

## شبیه‌سازی عددی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی

محسن قره‌شخیبیات<sup>1</sup>، محمدرضا خالدیان<sup>2\*</sup>، محمدحسن بیگلویی<sup>3</sup> و پریسا شاهین‌رخسار<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1393/9/2 تاریخ پذیرش: 1394/2/23

### چکیده

برای طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای باید از نحوه توزیع و تغییرات رطوبت در خاک و ابعاد آن اطلاع داشت که تعیین صحرائی آن بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D در تخمین رطوبت خاک بعد از آبیاری زیرسطحی تحت منبع خطی در یک خاک با بافت سنگین بود. آبیاری در سه عمق نصب نوار 10، 20 و 30 سانتی‌متر با سطوح 10، 15 و 20 لیتر در خاک رس‌سیلتی با سه تکرار در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان انجام شد. داده‌های شبیه‌سازی شده و مزرعه‌ای براساس شاخص‌های آماری RMSE، nRMSE و CRM مقایسه شدند. نتایج نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار RMSE 0/013 و  $0/045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  بود. همه تیمارها به‌جز تکرار دوم سطح 10 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر، کم‌تر از 10 درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده کارایی عالی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت خاک بود. بیش‌ترین مقدار CRM، 0/100 و کم‌ترین آن 0/065- به‌دست آمد. با توجه به مطلوب بودن نتایج ارزیابی، می‌توان از این مدل برای مدیریت بهینه آبیاری و طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی در خاک‌های با بافت سنگین استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک سنگین، رشت، رطوبت خاک، شبیه‌سازی، مدل HYDRUS-2D

### مقدمه

افزایش محصول را نسبت به سایر روش‌های آبیاری از جمله آبیاری قطره‌ای سطحی به همراه داشته است (Camp, 1998). بسیاری از مطالعات، عملکرد بهتر نوار آبدار را نسبت به قطره‌چکان‌ها تأیید کرده‌اند (Robert et al, 2008). طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای نواری باید به‌صورتی انجام گیرد که آب در محیط توسعه ریشه به‌طور یکنواخت توزیع گردد. برای دستیابی به این امر می‌بایست از نحوه توزیع آب در خاک مورد نظر به‌خوبی اطلاع داشت (علیزاده، 1388). در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با لوله‌های متخلخل رسی نشان داده شد که با افزایش فشار سامانه اندازه پياز رطوبتی بزرگ‌تر شده و عمق نصب قطره‌چکان (یا نوار) و فاصله لترال‌ها با مقدار تبخیر آب رابطه دارد (Siyal and Skagg, 2009). آخوندعلی و یاورپور (1385) پیشروی افقی و عمودی رطوبتی لوله‌های لاستیکی متخلخل (تراوا) در خاک متوسط سیلتی لومی برای لوله‌هایی به قطر داخلی 13 و به طول 45 سانتی‌متر که به‌صورت عمودی در خاک‌های کشاورزی دزفول کار گذاشته شده بود را تحت فشارهای 4، 6، 8، 10 و 12 متر آب با مدت آبیاری 10 ساعت بررسی و مشاهده کردند برای پیشروی افقی رطوبت بین فشار معادل 4 متر آب و فشارهای 8، 10 و 12 تفاوت در سطح اطمینان 95 درصد معنی‌دار بود اما بین فشارهای 6، 8، 10 و 12 متر آب تفاوت معنی‌داری دیده نشد و برای پیشروی عمودی بین فشارهای 6 با 8 و 10 با 12 متر آب در همان سطح اطمینان تفاوت معنی‌داری دیده شد. رحیم‌زادگان در مورد حرکت آب

از دیرباز تاکنون بشر در کارهای کشاورزی به‌دنبال افزایش بازدهی نهاده و کاهش هزینه تولید بوده است. بدین منظور به‌طور مستمر به‌دنبال ابداع و یا اختراع روش‌های جدید در قسمت‌های مختلف کشاورزی بوده است و تاکنون به موفقیت‌های بسیاری دست یافته است. با توجه به اهمیت جدی آب و آبیاری در کشاورزی، در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای آبیاری محصولات مختلف با بازدهی بالا ارائه شده است. آبیاری قطره‌ای روشی از آبیاری با بازدهی بیش از 90 درصد می‌باشد که بیش‌تر برای گیاهان ردیفی و درختان کاربرد داشته و به انواع سطحی و زیرسطحی تقسیم‌بندی می‌شود. کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیش‌تر در مناطق کوچک بوده و دارای قطره‌چکان‌هایی است که دبی مشخصی داشته و در زیر زمین (در مجاورت ریشه گیاه) قرار می‌گیرند (ESOA, 1999). کاربرد سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر روی بیش از 30 نوع گیاه،

1- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان  
2و3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوزه آبی دریا و خزر، رشت  
4- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان  
(\* - نویسنده مسئول: Email: khaledian@guilan.ac.ir)

