

برآورد پیاز رطوبتی ناشی از آبیاری قطره‌ای سطحی با استفاده از مدل‌های عددی و تجربی

زهرا اسکندری تادوانی^۱، مهدی دلغندی^{۲*}، خلیل اژدری^۳، سید حسین حسینی^۴، وجیهه درستکار^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۰

چکیده

مزایای آبیاری قطره‌ای، استفاده از این سیستم را در سطح جهان افزایش داده است. این سیستم آبیاری به‌طور معنی‌داری سطح خیس شده خاک را کاهش می‌دهد که نتیجه آن کاهش تلفات تبخیر می‌باشد. الگوی خیس شدگی یکی از پارامترهای اصلی در بهینه کردن جانمایی لترال‌ها و فاصله قطره‌چکان‌ها و همچنین دبی خروجی آن‌ها می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر برای طراحی مناسب آبیاری قطره‌ای ابعاد خیس شدگی (عمق و عرض خیس شدگی) بایستی به‌دقت تعیین شود. بنابراین تحقیق حاضر جهت بررسی دقت مدل‌های عددی (Hydrus-2D) و تجربی (رگرسیون چند متغیره غیرخطی) در برآورد الگوی خیس شدگی ناشی از آبیاری قطره‌ای سطحی در یک خاک لوم رسی صورت پذیرفت. برای این منظور مقادیر رطوبت، عمق و عرض خیس شدگی خاک، برآورد شده و با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایشگاه مقایسه گردید. آزمایش‌ها شامل تعیین رطوبت، عمق و عرض خیس شدگی خاک بعد از ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ ساعت آبیاری با سه دبی متفاوت (۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت) بود. شاخص‌های آماری نشان دادند که تفاوت چندانی بین نتایج مدل‌ها و مقادیر مشاهداتی وجود ندارد به طوری که RMSE نرمال شده برای مدل عددی و تجربی به ترتیب از ۵/۸ تا ۸/۴ درصد و ۷ تا ۷/۷ درصد متغیر بود. همچنین مشخص گردید که مدل عددی پیشنهادشده، با دقت قابل قبولی الگوی خیس شدگی را برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوی خیس شدگی، آبیاری موضعی، خاک لومی رسی، مدل‌سازی

مقدمه

عرض و عمق خاک خیس شده برای طراحی و مدیریت دقیق سامانه‌های قطره‌ای ضروری است (Zur, 1996). محاسبه این اطلاعات توسط مدل‌های فیزیکی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. برای حل این مشکل، مدل‌های عددی و تجربی توسعه یافتند که برای مدل کردن جریان آب در خاک تحت قطره‌چکان‌های سطحی و زیرسطحی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. مدل‌های عددی می‌توانند موقعیت جبهه پیشروی رطوبت را شبیه‌سازی نمایند (Cook et al., 2003). نرم‌افزار Hydrus یکی از باارزش‌ترین مدل‌هایی است که در تحلیل و طراحی سامانه‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل در مطالعات فراوان آزمایشگاهی و مزرعه‌ای برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک و یا برآورد معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Simunek et al., 2006). علاوه بر مدل‌های عددی، مدل‌های تجربی نیز با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی و مشاهدات مزرعه‌ای جهت برآورد عرض و عمق پیاز خیس شدگی ناشی از آبیاری قطره‌ای توسعه یافته‌اند (Singh et al., 2006).

اسکاز و همکاران در پژوهش خود نشان دادند که شبیه‌سازی Hydrus-2D برای آبیاری قطره‌ای با نتایج صحرائی تطابق خوبی دارد (Skaggs et al., 2004). کندلوس و سیمونک در مطالعه خود نشان دادند که مدل سه‌بعدی Hydrus از قابلیت خوبی در

در سال‌های اخیر هم‌زمان با رشد جمعیت و افزایش تقاضای مصرف آب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری به‌منظور راندمان آبیاری و تولید محصولات کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده 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 (Skaggs et al., 2004). آبیاری قطره‌ای سطحی به دلیل سهولت در مرحله اجرا به‌عنوان پرکاربردترین روش آبیاری قطره‌ای شناخته می‌شود. برای این‌که بتوان در سیستم آبیاری قطره‌ای به راندمان مصرف آب مناسبی دست‌یافت، باید فاصله و دبی قطره‌چکان‌ها با خصوصیات هیدرولیکی خاک، زمان و مقدار آب لازم برای آبیاری گیاه هماهنگ باشد. در نتیجه داشتن اطلاعات مناسب از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار گروه آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار گروه آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- استادیار گروه آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۵- استادیار گروه آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: delghandi@gmail.com)

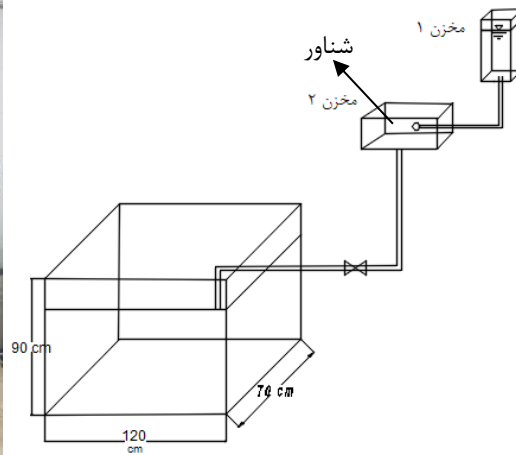
مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل Hydrus-2D توانایی زیادی در برآورد مشخصه زمانی توزیع مجدد رطوبت در خاک، ردیابی پیشروی رطوبت و پیش بینی زمان لازم برای رسیدن رطوبت حجمی خاک به ظرفیت زراعی مزرعه دارد. علاوه بر این حس گر دی الکتریک متحرک یک ابزار قدرتمند برای نظارت بر نفوذ آب تحت آبیاری قطره‌ای در حوزه‌های زمانی و مکانی می‌باشد (Shan et al., 2019).

