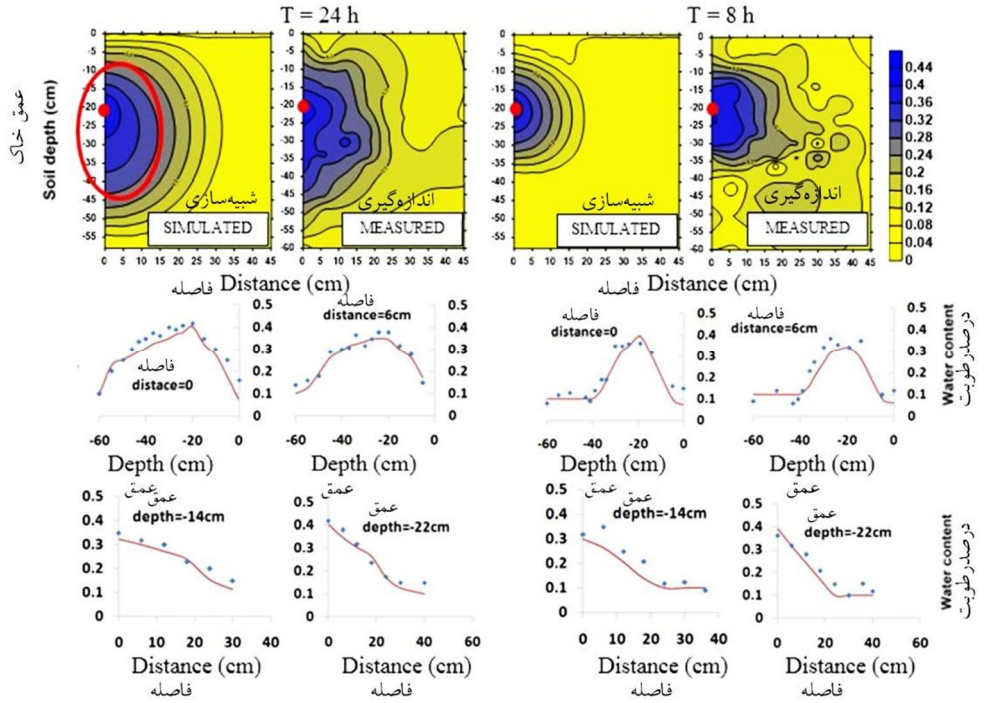
شکل ٤- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در زمان ٢٤ ساعت در آبیاری قطره‌ای سطحی، نقاط داده‌های اندازه‌گیری‌شده و خط ممتد داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

Figure 4. Variation of Measured and simulated water content in 24 hours after surface trickle irrigation, points is measured data and line is simulated data.

در این قسمت نتایج مربوط به آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ارائه می‌گردد. شکل ۵ تغییرات رطوبت داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده را پس از ۸ و ۲۴ ساعت آبیاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر رطوبت در داده‌های اندازه‌گیری بیش‌تر از داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد. این تفاوت در داده‌های ۸ ساعت بیش‌تر مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان در تغییر ساختمان خاک در نصب لوله‌های زیرسطحی یافت.

کادر قرمز رنگ موجود در شکل پیشروی افقی آب در اطراف قطره‌چکان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های شبیه‌سازی پیشروی افقی کم‌تری نسبت به داده‌های اندازه‌گیری داشته است. در داده‌های شبیه‌سازی رطوبت تقریباً برابر با صفر می‌باشد در صورتی که در داده‌های اندازه‌گیری تغییرات رطوبت تا ۰/۲ هم می‌رسد.

همان‌طور که قابل انتظار بود بیش‌ترین پیشروی رطوبت مربوط به آبیاری پس از ۲۴ ساعت بوده است و این حداکثر رطوبت شعاع حدود ۱۰ سانتی‌متری را دارا می‌باشد. بر اساس محاسبات انجام شده در شرایط موجود ظرفیت زراعی در حدود ۲۸ درصد می‌باشد که این مقدار رطوبت پس از ۲۴ ساعت شعاع حدود ۲۵ سانتی‌متری در پایین و ۱۵ سانتی‌متر در بالا را احاطه نموده است که این شعاع در آبیاری سطحی به‌میزان ۲۰ سانتی‌متر رسیده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت حداکثر رطوبت پس از ۲۴ ساعت آبیاری در داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به محل قطره‌چکان‌ها بوده و حداکثر رطوبت پس از ۲۴ ساعت در محدوده ۱۵ تا ۳۵ سانتی‌متری متمرکز می‌باشد. بر اساس نتایج حرکت آب به‌سمت بالا تا فاصله حدود ۱۵ سانتی‌متری اتفاق افتاده است و می‌توان بر اساس نتایج مقادیر تبخیر از سطح خاک را در این حالت نزدیک به صفر در نظر گرفت که از نظر مدیریت آب آبیاری بسیار با اهمیت می‌باشد.