با داده‌های مشاهده‌ای داشته است. در این پژوهش شبیه‌سازی رطوبتی در جوانب جبهه رطوبتی دقت بالاتری از خود نشان داد و در جهت عمودی بسیار کم‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی شد (Amin and Ekhtaj, 2006). با توجه به اینکه در استان گیلان آبیاری قطره‌ای برای باغات در حال توسعه می‌باشد و بررسی و تحقیق خاصی در زمینه آبیاری قطره‌ای مخصوصاً نواری زیرسطحی صورت نگرفته است، معرفی یک مدل مناسب برای تخمین رطوبت خاک در خاکی با بافت سنگین برای کاهش هزینه‌های اولیه ضروری می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D در تخمین رطوبت خاک بعد از آبیاری زیرسطحی تحت منبع خطی (نواری زیرزمینی) در خاکی با بافت سنگین صورت گرفت.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان واقع در شهرستان رشت (کیلومتر 8 آزادراه قزوین - رشت) به ترتیب با طول و عرض جغرافیایی  $35^{\circ} 39' 49''$  شرقی و  $7^{\circ} 11' 37''$  شمالی در ارتفاع 24/6 متر از سطح دریا و در تابستان سال 1391 انجام شد. بر اساس گزارش علیزاده (1387) اقلیم گیلان شبیه اقلیم مدیترانه‌ای و معتدل و مرطوب است. متوسط رطوبت نسبی بالای هوا از مهم‌ترین ویژگی‌های آن می‌باشد. میانگین بارندگی در پنجاه سال اخیر 1360 میلی‌متر بود. بیش‌ترین درصد بارش در فصل پاییز بوده و معمولاً بیش‌ترین بارندگی در مهر ماه (اکتبر) با مقداری حدود 215 میلی‌متر اتفاق می‌افتد. در تابستان بیش‌ترین درجه حرارت به طور متوسط حدود 30 درجه سلسیوس و کم‌ترین آن به طور متوسط 20 درجه سلسیوس می‌باشد. برای اندازه‌گیری بافت و دانه‌بندی خاک از اعماق صفر تا 20، 20 تا 40 و 40 تا 70 سانتی‌متر با سه تکرار نمونه‌برداری و در کل 9 نمونه برداشت شد. با انجام آزمایش هیدرومتری، بافت خاک در هر سه عمق رس‌سیلتی تعیین شد. در جدول 1 نتایج آزمایش هیدرومتری در سه لایه خاک درج شده است. قبل از اجرای تحقیق، سنگ‌ها، بقایای گیاهی و ... از سطح خاک پاکسازی شد. برای از بین بردن سله‌های حاصل از بارندگی‌های بهاره با کولتیواتور کوچک (مخصوص باغبانی) خاک تا عمق 10 سانتی‌متری شخم خورد و سله‌های لایه سطحی از بین رفت. سپس برای ایجاد یکنواختی و خرد شدن کلوخه‌های بزرگ از دیسک و غلطک استفاده شد. در انتها برای برطرف کردن شیب زمین و رسیدن به شیب صفر درجه از ماله استفاده شد. عرض و طول زمین به ترتیب حدود 7 و 15 متر بود. در چهار طرف زمین با یک نهرکن بزرگ، زهکش سطحی مثلثی شکل احداث شد تا در بارندگی‌های احتمالی سریعاً آب روی زمین به خارج از محدوده انجام طرح انتقال یابد. لوله لاترال (نواری آبیاری) و مانیفولد به کار گرفته شده در این طرح

در خاک تحت یک منبع نقطه‌ای نشان داد که در ابتدای آبیاری، نیروی موئینگی و با افزایش عمق خیس‌شدگی تأثیر نیروی ثقل در شکل‌گیری الگوی خیس‌شدگی بیش‌تر است (Rahimzadgan, 1977). در نواری آبیاری با فاصله کم قطره‌چکان‌ها، نوار به‌عنوان یک منبع خطی عمل کرده و در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری که عملاً فاصله قطره‌چکان‌ها کم است پیاز رطوبتی ناحیه‌ای که آبیاری می‌شود به صورت ممتد و پیوسته ایجاد شده و در عمل می‌توان پیاز رطوبتی را در دو بعد بررسی کرد (حیدرئزاد و همکاران، 1385؛ Siyal Skagg, 2009).

در واقع ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت حاصل از این حجم رطوبتی، دو عامل مهم در تعیین فواصل بین قطره‌چکان‌ها و نوارها، برای دستیابی به یک توزیع بهینه آب و کود در منطقه توسعه ریشه است (Kandelous and Simunek, 2010a). طراحی سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای زیرزمینی با منبع خطی (نواری زیرزمینی) باید دقیق بوده و تغییرات توزیع رطوبت در نیم‌رخ خاک در شرایط مزرعه را با توجه به بافت و ساختمان خاک دانست. دستیابی به این اطلاعات نیاز به هزینه‌های زیادی دارد. امروزه مدل‌های مختلف رایانه‌ای توسعه داده شده است که با دقت‌های متفاوتی اقدام به شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و یا همان پیاز رطوبتی در خاک می‌کند که در عمل برای کاهش هزینه بسیار مفید است (Kandelous and Simunek, 2010b).