قسمت شرقی استان سمنان یعنی محدوده شهرستان بسطام، از پتانسیل بالایی برای کشاورزی برخوردار می‌باشد و قسمت اعظم تولیدات کشاورزی منطقه شاهرود مربوط به این بخش می‌باشد که با توجه به کمبود منابع آب و همچنین سطح کشت بالای باغات و گلخانه در این منطقه، توسعه سیستم آبیاری قطره‌ای می‌تواند راهکار مناسبی برای غلبه بر کم‌آبی منطقه باشد؛ اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینه‌ی الگوی خیس شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای برای خاک‌های منطقه صورت نگرفته است؛ بنابراین این تحقیق باهدف تعیین الگوی خیس شدگی (پیزا رطوبتی) برای یک نوع خاک منطقه صورت پذیرفت. از اهداف دیگر این تحقیق، بررسی کارایی مدل عددی Hydrus و مدل تجربی در برآورد الگوی خیس شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی: برای انجام آزمایش‌ها یک مدل فیزیکی با ابعاد 70×120 و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر از جنس شیشه با چهارچوبی از نبشی‌های فلزی طراحی و ساخته شد (شکل ۱) و در بخش تحتانی مدل، خروجی‌هایی به‌عنوان زهکش تعبیه گردید. برای تأمین دبی قطره‌چکان به این صورت عمل گردید که مطابق شکل ۱ آب از مخزن مدرج شماره یک که دارای ابعاد 10×20 و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد وارد مخزن شماره دو می‌شود. با تعبیه یک شناور در مخزن شماره دو، ارتفاع آب در آن ثابت نگه داشته شد و شلنگ شفاف تأمین دبی که به مخزن شماره دو متصل می‌باشد به‌عنوان قطره‌چکان در نظر گرفته شد. بر روی این شلنگ یک شیر کوچک تعبیه گردید که با استفاده از این شیر میزان دبی خروجی از شلنگ تنظیم گردید. دبی خروجی، با استفاده از روش حجمی در سه تکرار اندازه‌گیری شد. در حین آزمایش نیز، میزان دبی خروجی، با اندازه‌گیری ارتفاع آب مخزن شماره یک کنترل گردید. برای این آزمایش، دبی‌های ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت که دبی معمول قطره‌چکان‌ها می‌باشد مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که قطره‌چکان در گوشه مخزن (با فاصله ۵ سانتیمتری از دیواره‌ها) قرار گرفت دبی‌های مورد استفاده به یک‌چهارم تقلیل پیدا کردند.

شبیه‌سازی‌های پیچیده و نیز همپوشانی پخش آب در آبیاری قطره‌ای برخوردار است (Kandelous and Simunek., 2010). بشارت و همکاران، مطالعاتی در خصوص تأثیر مشخصات هیدرولیکی خاک بر پروفیل رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای سطحی انجام دادند. ایشان نتیجه گرفتند که مشخصات هیدرولیکی خاک تأثیر قابل‌توجهی در شکل پروفیل رطوبتی خواهد داشت (Besharat et al., 2012). آلبرت و همکاران با استفاده از نرم‌افزار Drip-Irrigator یک رابط کاربری گرافیکی را برای شبیه‌سازی پیزا رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی توسعه دادند. این کد، معادله ریچاردز را با استفاده از روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب حل می‌کند. نتایج حاصل از مدل Drip-Irrigator با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل Hydrus و داده‌های مشاهداتی بر روی سه نوع خاک مختلف مقایسه گردید و نتایج نشان‌دهنده توانایی کد توسعه‌یافته در برآورد شعاع و عمق پیزا رطوبتی می‌باشد (Arbat et al., 2013). خلیلی و همکاران از آنالیز ابعادی جهت شبیه‌سازی تغییرات رطوبتی خاک در پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای استفاده کردند. ایشان از مدل توسعه‌یافته شوارتزمن و زور برای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند؛ که نتایج با مدل Hydrus-2D و روش آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی مناسبی بین مقادیر برآورد شده و مشاهداتی برقرار است (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۳). بشارت و ملایی توانی به بررسی پروفیل رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی پرداختند. در این پژوهش شبیه‌سازی مدل Hydrus-2D با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه گردید و نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای مدل عددی در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک بود (بشارت و ملایی‌توانی، ۱۳۹۵). اتووینو و همکاران عملکرد مدل Hydrus-2D را در شبیه‌سازی پیشروی رطوبت خاک و تعرق در یک باغ زیتون که تحت دو سیستم آبیاری متفاوت آبیاری شده بود را مورد بررسی قرار دادند و نتایج تحقیق نشان‌دهنده کارایی بالای مدل عددی می‌باشد (Autovino et al., 2018). فیض‌اله پور و همکاران عملکرد ۵ مدل هیدرولیکی مختلف ارائه‌شده در مدل Hydrus-2D را در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل دورنر (Durner, 1994) نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. ایشان همچنین مدل ترکیبی BMA را معرفی کردند که نسبت به ۵ مدل معرفی شده در مدل Hydrus نتایج مناسب‌تری را نشان می‌دهد (فیض‌اله پور و همکاران، ۱۳۹۷). شان و همکاران با هدف ارزیابی عملکرد مدل Hydrus-2D در رژیم‌های آبیاری واقعی به کمک روش‌های جدید، اندازه‌گیری‌های مستقیم حرکت رطوبت در خاک توسط حس گر دی الکتریک متحرک را با شبیه‌سازی حاصل از مدل Hydrus-2D



شکل ۱- مدل فیزیکی

زیر می‌باشد:

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

در این تحقیق برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، از رابطه ون گنوختن-معلم استفاده گردید:

$$k(h) = k_s S_e^m \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

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

که در این معادلات، θ مقدار رطوبت حجمی، h بار فشاری آب، t زمان، r مختصات افقی، z مختصات عمودی، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقی‌مانده، $k(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش ماتریک h ، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، S_e درجه اشباع مؤثر، I پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک (که در بیشتر پژوهش‌ها ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود)، m و n پارامترهای شکل می‌باشند (simunek et al., 2006).