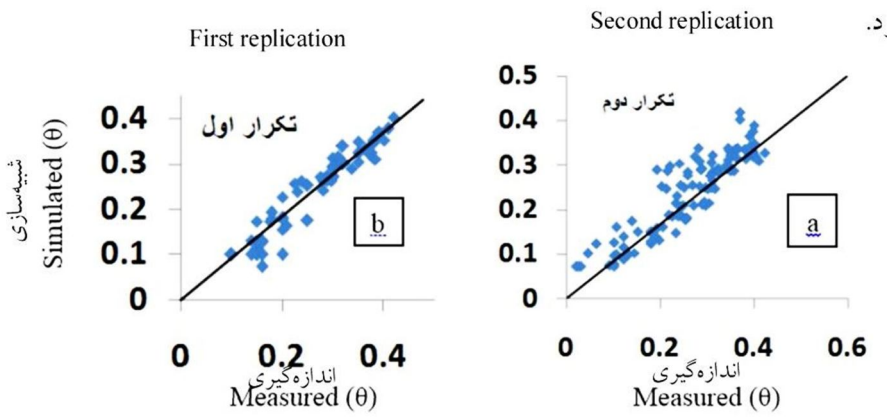
شکل ۵- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در زمان ۸ و ۲٤ ساعت. نقاط داده‌های اندازه‌گیری‌شده و خط ممتد داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

Figure 5. Variation of Measured and simulated water content in 8 and 24 hours after subsurface trickle irrigation, points is measured data and line is simulated data.

در شکل ۶ تغییرات داده‌های اندازه‌گیری‌شده نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی در زمان کاربرد ۲۴ ساعت مشاهده می‌شود. با وجود تفاوت‌هایی که بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی وجود دارد از نظر کاربردی و نرم‌افزاری تخمین خوبی مشاهده شد. مقدار R^2 مربوط به آبیاری قطره‌ای سطحی برابر ۰/۸۱۱ و در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی تقریباً برابر ۰/۹۰۶ می‌باشد. با توجه به توزیع رطوبتی و نوع بافت خاک لوم رسی مشاهده می‌شود که رطوبت در اطراف قطره‌چکان‌ها بیش‌تر بوده و با افزایش شعاع و عمق مقدار رطوبت کاهش می‌یابد. تغییرات رطوبت در همه اشکال نسبت به محل قرارگیری قطره‌چکان متقارن نمی‌باشد که می‌تواند به‌علت شیب غالب زمین و نوع بافت خاک باشد. براساس نتایج باید گفت که شرایط مرزی در خاک‌هایی با هدایت هیدرولیکی پایین و یا در شدت کاربرد آب بالا از حساسیت بیش‌تری برخوردار بوده و باید اصلاح شود.

پس از قرار دادن لوله‌ها در عمق ۰/۲ متر و اعمال آبیاری مشاهده می‌شود که با استفاده از نیروی کاپیلاری در بالای قطره‌چکان هم رطوبت نشت داشته است و حالت اشباع در اطراف قطره‌چکان ایجاد شده است. در این حالت مشخص نمودن شرایط مرزی می‌تواند در بالا رفتن دقت مدل بسیار حائز اهمیت باشد.

با توجه به نمودارها و مقادیر R^2 و RMSE تطابق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده مشاهده می‌شود. این دقت و تطابق در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیش‌تر مشاهده می‌شود. این امر می‌تواند به‌علت حذف برخی پارامترها مانند تبخیر باشد که باعث بالا رفتن دقت نتایج شده است.



شکل ٦- تغییرات داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت خاک، آبیاری قطره‌ای سطحی (a) و آبیاری قطره‌ای زیر سطحی (b).

Figure 6. Variation of Measured and simulated water content data, Surface trickle irrigation (a) and Subsurface trickle irrigation (b).