معمولاً بیش‌تر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی روابط آب و خاک با مدل‌های متنوع در زمینه آزمایشگاهی بوده است. طبیعتاً مدلی می‌تواند بیش‌ترین درجه صحت را به خود اختصاص دهد که بتواند در عمل داده‌های به‌دست آمده در شرایط مزرعه‌ای (صحرائی) را به خوبی شبیه‌سازی کند. در تحقیقی نحوه توزیع رطوبت به صورت افقی و عمودی در ناحیه ریشه گیاه ترب و مشخص کردن میزان آبشویی عمقی از طریق مدل‌سازی با مدل عددی HYDRUS-2D بررسی شد و این مدل دارای توانایی شبیه‌سازی بالایی ارزیابی شد (آزدری، 1387). ملایی‌کندلوس و همکاران (1385) در تحقیقی روی مدل HUDRUS-2D اعلام کردند مدل برآورد قابل قبولی از توزیع رطوبت در جبهه رطوبتی ارائه می‌دهد و توصیه کردند که با داشتن این مدل می‌توان جنبه‌های مختلف مدیریتی را برای شرایط مختلف مزرعه در نظر گرفت و اعمال کرد. مطالعه دیگری در دشت طرابلس لیبی روی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی با منبع نقطه‌ای در یک خاک شنی و شبیه‌سازی آن با مدل دو بعدی HYDRUS-2D با دبی‌های 1/5 تا 6 لیتر بر ساعت انجام و شعاع خیس‌شده سطح خاک و فاصله عمودی جبهه خیس‌شدگی و توزیع رطوبت نیم‌رخ خاک اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه حاکی از این بود که مقادیر شبیه‌سازی شده هم‌خوانی خوبی

از جنس پلی اتیلن بود.

جدول 1- درصد ذرات و بافت خاک در اعماق 0 تا 70 سانتی متر و وزن مخصوص ظاهری

عمق خاک (cm)	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )
0 - 20	3	48	49	رس سیلتی	1/58
20 - 40	3	44	53	رس سیلتی	1/59
40 - 70	7	42	51	رس سیلتی	1/60

واسنجی داشت، بنابراین در ابتدا مقداری خاک مزرعه (در گلدان) به صورت اشباع درآمد و بعد از اشباع کامل در روزهای متوالی ابتدا رطوبت خاک گلدان با قرار دادن آن روی یک ترازو به روش وزنی و بلافاصله با TDR اندازه گیری شد. به این ترتیب دو سری داده به دست آمد. با کمک نرم افزار اکسل رابطه رگرسیونی بین داده های حاصل از روش وزنی و TDR تعیین شد. رابطه به دست آمده به شکل رابطه 1 بود که برای تبدیل داده های اندازه گیری شده توسط TDR به داده های واقعی مورد استفاده قرار گرفت.

$$y = 0.00180x^2 - 0.21153x + 8.17513 \quad (1) \quad 66.54819$$

در رابطه 1، x و y به ترتیب مقدار رطوبت اندازه گیری شده توسط TDR و رطوبت واقعی می باشد.