مدل Hydrus-2D از روش اجزای محدود برای حل معادلات بالا استفاده می‌کند. مش بندی مرزها به صورت مثلثی در نظر گرفته شد. دبی خروجی از قطره‌چکان تبدیل به شار جریان گردید و شبیه‌سازی‌ها مطابق با نمونه آزمایشگاهی برای سه شدت جریان ثابت ۱/۶، ۳/۲ و ۶/۴ سانتی متر بر ساعت انجام شد. شرط مرزی مهم‌ترین قسمت در ورودی مدل می‌باشد که قطره‌چکان به صورت یک نیم‌دایره با شدت جریان ثابت فرض گردید.

آنالیز حساسیت: یکی از معایب اصلی مدل‌های شبیه‌سازی نیاز به داده‌های ورودی فراوان است (Walker, 2005). با توجه به هزینه و زمان بر بودن جمع‌آوری این داده‌ها، پی بردن به درجه اهمیت

مشخصات خاک: در این پژوهش از خاک مزرعه دانشکده

کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود واقع در منطقه بسطام استفاده گردید. بافت خاک از نوع لومی رسی و مخلوطی از ۲۹/۷ درصد شن، ۳۸ درصد سیلت و ۳۲/۳ درصد رس می‌باشد. چگالی ظاهری خاک ۱/۵۴ گرم بر سانتی متر مکعب تعیین گردید. مطالعات باهدف بررسی پیاز رطوبتی در یک خاک دست‌خورده با بافت لومی رسی انجام شد. به منظور جدا کردن سنگ و کلوخه و دست یافتن به خاک همگن و جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی، خاک از الک ۲ میلی متر عبور داده شد. برای نزدیک شدن به شرایط مزرعه، چگالی ظاهری خاک مزرعه باید مطابق نمونه آزمایشگاهی باشد. برای این منظور خاک به صورت لایه لایه و در هر مرحله تا رسیدن به چگالی موردنظر کوبیده شد. رطوبت وزنی خاک قبل از انجام آزمایش‌ها حدود ۷ درصد بود. برای جلوگیری از تغییر رطوبت، خاک داخل کیسه‌های پلاستیکی نگه‌داری شد.

انجام آزمایش‌ها: در این مرحله به مدت ۶ ساعت متوالی

آبیاری انجام شد و به فاصله‌های زمانی یک ساعت پروفیل جبهه رطوبتی به وسیله کاغذ شفاف کالک از دو طرف مخزن برداشت و میانگین‌گیری شد. پس از این مدت از یک سمت جداره در قالب یک شبکه مربعی میزان رطوبت در نقاط مختلف تعیین گردید. در نهایت برای اندازه‌گیری توزیع مجدد بعد از ۲۴ و ۴۸ ساعت، از سمت دیگر جداره، پروفیل رطوبتی برداشت شد. قابل ذکر است که برای آزمایش مربوط به دبی ۲ لیتر بر ساعت به دلیل کم بودن میزان تغییرات الگوی خیس‌شدگی در زمان توزیع مجدد، مدت زمان توزیع مجدد ۲۴ ساعت و برای دو دبی دیگر ۴۸ ساعت در نظر گرفته شد.

مدل عددی: شبیه‌سازی عددی حرکت آب در خاک با استفاده از

مدل Hydrus-2D انجام گرفت. معادله کلی حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتوپ خاک معادله ریچاردز است که به شرح

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (11)$$

که در آن ها P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌شده)، n تعداد نمونه‌های بکار رفته و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری نشان می‌دهد. NRMSE با نشان دادن مقدار خطا، دقت مدل را مورد بررسی قرار می‌دهد. CRM منفی نشانگر تمایل مدل به برآورد بیش از مقادیر مشاهداتی است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده باهم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های RMSE، CRM و NRMSE برابر صفر می‌شود (Alamoud and Mattar, 2017).

برای ترسیم نمودار یک‌به‌یک از رابطه $Y = \lambda X$ استفاده می‌شود؛ که X و Y به ترتیب مقادیر حاصل از آزمایشگاه و مدل و λ شیب بهترین خط برازش داده شده می‌باشد. $\lambda < 1$ نشان‌دهنده مقادیر کمتر Y نسبت به X و $\lambda > 1$ نشان‌دهنده مقادیر بیشتر Y نسبت به مقادیر X می‌باشد. خطای حاصل از برازش نمودار یک‌به‌یک را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود (Esfandiari and Maheshwari, 2001).

$$Er = |1 - \lambda| \cdot 100 \quad (12)$$

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاه: حداکثر شعاع (Rmax) و عمق خیس شدگی (Dmax) برای هر سه دبی از روی منحنی‌های پیشروی آب در زمان‌های مختلف برداشت شد و نتایج آن در شکل ۲ ارائه گردید. بر اساس این شکل مشخص می‌شود که در دبی $\frac{2 \text{ lit}}{\text{hr}}$ تا پایان آزمایش مقدار Rmax از مقدار Dmax بیشتر می‌باشد. ولی در دبی‌های بالاتر، شعاع و عمق خیس شدگی باهم برابر می‌گردند. به عبارت دیگر، به مرور زمان سرعت پیشروی آب به صورت عمقی از پیشروی آب به صورت عرضی بیشتر می‌گردد. دلیل این امر را نیز می‌توان به این صورت بیان کرد که با گذشت زمان و پیشروی جبهه رطوبتی، اختلاف پتانسیل ماتریک بین جبهه رطوبتی و خاک خشک مجاور آن کمتر می‌شود و لذا در ساعات پایانی آزمایش پتانسیل ثقلی نقش بیشتری در پیشروی جبهه رطوبتی دارد؛ اما در دبی $\frac{2 \text{ lit}}{\text{hr}}$ به علت کم بودن دبی، محدوده جبهه پیشروی آب کوچک‌تر بوده و این اتفاق رخ نداده است.