پس از شبیه‌سازی داده‌ها، مشاهده شد که مدل HYDRUS-2D پیش‌بینی خوبی در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی در سطح و عمق دارد. همچنین کوک و همکاران (۲۰۰۶) جهت بررسی الگوی رطوبتی خاک با استفاده از سه بافت خاک، دو نوع قطره‌چکان سطحی و زیرسطحی و راه‌حل عددی HYDRUS-2D و راه‌حل تحلیلی فیلیپ دریافتند که هر دو روش مذکور تخمین قابل‌قبولی را از جبهه رطوبتی عرضه می‌دارند، اما روش عددی HYDRUS-2D توانایی سریع‌تری جهت تعیین شکل جبهه رطوبتی داشت.

شبیه‌سازی چگونگی تخمین پارامترهای هیدرولیکی نقش به‌سزایی در دقت مدل دارد و به‌دست آوردن این پارامترها از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد. بر این اساس مدل شبکه عصبی ROSETTA این توانایی را دارد که با در اختیار داشتن مشخصات نوع خاک یا بافت خاک، پارامترهای هیدرولیکی خاک را تخمین بزند. با استفاده از سه تابع تخمین موجود در مدل، پارامترهای هیدرولیکی در مدل شبکه عصبی ROSETTA ارزیابی شد و بر اساس داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده مقایسه گردید (جدول‌های ۲ و ۳).

مقادیر RMSE در اعماق ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ در زمان کاربرد ۲۴ ساعت در جدول ۲ برای آبیاری قطره‌ای سطحی مشاهده می‌شود. با توجه به جدول مقدار RMSE بین ۰/۱۴ تا ۰/۰۱ متغیر می‌باشد. بیش‌ترین مقدار RMSE مربوط به عمق ۳۰ سانتی‌متر در ۲۴ ساعت آبیاری است که حداکثر خطا مربوط به مدل Carsel and Parrash می‌باشد. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود در عمق صفر کم‌ترین خطا یا کم‌ترین RMSE مربوط به مدل ROSETTA Lite به‌دست آمده است. اگر به مقدار خطا توجه شود مشاهده می‌شود که اختلاف میزان خطا در دو مدل Full ROSETTA و ROSETTA Lite ناچیز بوده و تنها در بعضی از عمق‌ها مقدار خطای مدل Full ROSETTA کم‌تر بوده است در حالت کلی بر اساس نتایج می‌توان گفت داده‌های اندازه‌گیری تطابق خوبی با نتایج Full ROSETTA دارد.

جدول ۲- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای شبیه‌سازی HYDRUS-2D براساس تخمین مدل‌های مختلف مشخصات هیدرولیکی خاک برای آبیاری قطره‌ای سطحی در زمان ۲٤ ساعت.

Table 2. Root-Mean-Square-Error (RMSE) for HYDRUS-2D Simulation based on several soil hydraulic properties models predictions for surface trickle irrigation 24 hours.

مدل (Model)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)					
	عمق خاک- سانتی‌متر (soil depth-cm)					
	0	10	20	30	40	50
Carsel and Parrash	0.0723	0.0831	0.1006	0.1453	0.0469	0.0678
ROSETTA Lite	0.0541	0.0825	0.0804	0.1182	0.0759	0.0255
Full ROSETTA	0.0643	0.0768	0.0943	0.1053	0.0556	0.0163

پارامترهای تخمین زده شده در ۳ مدل شبکه عصبی ROSETTA در جدول ۳ مشاهده می‌شود، که Full ROSETTA طبق انتظار بهترین داده‌های تخمین زده شده را به‌دست می‌دهد. نتایج برای هر سه مدل در جدول ارائه شده است.

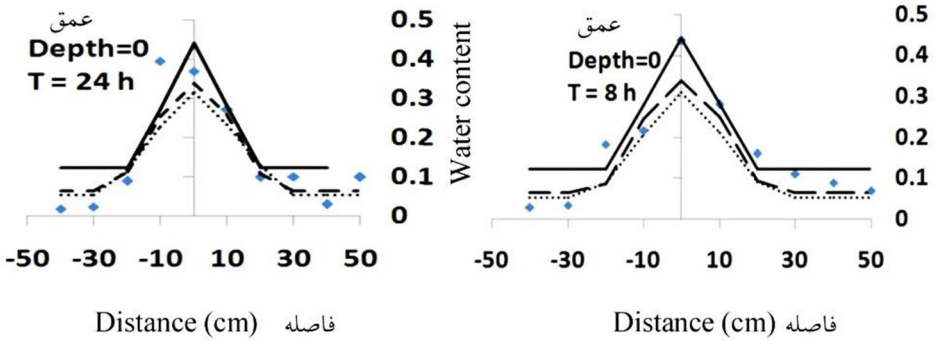
جدول ۳- توابع هیدرولیکی تخمین زده شده با مدل‌های مختلف Rosetta.