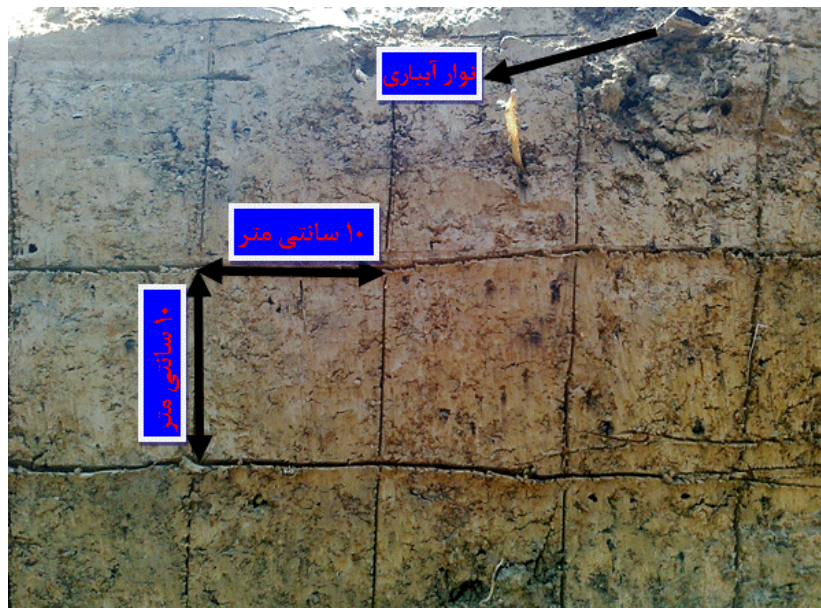
#### مشخصات مدل

مدل عددی HYDRUS-2D ارائه شده توسط (Simunek et al, 1999) بسته ی نرم افزاری است که با بهره گیری از حل عددی معادله دو بعدی ریچاردز (Richards, 1931) (رابطه 2) به عنوان مبنای محاسبات در مدل مذکور به شبیه سازی روابط حاکم بر آب و خاک می پردازد. حل معکوس برای برآورد برخی از پارامترهای هیدرولیکی خاک، شبیه سازی انتقال املاح و گرما در محیط های اشباع و غیر اشباع در حالت های مختلف از توانایی های دیگر مدل می باشد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(h, x, z) \quad (2)$$

در رابطه 2،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک با بعد  $(L^3.L^{-3})$ ، زمان (T)، پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)،  $x$  و  $z$  به ترتیب محور افقی و عمودی (به سمت راست و بالا جهت مثبت نمودار)،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی خاک مورد نظر  $(L.T^{-1})$  و تابع  $S(h, x, z)$  تابعی است که جذب آب توسط ریشه گیاهان را در مدل HYDRUS-2D بر اساس روش های S-Shape برآورد می کند (Feddes et al, 1978). برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک می توان از معادله های مختلف استفاده کرد که در این تحقیق از معادله ون-گنوختن (van Genuchten, 1980). معادله ون گنوختن به صورت رابطه 3 و 4 می باشد.

قطر لوله اصلی 32 میلی متر و از جنس پلی اتیلن بود. برای تأمین فشار مورد نیاز آبیاری، از یک موتور پمپ روبین مدل SE-50X با دبی 560 لیتر در دقیقه و بار آبی 23 متر که به یک منبع 1000 لیتری متصل بود استفاده شد. لازم به ذکر است که فشار پمپ قابل تنظیم بود. در این تحقیق سطوح آبیاری شامل 10، 15 و 20 لیتر به ترتیب در 50، 150 و 120 دقیقه و عمق نصب نوار شامل 10، 20 و 30 سانتی متر بود که در سه تکرار انجام شد. انتخاب حجم آبیاری به جای دبی آبیاری به دلیل مشکل بودن واسنجی نوارهای آبیاری در دبی دلخواه بود. قطر داخلی نوارها 15 میلی متر و فاصله گسیلنده ها (قطره-چکان ها) 15 سانتی متر و از نوع کوتاه مسیر بودند. برای کار گذاشتن نوارهای آبیاری در عمق مورد نظر، بعد از قرار گرفتن مانیفولد روی زمین و مشخص شدن موضع نوارها، خندق هایی به طول یک متر و عمق 10، 20 و 30 سانتی متر برای هر یک از سطوح آبیاری 10، 15 و 20 لیتر حفر گردید و سپس اطراف آن ها با خاک نرم پوشانده و بعد از دفن کامل نوارهای آبیاری، اقدام به آبیاری شد. تقریباً 48 ساعت بعد از انجام هر آبیاری (که در این مدت سطوح آبیاری شده برای جلوگیری از تخریب سطحی با پلاستیک پوشانده می شد) خندق هایی به عرض تقریبی 50 و عمق 50 تا 70 سانتی متر، عمود بر راستای لاترال ها حفر گردید. بعد از حفر خندق، مقطعی از آن که می بایست قرائت رطوبت در آن انجام گیرد با کاردک صاف شده و شبکه بندی شد. در شبکه بندی ایجاد شده روی دیواره خندق عمود بر نوار آبیاری اضلاع هر واحد  $10 \times 10$  سانتی متر بود. محدوده مجاز برای هر نوار آبیاری 75 سانتی متر از طرفین هر نوار در نظر گرفته شد که در عمل قرائت رطوبت تا عمق 50، 60 و 70 سانتی متر به ترتیب برای نوارهایی که در عمق 10، 20 و 30 نصب شده بودند انجام شد (شکل 1). برای اینکه بتوان رطوبت حجمی خاک را به دست آورد از دستگاه رطوبت سنج انعکاس زمانی در حوزه زمان (TDR) مدل Minitrase Kit 6050X3K1B استفاده شد. این دستگاه دارای حس گرهایی با اندازه هایی از 15 تا 70 سانتی متر بود که برای اندازه گیری رطوبت در اعماق خاک استفاده شد. دقت اندازه گیری دستگاه در حدود  $\pm 2$  درصد بود و صفر تا 100 درصد رطوبت اشباع را اندازه گیری می کرد و قابل حمل بود (Anonymous, 2009). اعداد اندازه گیری شده با TDR در خاک سنگین کم تر از مقادیر واقعی بود و به همین دلیل نیاز به