آن‌ها با توجه به هدف شبیه‌سازی امری ضروری است. تحلیل حساسیت، به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی می‌پردازد (Wang et al., 2005). در این پژوهش حساسیت پارامترهای ون‌گنوختن بر روی ابعاد پیاز رطوبتی تحت آبیاری قطره-ای سطحی در یک خاک لومی رسی مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه حساسیت پارامترهای ورودی از رابطه پیشنهادی لیو و همکاران استفاده شد (Liu et al., 2007).

$$S_x = \frac{\Delta O}{O} \cdot \frac{\Delta I}{I}^{-1} \quad (5)$$

که S_x ضریب حساسیت یک پارامتر ورودی مشخص بر روی یک خروجی معین، ΔO تغییرات پارامتر خروجی معین قبل و بعد از تغییر \bar{O} ، متوسط حسابی پارامتر خروجی، ΔI اختلاف پارامتر ورودی قبل و بعد از تغییر \bar{I} متوسط حسابی پارامتر ورودی است. در این رابطه S_x معادل صفر نشان‌دهنده عدم حساسیت، از صفر تا $0/3$ حساسیت کم، از $0/3$ تا $1/5$ حساسیت متوسط و بیشتر از $1/5$ حساسیت زیاد می‌باشد.

مدل تجربی: در این تحقیق برای تعیین مدل تجربی عرض و عمق خیس شدگی از مدل رگرسیون چند متغیره خطی استفاده گردید. پارامترهای زیادی بر ابعاد پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره‌ای مؤثر هستند. بخشی از این پارامترها مربوط به ویژگی‌های خاک و بخش دیگر مربوط به ویژگی‌های سیستم آبیاری قطره‌ای است. در این تحقیق برای تعیین مدل تجربی از مدل ال‌وجایدی و همکاران استفاده گردید (Al-Ojaidi et al., 2016).

$$R_o = at^{a_1} q^{a_2} \rho_b^{a_3} \theta_i^{a_4} K_s^{a_5} S^{a_6} S_i^{a_7} C^{a_8} \quad (6)$$

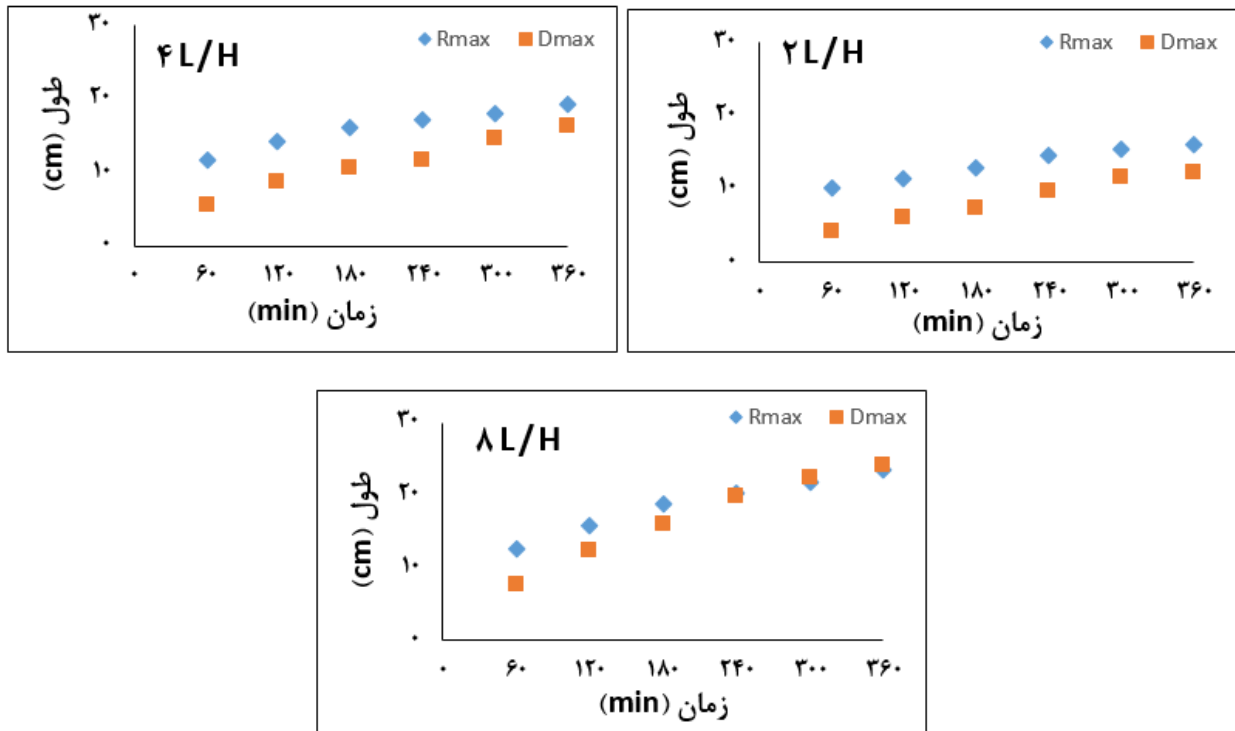
$$D = bt^{b_1} q^{b_2} \rho_b^{b_3} \theta_i^{b_4} K_s^{b_5} S^{b_6} S_i^{b_7} C^{b_8} \quad (7)$$

که R_o (cm) و D (cm) ابعاد پروفیل رطوبتی، t (min) زمان آبیاری، q (L/h) دبی قطره‌چکان، θ_i رطوبت اولیه، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، S درصد شن، S_i درصد سیلت و C درصد رس، a تا a_8 و b تا b_8 ضرایب تجربی می‌باشد. در تحقیق حاضر به دلیل وجود یک نوع بافت خاک، پارامترهای مربوط به ویژگی‌های خاک حذف شد.