Table 3. Hydraulic function estimated by Rosetta several models.

مدل (Model)	i	K_S	n	α	θs	θr
Full ROSETTA	0.5	13.76	1.7938	0.0025	0.3477	0.0292

شکل ۷ داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در آبیاری قطره‌ای سطحی در زمان ۸ و ۲۴ ساعت در Z=0 سانتی‌متر برای تمام مدل‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر تخمین زده شده با استفاده از مدل‌های مختلف ROSETTA و استفاده آن‌ها در مدل HYDRUS مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به شکل، مدل Full ROSETTA در تمام زمان‌های کاربرد از دقت بالایی برخوردار بوده، به‌خصوص در زمان‌های کاربرد بالا شبیه‌سازی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

تعیین مشخصات هیدرولیکی خاک براساس اندازه‌گیری‌های میدانی بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است، براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مدل‌سازی براساس تمامی مشخصات هیدرولیکی در مدل ROSETTA تخمین خوبی جهت به‌دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی می‌دهد. این نتیجه توسط اسکاگز در سال ۲۰۰۴ و خان‌محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۲ نیز مشاهده شد.



شکل ۷- مقایسه داده‌های رطوبت خاک شبیه‌سازی‌شده آبیاری قطره‌ای سطحی با استفاده از HYDRUS-2D براساس تخمین‌های مختلف مشخصات هیدرولیکی ROSETTA. داده‌های اندازه‌گیری‌شده (نقاط)، مدل Carsel and Parrash (خط ممتد)، مدل ROSETTA Lite (خط‌چین) و مدل Full ROSETTA (نقطه‌چین).

Figure 7. Comparison of simulated water content in surface trickle irrigation by HYDRUS-2D based on predictions of Rosetta several hydraulic properties models. Measured data (pointes), Carsel and Parrash models (solid line), ROSETTA Lite model (dashed line), Full ROSETTA model (points line).

نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در این پژوهش می‌توان مشاهده کرد که با افزایش شعاع و عمق مقدار رطوبت کاهش یافته و توزیع رطوبت در پروفیل خاک به‌صورت کامل انجام گرفته است که این مطلب در پژوهش رحیم‌زادگان (۱۹۷۷) نیز آمده است. همچنین لوله‌های T-Tape توانایی خوبی در انتقال آب برای آبیاری زیرسطحی دارد و پروفیل رطوبتی مناسبی را ایجاد می‌کند. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که جبهه رطوبتی با دبی‌های کم در جهت عمق و با دبی بیش‌تر به‌صورت افقی حرکت می‌کند. در آغاز جریان، شدت پیشروی افقی نسبت به‌شدت پیشروی عمودی برای تمامی دبی‌های اعمال شده بیش‌تر است ولی به‌تدریج از شدت هر دو نسبت به زمان کاسته شده و به هنگام توقف آبدهی حرکت جبهه رطوبتی متوقف نشده و سرعت پیشروی عمودی بیش‌تر از سرعت پیشروی افقی است.

منابع

1.Alikhan, A., Yitayev, M., and Warrick, W. 1996. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. J. Irrig. Drain. Engin. 122: 4. 221-227.
2.Assouline, S. 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1630-1636.
3.Bhatnagar, P.R., and Srivastava, R.C. 2003. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. Irrig. Sci. 21: 151-157.
4.Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrig. Sci. 1: 3-17.
5.Camp, C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. Trans ASAE. 41: 5. 1353-1367.
6.Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. Irrig. Sci. 22: 143-156.
7.Cook, F.J., Thorburn, P.J., Bristow, K.L., and Cote, C.M. 2003. Infiltration from surface and buried point sources: the average wetting water content. Water Resources Research. 39: 12. 1364-1377.