شکل 1- نحوه شبکه‌بندی و اندازه هر واحد

30 سانتی‌متر نبود برای برآورد هدایت هیدرولیکی لایه‌های پایینی و پارامترهای هیدرولیکی هر سه لایه از روش حل معکوس در مدل HYDRUS-2D استفاده شد. برای استفاده از روش حل معکوس ابتدا رطوبت چند نقطه (برای این کار حدود 10 نقطه) از نیم‌رخ خاک حدود تقریباً 48 ساعت پس از آبیاری اندازه‌گیری شد. برای حل عددی معادلات حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لئونبرگ-مارکوارت استفاده شد (Simunek et al, 1999). در این روش باید نقاط را با رعایت ضرایب وزندهی به‌عنوان نقطه کنترل به مدل معرفی کرد که برای مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت اشباع به‌ترتیب ضرایب وزن دهی 1 و 10 در نظر گرفته و به مدل معرفی شد (Radcliffe and Simunek, 2010). کندلوس و سیمونک گزارش کردند که برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی در شرایط مزرعه روش حل معکوس مناسب‌تر و مدل رزتا برای شرایط آزمایشگاهی مناسب‌تر است (Kandelous and Simunek, 2010a). برای انجام روش حل معکوس ابتدا می‌بایست مقادیر اولیه به مدل داده شود و برای این منظور از تخمین‌های مدل رزتا (بجز لایه اول که هدایت هیدرولیکی آن با روش بیرکن به‌دست آمده بود) که احتیاج به درصد اجزاء خاک (شن، سیلت و رس) و وزن مخصوص ظاهری هر لایه داشت، استفاده شد. لازم به ذکر است که وزن مخصوص ظاهری برای لایه اول، دوم و سوم به‌ترتیب 1/58، 1/59 و 1/6 گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. پارامتر 1 برای مدل ون‌گنوختن، 0/5 فرض شد (van Genuchten, 1980).

برای مقایسه داده‌های مشاهده شده مزرعه‌ای و داده‌های شبیه-

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \gg 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s (S_e)^n \left[ \left( 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2 \right], S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

در رابطه 3 و 4، مقدار رطوبت اشباع با بعد  $(L^3 \cdot L^{-3})$  مقدار رطوبت باقی‌مانده (اولیه) با بعد  $(L^3 \cdot L^{-3})$ ، ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع با بعد  $(L \cdot T^{-1})$ ،  $n$  (بی بعد)،  $\alpha$  با بعد  $(L^{-1})$  و 1 (بی-بعد) پارامترهای شکل هستند.

برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در محل نصب نوارهای آبیاری توزیع رطوبت در نیم‌رخ خاک متقارن فرض شد. در عمل مرز در نظر گرفته شده برای هر نوار آبیاری در مقطع عرضی 150 سانتی‌متر (75 سانتی‌متر از طرفین نوار آبیاری) و در مقطع عمودی 60، 70 و 80 سانتی‌متر (به‌ترتیب برای عمق نصب 10، 20 و 30 سانتی‌متر) بود که برای مدل با توجه به پیش‌فرض متقارن بودن شرایط مرزی تعریف شده دارای عرض 80 و ارتفاع 60 تا 80 سانتی‌متر تعریف شد. مرز بالایی حوضه تعریف شده برای مدل شرایط جوی، مرزهای کناری بدون جریان و مرز پایینی به‌دلیل مجاورت زهکش سطحی در اطراف زمین زهکشی آزاد و عمق نصب نوار هم‌به‌عنوان شرایط مرزی جریان متغیر تعریف شد.

برای برآورد هدایت هیدرولیکی، خاک به سه لایه 0-20، 20-40 و 40-70 سانتی‌متر تقسیم شد. تعیین هدایت هیدرولیکی لایه اول با روش بیرکن انجام گرفت (Haverkamp et al, 1994). به‌دلیل اینکه روش بیرکن قادر به برآورد هدایت هیدرولیکی در عمق بیش از

سانتی‌متر دارای هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار کمی است و این قضیه به بالا بودن رطوبت اولیه در این لایه مرتبط بوده و این امر به دلیل این است که در گذشته زمینی که برای این پژوهش در نظر گرفته شد شالیزار بوده است. عمق لایه سخت (کفه ضخیم) در این-گونه اراضی نزدیک به سطح زمین است و علت تغییرات زیاد هدایت هیدرولیکی در این لایه با لایه‌های بالایی نیم‌رخ خاک نیز همین امر می‌باشد. هم‌چنین تقریباً عمق 20 تا 40 سانتی‌متر اشکال (3-الف)، (3-ج)، (4-ب) و (4-ج) که به ترتیب مربوط به سطح آبیاری 15 لیتر و عمق نصب نوار 10 و 30 سانتی‌متر می‌باشد، مقادیر شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. این امر ناشی از وجود ریشه‌ها و بقایای گیاهی و به طول انجامیدن زمان اندازه‌گیری بود. در مجموع تطابق خوب و قابل قبولی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دیده شد که این نتیجه با نتایج به‌دست آمده توسط اژدری (1387)، امین و اخمچ و ملایی کندلوس و همکاران (1385) مطابقت داشت (Amin and Ekhmaj, 2006). در مجموع هیچ روند خاصی برای شبیه‌سازی رطوبت در بالا و پایین نوارها دیده نشد. در یک سطح آبیاری مشابه مقادیر بالاتر از نقطه نصب نوار بیش‌تر و گاهی کم‌تر از مقادیر مشاهده شده شبیه‌سازی شد. این وضعیت برای مقادیر زیر نقطه نصب نوار نیز صادق بود. این امر ناشی از تفاوت در پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های خاک مورد بررسی بود.