شاخص‌های ارزیابی مدل عددی و تجربی: جهت مقایسه

نتایج مدل عددی و تجربی با نتایج آزمایشگاهی از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب باقیمانده (CRM)، نمودار یک‌به‌یک استفاده گردید. شکل ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر می‌باشد:

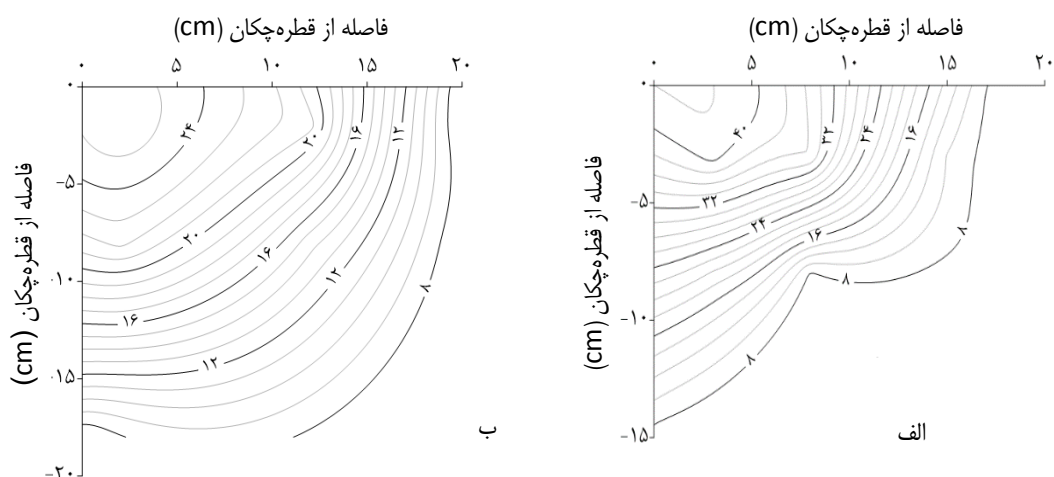
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$



شکل ۲- مقادیر مشاهداتی حداکثر شعاع و عمق خیس شدگی در مقابل زمان

فاصله گرفتن از این نقطه، میزان رطوبت کاهش می‌یابد. پس از قطع شدن جریان، میزان رطوبتی که در حدفاصل رطوبت ظرفیت زراعی ($\theta_{FC}=23/7\%$) و رطوبت اشباع قرار دارد، تحت نیروی ثقل از منطقه مرطوب خارج شده و آب آزاد تخلیه می‌گردد که منجر به افزایش مساحت پیاز رطوبتی می‌شود.

تعیین خطوط هم رطوبت: با توجه به داده‌های مشاهداتی رطوبت، منحنی‌های هم رطوبت برای دبی‌های مختلف در دو زمان پایان آزمایش و پایان توزیع مجدد ترسیم گردید و منحنی‌های هم رطوبت مربوط به دبی $2 \frac{lit}{hr}$ به عنوان نمونه در شکل ۳ ارائه شده است؛ که با توجه به شکل ۳، مشخص می‌شود که در پایان آبیاری میزان رطوبت در محل قطره‌چکان به رطوبت اشباع ($\theta_{sat}=46/5\%$) نزدیک شده با



شکل ۳- خطوط هم رطوبت الف. در پایان آزمایش، ب. در پایان توزیع مجدد تحت دبی $2 \frac{lit}{hr}$

نتایج مدل عددی: در این بخش، ابتدا با توجه به اهداف شبیه-سازی حساسیت پارامترهای ورودی در تخمین ابعاد پیزاز رطوبتی برآورد گردید. با بررسی میزان تغییرات این خروجی‌ها با توجه به تغییر در پارامترهای ورودی، حساس‌ترین پارامترهای ورودی مدل Hydrus-2D به ترتیب اهمیت و با توجه به هدف شبیه‌سازی به دست آمدند (جدول ۱). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود حساس‌ترین پارامتر خاک θ_s یا رطوبت اشباع خاک می‌باشد.

پارامترهای α و K_s در رده‌های بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. پارامتر l و θ_r در واقع یک پارامتر بی‌تأثیر در روند شبیه‌سازی می‌باشند. بنابراین ۴ پارامتر حساس در مدل‌سازی معکوس در نظر گرفته شد و برای پارامتر l و θ_r از مقادیر برآورد شده با مدل ROSSETA استفاده شد.

جدول ۱- حساسیت (S_x) پارامترهای ورودی مدل Hydrus-2D به شبیه‌سازی پیزاز رطوبتی

میزان حساسیت	درجه اهمیت	S_x		پارامتر ورودی
		$Rmax$	$Dmax$	
عدم حساسیت	۱	۰	۰	θ_r
حساسیت متوسط	۵	۰/۲۵	۰/۶۹	θ_s
حساسیت کم	۳	۰/۰۵	۰/۰۶	Alpha
حساسیت کم	۴	۰/۱۳	۰/۱۳	N
حساسیت کم	۲	۰/۰۵	۰/۰۶	Ks
عدم حساسیت	۱	۰	۰	l

نشان دهنده خطای پایین مدل در برآورد پارامترهای عمق و شعاع خیس شدگی و همچنین رطوبت می‌باشد. حداکثر خطای متوسط Er مربوط به عمق خیس شدگی به مقدار ۷ درصد و حداقل آن مربوط به رطوبت به مقدار ۰/۴ درصد می‌باشد. همچنین آماره CRM نیز نشان می‌دهد که مدل، مقادیر عمق خیس شدگی، شعاع خیس شدگی و رطوبت را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است. اما اختلاف چندانی بین اعداد مشاهده شده و اعداد شبیه‌سازی شده وجود ندارد. منحنی‌های پیشروی جبهه رطوبتی حاصل از مدل فیزیکی و مدل عددی در زمان‌های مختلف آبیاری برای هر سه دبی در شکل ۵ ترسیم شده است. در این نمودارها خطوط ممتد مربوط به داده‌های مشاهداتی و خطوط خط‌چین، مربوط به شبیه‌سازی مدل عددی می‌باشند.