8.Cook, F.J., Fitch, P., Thorburn, P.J., Charles worth, P.B., and Bristow, K.L. 2006. Modeling Trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. Environmental Modeling & Software. 21: 1353-1359.
9.El-nesr M., Alazba A., and Simunek J., 2014. HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. Irrig. Sci. 32: 2. 111-125.
10.Gardenas, A., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., and Simunek, J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under microirrigation. Agric. Water Manage. 74: 219-242.
11.Ghani A., Raine S., Mc Hugh A., and Hamilton G., 2015. Managing lateral infiltration on wide beds in clay and sandy clay loam using Hydrus 2D. Irrig. Sci. 33: 3. 177-190.
12.Kandelous, M.M., and Simunek, J. 2010. Comparison of numerical analytical and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Irrig. Sci. doi: 10.1007/ s00271-009-0205-9.
13.Khalili, M., Akbari, M., Hezarjaribi, A., Zakerinia, M., and Abbasi, F., 2014. Numerical Versus Empirical Models for Estimating Wetting Patterns in Subsurface Drip Irrigation Systems. J. Agric. Engin. Res. 15: 2. 1-14. (In Persian)
14.Khanmohamadi, N., Rezaee, H., Besharat, S., and Behmanesh, J. 2012. Evaluation of Soil Water Profile Simulations in Drip Irrigation Based on Soil Hydraulic Properties with Experimental Observations, Iran. J. Irrig. Drain. 3: 6. 187-195. (In Persian)
15.Mmolawa, K., and Or, D. 2003. Experimental and numerical evaluation of an analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 67: 1657-1671.
16.Rahimzadegan, R. 1977. Water movement in field soil from a point source. M.Sc. Thesis, Utah State Univ., Logan, Utah, USA.3.
17.Revol, P., Vauclin, M., Vachaud, G., and Clothier, B.E. 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation 1. The midpoint soil water pressure. Water Resources Research. 33: 1861-1867.
18.Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., and Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. Irrig. Drain. ASCE. 130: 4. 304-318.
19.Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Singh, D.K., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N., and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. Agric. Water Manage. 83: 130-134.
20.Singh, S.D., and Singh, P. 1978. Value of drip irrigation compared with conventional irrigation for vegetable production in a hot arid Climate. Agron. J. 70: 945-947.
21.Siyal, A.A., and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. Agric. Water Manage. 96: 893-904.
22.Simunek, J., Sejna, M., and Van Genuchten, M.Th. 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, Prague, Czech Republic.
23.Wang, F.X., Kang, Y., and Liu, S.P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. Agric. Water Manage. 79: 248-264.
24.Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. Irrig. Sci. 16: 101-106.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(2), 2016
http://jwsc.gau.ac.ir

Simulation of soil water profile in surface and subsurface drip irrigation systems by HYDRUS-2D

***S. Besharat[1] and S. Mollaee Tavani[2]**
[1]Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University,
[2]M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, Urmia University
Received: 04/06/2015; Accepted: 11/24/2015

Abstract
Background and Objectives: Drip irrigation system is one of the most effective strategies to increase productivity and optimal use of available water resources. In the subsurface irrigation distribution water in the soil and decreasing evaporation and water use. Realizing the full potential of drip irrigation technology requires optimizing the available parameters, such as the frequency, rate and duration of water application. Numerical simulation is a fast and inexpensive approach to studying optimal management practices. Unfortunately, little work has been done to investigate the accuracy of numerical simulations. In this context, numerical models, fast and cheap, to study the operation of irrigation systems and optimizing their management parameters are considered.
Materials and Methods: In the design of subsurface drip irrigation systems, the dimensions of the wetted onion determine the installation depth and set of system. Several models have been developed to simulation soil moisture patterns and the wetting front using hydraulic parameters, discharge and application time. The purpose of this study was to measure soil moisture profiles of surface and subsurface drip irrigation and compare with simulation results using HYDRUS-2D software. In this study, an experiment to study soil moisture profiles, surface and subsurface drip irrigation treatments was performed in the field of Urmia University. T-Tape pipes with discharge of 4 liters per hour at intervals of one meter was installed and the surface and subsurface measurements were performed. Tubes in subsurface drip irrigation was installed at 0.2 meter deep. Water content was measured by WET sensor in both irrigation systems. Water content measurement in two-dimensional depth and radius were recorded every 10 minutes. HYDRUS-2D software simulation in this study was compared with the measured results.
Results: The results of the simulation of soil moisture profiles using HYDRUS-2D software was in good agreement with the observed data (RMSE 0.01 till 0.14). Based on results, differences between the measured and simulated data (R^2) in surface and subsurface trickle irrigation for 24 hours operation were respectively 0.811 and 0.906. By using three estimation ROSETTA model, hydraulic parameters was evaluated.
Conclusions: Based on the obtained error values observed error rate in the two models, Full ROSETTA and ROSETTA Lite negligible and only in some depths Full ROSETTA model error is less than ROSETTA Lite model. In general can be said on the basis of data Full ROSETTA good agreement with the results of the measurement. The results support the use of HYDRUS-2D as a tool for investigation and designing drip irrigation management practices.

Keywords: Subsurface drip irrigation, Water content profile, Water flow in soil, Simulation

* Corresponding Author; Email: sina323@yahoo.com