نتایج به‌دست آمده از مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با سه شاخص آماری RMSE، nRMSE و CRM در جدول 3 درج گردیده است. آماره‌های به‌دست آمده در هر سطح آبیاری میانگین سه سری داده‌های رطوبتی بود که به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده در جهت عمودی نیم‌رخ خاک در قسمت نصب نوار، در جهت افقی در عمق 5 سانتی‌متری بالا و پایین نصب نوار بود. بر طبق دسته‌بندی جامیسون و همکاران nRMSE کم‌تر از 10 درصد را در رده عالی و nRMSE بین 10 تا 20 درصد را در رده خوب قرار می‌گیرد (Jamieson et al, 1991). مقدار آماره nRMSE همه سطوح آبیاری به‌جز تکرار دوم سطح 10 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر کم‌تر از 10 درصد به‌دست آمد که نشانه کارایی بالایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت در نیم‌رخ خاک تحت آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی در یک خاک سنگین رس‌سیلتی است.

سازی شده توسط مدل از شاخص‌های آماری ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، ریشه نرمال شده مربعات خطا یا درصد خطا (nRMSE) و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) استفاده شد. RMSE میزان تفاوت بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و هر چه این شاخص کم‌تر باشد نشانه شبیه‌سازی بهتر مدل می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (S_k - O_k)^2}{n}} \quad (5)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\sigma} \times 100 \quad (6)$$

$$CRM = \frac{|\sum_{k=1}^n O_k - \sum_{k=1}^n S_k|}{\sum_{k=1}^n O_k} \quad (7)$$

در روابط 4، 5 و 6،  $\bar{\sigma}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $O_k$  مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف نیم‌رخ خاک،  $S_k$  مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در نقاط متناظر و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

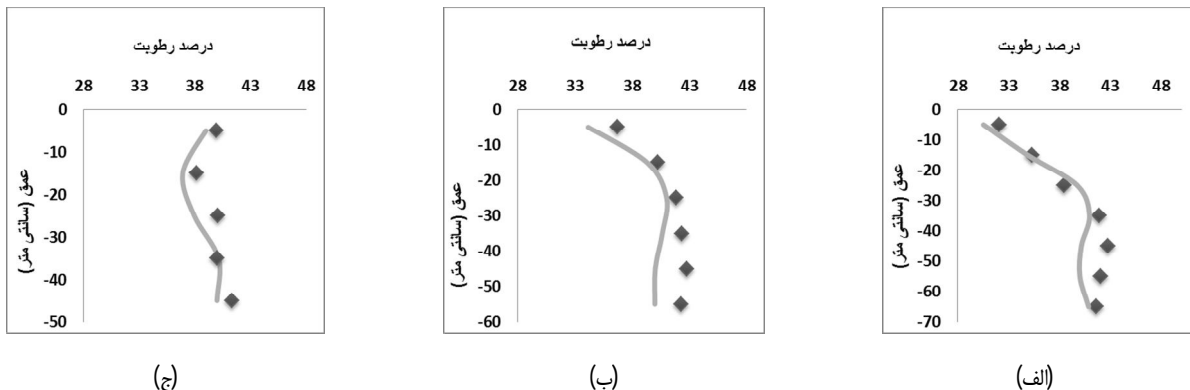
## نتایج و بحث

در جدول 2 نتایج حل معکوس و برآورد پارامترهای هیدرولیکی ون‌گنوختن درج گردیده است.