در ادامه برای واسنجی مدل عددی رطوبت‌های مشاهداتی حاصل از آزمایش به مدل معرفی گردید و از طریق حل معکوس توسط مدل عددی، پارامترهای هیدرولیکی خاک محاسبه و میانگین‌گیری شد که در جدول ۲ ارائه شده است. سپس به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، آزمایش سوم با استفاده از ضرایب به دست آمده اجرا و نتیجه حاصل با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید و نتایج برای سه پارامتر شعاع خیس شدگی، عمق خیس شدگی و توزیع رطوبت در جدول ۳ ارائه شده است. نمودار مقایسه رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نیز به عنوان نمونه ارائه گردید.

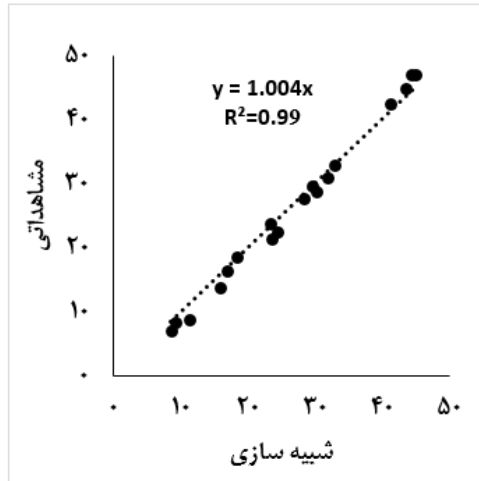
با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری مندرج در جدول ۳، مشخص می‌گردد که بر اساس ضریب تعیین، داده‌های مدل عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. به طوری که مقدار حداقل R^2 ، ۰/۹۲، به دست آمده است. علاوه بر این، مقادیر Er و NRMSE

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی مدل Hydrus-2D در مرحله واسنجی

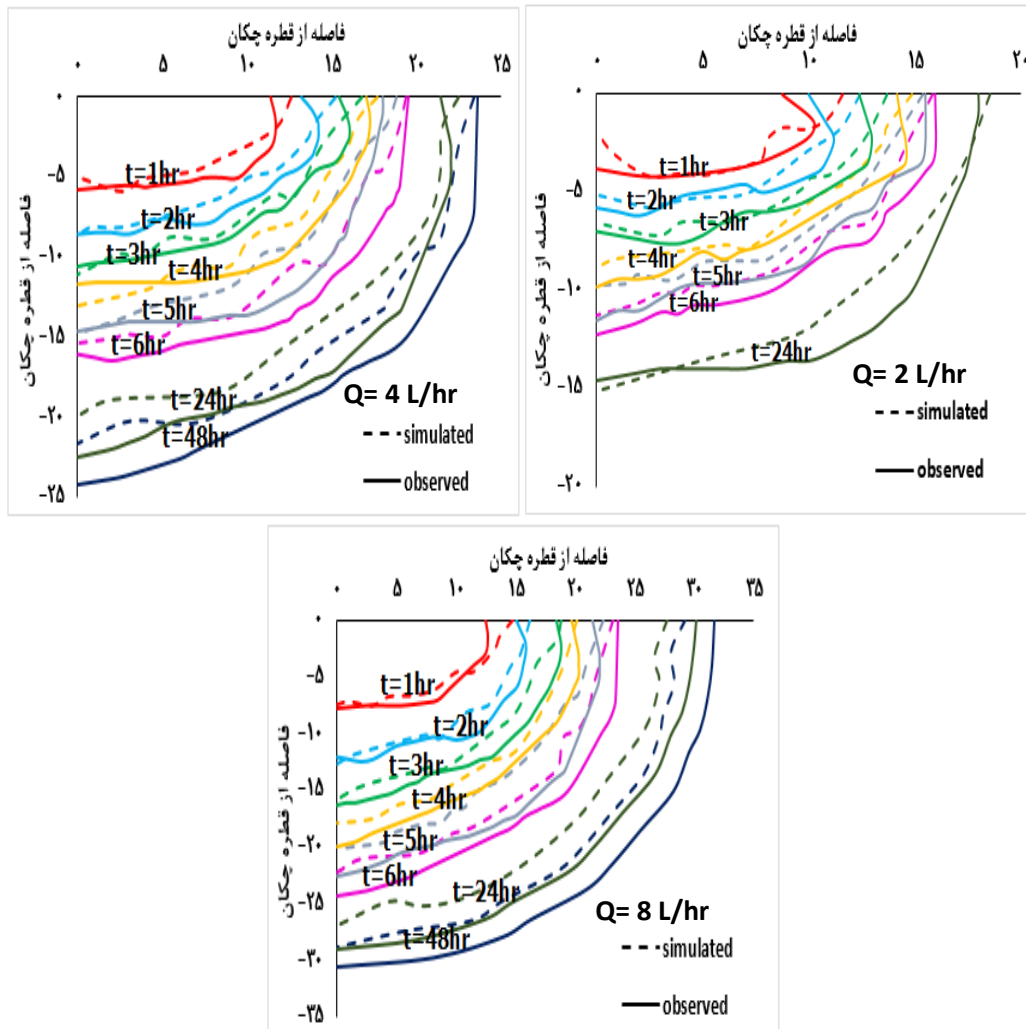
l	Ks[cm/hr]	N	Alpha [1/cm]	θ_s	θ_r
۰/۵	۰/۲۷۲	۱/۵	۰/۰۱۵۵	۰/۴۷۱	۰/۰۵۵