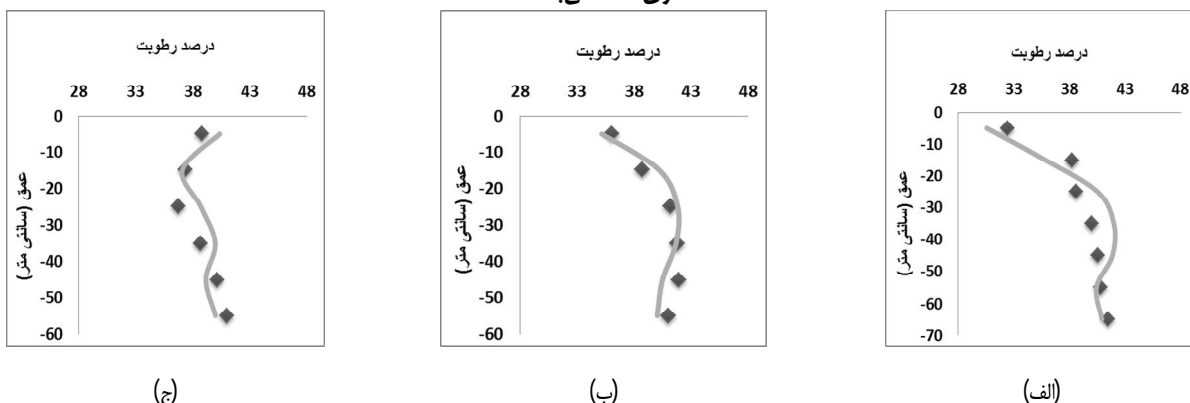
نمودار مربوط به تکرار منتخب (تکراری که به صورت تصادفی انتخاب شده بود) رطوبت مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در سطوح 10، 15 و 20 لیتر و اعماق نصب نوار 10، 20 و 30 سانتی‌متر به ترتیب در شکل‌های 2 تا 4 نشان داده شده است. در تمام نمودارهای شکل 2 تا 4 محور عمودی عمق نیم‌رخ خاک (سانتی‌متر) و محور افقی درصد رطوبت حجمی می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که رطوبت شبیه‌سازی شده هم‌خوانی خوب و قابل قبولی را در شکل‌های 2 تا 4 دارد. این هم‌خوانی در شکل‌های (2-ب)، (2-ج) و (4-الف) که به ترتیب مربوط به حجم آبیاری 10 لیتر و عمق نصب نوار 20 و 30 سانتی‌متر می‌باشد در عمق بیش‌تر از 40 سانتی‌متری نیم‌رخ خاک کم‌تر است و مقادیر مشاهده شده بیش‌تر از مقادیر شبیه‌سازی شده است. دلیل این امر این بود که با توجه به این که برای مقادیر رطوبت اولیه اعماق مختلف در چند نقطه اندازه‌گیری شد و در نهایت برای هر عمق متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده به مدل معرفی گردید، رطوبت اولیه خاک در برخی از قسمت‌های نیم‌رخ خاک بیش‌تر از مقدار متوسط معرفی شده به مدل بود. پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده نشان می‌دهد که لایه 40 تا 70

جدول 2- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی ون‌گنوختن - معلم (van Genuchten, 1980)

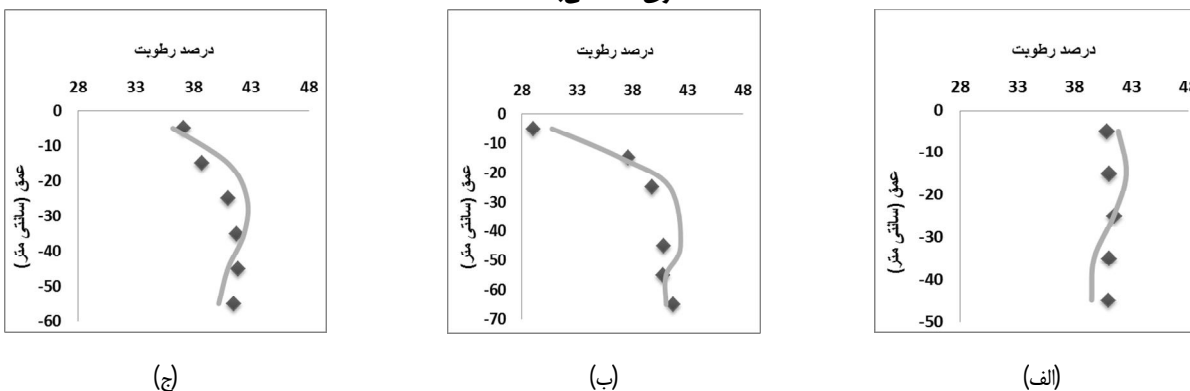
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$K_s$ ( $\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	n-Mualem (-)	l (-)	لایه‌های خاک (cm)
0/5026	0/0523	3/528	0/04130	1/380	0/5	لایه اول (0-20)
0/4698	0/015	2/77	0/0116	1/740	0/5	لایه دوم (20-40)
0/491	0/0658	0/0044	0/0166	1/246	0/5	لایه سوم (40-70)



شکل 2- حجم آبیاری 10 لیتر و عمق نصب نوار به ترتیب الف (10، ب) 20 و ج) 30 سانتی‌متر؛ رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده می‌باشند



شکل 3- حجم آبیاری 15 لیتر و عمق نصب نوار به ترتیب الف (10، ب) 20 و ج) 30 سانتی‌متر؛ رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده می‌باشند