جدول ۳- شاخص‌های آماری در مرحله اعتبارسنجی

پارامتر	R^2	Er %	NRMSE %	CRM (نسبت)
عمق خیس شدگی	۰/۹۹	۷	۸/۲	۰/۰۶۷
شعاع خیس شدگی	۰/۹۲	۳	۶/۷	۰/۰۱۵
رطوبت	۰/۹۸۶	۰/۴	۵/۷	۰/۰۱۳۵



شکل ۴- مقایسه رطوبت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (درصد حجمی)



شکل ۵- جبهه رطوبتی حاصل از آزمایشگاه و مدل Hydrus نسبت به قطره‌چکان (cm)

جبهه رطوبتی را شبیه‌سازی می‌نماید. هرچند که در زمان‌های پایانی

که با توجه به شکل ۵ مشخص می‌گردد که مدل عددی به خوبی

$$R = 0.48 \times (Q^{0.23}) \times (\theta^{0.07}) \times (t^{0.26}) \quad (13)$$

$$D = 0.78 \times (Q^{0.5}) \times (\theta^{0.07}) \times (t^{0.58}) \quad (14)$$

که R عرض خیس شدگی (m)، D عمق خیس شدگی (m)، Q دبی جریان ($\frac{m^3}{min}$)، θ رطوبت اولیه، t زمان آزمایش (min) می باشد. لازم به ذکر است از آنجایی که رطوبت اولیه در همه آزمایش ها ۷ درصد بود برای افزایش دقت مدل تجربی و لحاظ نمودن رطوبت اولیه در معادلات تجربی، ابتدا مدل Hydrus با دو رطوبت اولیه ۱۰ و ۱۵ درصد اجرا گردید و از نتایج مربوط به حداکثر عمق و شعاع خیس شدگی در معادلات تجربی استفاده شد.

برای ارزیابی نتایج مدل تجربی از داده های مشاهداتی در آزمایشگاه و همچنین داده های مربوط به تحقیق خان محمدی و بشارت، (۱۳۹۲) که برای یک خاک لوم رسی در مزرعه دانشگاه ارومیه انجام شده است، استفاده گردید. نتایج مربوط به ارزیابی مدل تجربی برای هر دو سری از داده ها در جدول ۴ ارائه شده است.

آزمایش و توزیع مجدد منحنی های شبیه سازی و مشاهداتی در برخی نقاط بر هم منطبق نشده اند ولی خطای نسبی شبیه سازی با توجه به گسترده شدن جبهه پیشروی تفاوت چندانی با زمان های ابتدایی آزمایش ندارد. برای مثال خطای نسبی سطح خیس شده برای یک ساعت پس از آبیاری ۱۴ درصد و بعد از توزیع مجدد ۱۶/۵ درصد می باشد. نکته دیگر اینکه مدل عددی در زمان های ابتدایی آبیاری عرض خیس شدگی را در نزدیکی سطح خاک به درستی شبیه سازی نمی کند. به طوری که در عمل در زمان های ابتدایی حداکثر عرض خیس شدگی در چند سانتی متری زیر خاک رخ می دهد ولی مدل عددی حداکثر عرض خیس شدگی را در سطح خاک نمایش می دهد که این ایراد در زمان های انتهایی آزمایش و همچنین توزیع رطوبت تا حدودی مرتفع می گردد.

نتایج مدل تجربی: پس از تعیین ضرایب رگرسیون چند متغیره توسط نرم افزار SPSS، معادله تجربی برای حداکثر عمق و عرض خیس شدگی به صورت زیر تعیین می گردد.

جدول ۴- شاخص های آماری برای ارزیابی مدل تجربی

آزمایش	پارامتر	R ²	Er %	NRMSE %	CRM (نسبت)
آزمایشگاه	عمق خیس شدگی	۰/۹۸۴	۵	۷/۷	۰/۰۴۲
	شعاع خیس شدگی	۰/۹۶۶	۶	۷	-۰/۰۶۴
خان محمدی و بشارت (۱۳۹۲)	عمق خیس شدگی	۰/۹۵	۱۳	۱۴/۸	۰/۰۹
	شعاع خیس شدگی	۰/۹۱۵	۵	۹/۸	۰/۰۳۶

ریچاردز در ترکیب با مدل ون گنوختن-معلم استفاده گردید. آنالیز حساسیت صورت گرفته نشان داد که از پارامترهای دخیل در مدل ون گنوختن-معلم، θ_s یا رطوبت اشباع خاک، حساس ترین پارامتر خاک می باشد و پارامترهای α ، K_s و n در رده های بعدی اهمیت قرار می گیرند. پارامتر l و θ_r نیز پارامترهای بی تأثیر در روند شبیه سازی تعیین شدند. بنابراین ۴ پارامتر حساس، با استفاده از روش مدل سازی معکوس برآورد شدند و مدل Hydrus-2D با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد داده های مدل عددی تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارند. به طوری که حداقل مقدار R^2 ، ۰/۹۲ به دست آمد. حداکثر خطای متوسط (Er) مربوط به عمق خیس شدگی به مقدار ۷ درصد و حداقل آن مربوط به رطوبت خاک به مقدار ۰/۴ درصد می باشد. برای ارزیابی نتایج مدل تجربی از داده های مشاهداتی در آزمایشگاه و همچنین داده های مربوط به تحقیق خان محمدی و بشارت، (۱۳۹۲) استفاده گردید. مقادیر شاخص های آماری، دلالت بر کارایی بالای مدل تجربی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی داشتند. بنابراین با اطمینان می توان از معادله تجربی ارائه شده جهت برآورد عرض و عمق خیس شدگی برای یک خاک لومی رسی (جهت طراحی سیستم آبیاری قطره ای)

با توجه به جدول ۴ مشخص است که مدل تجربی ارائه شده کارایی مناسبی در تخمین حداکثر عرض و عمق خیس شدگی دارد. به طوری که حداکثر مقدار خطای نسبی برای داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر حدود ۶ درصد و برای تحقیق خان محمدی و بشارت، (۱۳۹۲) حدود ۱۳ درصد می باشد؛ بنابراین با اطمینان می توان از این معادله تجربی جهت برآورد عرض و عمق خیس شدگی برای یک خاک لومی رسی حتی در شرایط مزرعه استفاده نمود. مدل تجربی نسبت به مدل عددی دارای این مزیت می باشد که در طراحی سیستم آبیاری قطره ای می توان به سادگی از نتایج آن استفاده نمود.

نتیجه گیری

در این تحقیق، دقت مدل عددی Hydrus-2D و مدل تجربی (مدل رگرسیونی چند متغیره غیرخطی) در برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت سیستم آبیاری قطره ای سطحی مورد بررسی قرار گرفت برای این منظور، در آزمایشگاه، ابعاد جبهه رطوبتی و مقدار رطوبت در نقاط مختلف در یک خاک لوم رسی با ۳ دبی متفاوت $2 \frac{lit}{hr}$ ، $4 \frac{lit}{hr}$ و $8 \frac{lit}{hr}$ تعیین گردید. جهت شبیه سازی حرکت آب در خاک از رابطه

Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water resources research*, 30.2: 211-223.

Esfandiari, M. and Maheshwari, B. L. 2001. SW—soil and water: field evaluation of furrow irrigation models. *Journal of agricultural engineering research*, 79.4: 459-479.

Kandelous, M. M. and Šimůnek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28. 5: 435-444.

Liu, H. F., Génard, 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.

Mattar, M. A. and Alamoud, A. I. 2017. Gene expression programming approach for modeling the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and electronics in agriculture*, 142: 450-460.

Shan, G., Sun, Y., Zhou, H., Lammers, P. S., Grantz, D. A., Xue, X. and Wang, Z. 2019. A horizontal mobile dielectric sensor to assess dynamic soil water content and flows: Direct measurements under drip irrigation compared with HYDRUS-2D model simulation. *Biosystems Engineering*, 179: 13-21.

Simunek, J., Van Genuchten, M. T. and Sejna, M. 2006. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, 1.

Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N. and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural water management*, 83. 1 (2): 130-134.

Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J. and Shouse, P. J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130. 4: 304-310.

Walker, W. R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131. 2: 129-136.

Wang, X., Youssef, M. A., Skaggs, R. W., Atwood, J. D. and Frankenberger, J. R. 2005. Sensitivity analyses of the nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II. *Transactions of the ASAE*, 48. 6: 2205-2212.

Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, 16.3: 101-105.

حتی در شرایط مزرعه استفاده نمود.

منابع

بشارت، س. و ملایی‌توانی، س. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در یک سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۲۳. ۲: ۲۲۵-۲۳۸.

خان محمدی، ن. و بشارت، س. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جبهه رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با استفاده از HYDRUS-2D. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۴. ۲: ۱۵-۲۷.

خلیلی، م.، اکبری، م.، هزارجریبی، ا.، ذاکری‌نیا، م. و عباسی، ف. ۱۳۹۳. برآورد ابعاد پیاز رطوبتی با مدل تجربی و مدل عددی HYDRUS-2D در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. نشریه تحقیقات مهندسی کشاورزی ۱۵. ۲: ۱-۱۴.

فیض‌اله‌پور، ف.، بشارت، س. و خورسند، ا. ۱۳۹۷. مقایسه عملکرد مدل‌های هیدرولیکی مختلف و ارائه مدل ترکیبی BMA به‌منظور شبیه‌سازی حرکت آب در خاک. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹. ۱: ۱۳-۲۴.

Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Rowshon, M. K. and Abdullah, A. F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176: 203-213.

Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Barragán, J. and De Cartagena, F. R. 2013. Drip-Irrigation: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. *Computers and electronics in agriculture*, 98: 183-192.

Autovino, D., Rallo, G. and Provenzano, G. 2018. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D: Model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 203, 225-235.

Besharat, S., Khanmohammadi, N., Rezaie, H. and Behmanesh, J. 2012. Evaluation of soil water profile simulations in drip irrigation based on soil hydraulic properties with experimental observations. In *Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life*, Valencia, Spain, 8-12 July.

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: 1-6.

Prediction of Wetting Patterns under Surface Drip Irrigation using Numerical and Empirical Models

Z. Eskandari Tadavani¹, M. Delghandi^{2*}, K. Azhdari³, S.H. Hosseini⁴, V. Dorostkar⁵

Received: May.14, 2019

Accepted: Jul.01, 2019

Abstract

Drip irrigation benefits enhanced the worldwide use of this irrigation system. Drip irrigation reduces significantly the wetted soil surface that lead to reduction of evaporative losses. Claimed that wetting pattern is a major parameter in optimizing lateral placement and emitter spacing as well as in selecting emitter's discharge. In other word, to achieve proper drip irrigation design, dimensions of the wetted zone (depth and width) should be accurately determined. Therefore, present study was conducted under clay loam soil to investigate the accuracy of numerical (HYDRUS-2D) and empirical (multivariate nonlinear regression) models in estimating wetting pattern for surface drip irrigation. The predicted values of soil moisture, wetted depth and width were compared with those obtained from laboratory experiments. Experimentations included determination of soil moisture, depths and widths of wetted zone after 1, 2, 3, 4, 5, and 6 hour of water application with three different discharge rates (2, 4 and 8 L/h). Statistical parameters revealed that there was no significant difference between models results and observed values. So that the normalized root mean square error (NRMSE) varied from 5.8 to 8.2% and 7 to 7.7% for numerical and empirical models, respectively. The results also showed that the proposed empirical model predicts the wetting pattern with acceptable accuracy.

Keyword: Wetting pattern, Local irrigation, Mlay loam soil, Modeling

1- M.Sc. Student, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

4- Assistant Professor, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

5- Assistant Professor, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(*- Corresponding Author Email: Delghandi@gmail.com)