شکل 4- حجم آبیاری 20 لیتر و عمق نصب نوار به ترتیب الف (10، ب) 20 و ج) 30 سانتی‌متر؛ رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده می‌باشند

روی یک خاک لوم‌شنی که در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی به‌منظور ارزیابی کارایی مدل HYDRUS-2D، مقادیر RMSE برای رطوبت اشباع مزرعه‌ای که به‌صورت وزنی بدست آمده بین 0/011 تا  $0/031 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  و برای رطوبت به‌دست آمده از مدل رزتا بین 0/012 تا  $0/045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  گزارش کرده‌اند (Skaggs et al, 2004). کندلوس و سیمونک (2010) در بررسی خود برای ارزیابی

دامنه تغییرات RMSE،  $0/013 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  (تکرار اول سطح 15 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر) تا  $0/045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  (تکرار دوم سطح 10 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر) بود و به لحاظ آماری هر چه میزان RMSE کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر بوده و نشان‌دهنده قابل قبول‌تر بودن نتایج به‌دست آمده است. در تحقیقی اسکاگز و همکاران

توسط اسکاگز و همکاران و کندلوس و سیمونک (a) بود و کاربرد آن برای کارهای مشابه قابل پیشنهاد است (Skaggs et al, 2004; Kandelous and Simunek, 2010a).

شاخص CRM نیز هر چه به صفر نزدیکتر باشد مناسبتر است. بیشترین مقدار CRM، 0/1 (تکرار دوم سطح 10 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر) و کمترین آن -0/065 (تکرار دوم سطح 15 لیتر و عمق 20 سانتی‌متر) به دست آمد. به غیر از تکرار دوم سطح 10 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر که CRM آن به ترتیب 0/1 است، بقیه تیمارها دارای CRM خوبی است. در مجموع نتایج به دست آمده از مقایسه شاخص‌های آماری خوب و عالی بودند که این امر بیانگر توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در تخمین تغییرات و ابعاد پیاز رطوبتی می‌باشد.

مدل HYDRUS-2D روی یک خاک لومرسی و تحت آبیاری قطره‌ای با منبع نقطه‌ای در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای، RMSE را بین 0/011 تا  $0/045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  محاسبه کرده و عملکرد مدل را قابل قبول دانسته‌اند. امین و اخمچ و کندلوس و سیمونک (a) در خاک شنی، پاتل و راجپوت در خاک لوم‌شنی، کندلوس و سیمونک (b) و کندلوس و همکاران، در خاک لومرسی و پوریزدان‌خواه و خالدیان (1391) در خاک لومی نتایج مشابهی را به دست آوردند (Amin and Ekhmaj, 2006; Kandelous and Simunek, 2010a; Patel and Rajput, 2008; Kandelous and Simunek, 2010b; Kandelous et al, 2011). نتایجی که برای میانگین RMSE هر حجم آبیاری در تحقیق حاضر به دست آمده است (محدوده 0/013 تا  $0/045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )، کارایی مدل HYDRUS-2D در خاک رس‌سیلتی و در شرایط مزرعه‌ای در محدوده ذکر شده

جدول 3- نتایج مربوط به مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط شاخص‌های آماری

CRM	nRMSE	RMSE	تکرار	تیمار
-0/0079	7/192	0/0268	1	حجم 20 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
-0/0065	7/874	0/0292	2	حجم 20 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
-0/0223	7/855	0/0293	3	حجم 20 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
-0/0184	5/334	0/0206	1	حجم 20 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
-0/0002	4/934	0/0191	2	حجم 20 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
0/0257	5/734	0/0229	3	حجم 20 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
0/0148	5/426	0/0217	1	حجم 20 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0161	5/544	0/0219	2	حجم 20 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0444	6/453	0/0267	3	حجم 20 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0137	5/165	0/0188	1	حجم 15 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
-0/0073	7/347	0/0265	2	حجم 15 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
-0/0351	7/128	0/0246	3	حجم 15 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
0/0089	3/541	0/014	1	حجم 15 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
-0/0652	9/089	0/0338	2	حجم 15 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
-0/0024	4/658	0/0179	3	حجم 15 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
-0/0043	6/153	0/0238	1	حجم 15 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0206	5/356	0/0211	2	حجم 15 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
-0/018	7/161	0/0274	3	حجم 15 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/055	7/797	0/0293	1	حجم 10 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
0/0827	9/285	0/0355	2	حجم 10 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
0/0749	8/804	0/0331	3	حجم 10 لیتر، عمق 10 سانتی‌متر
0/0671	7/703	0/0316	1	حجم 10 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
0/1007	10/711	0/0458	2	حجم 10 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
0/0561	6/280	0/0254	3	حجم 10 لیتر، عمق 20 سانتی‌متر
0/0632	7/372	0/0300	1	حجم 10 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0659	7/376	0/0298	2	حجم 10 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر
0/0628	8/399	0/0339	3	حجم 10 لیتر، عمق 30 سانتی‌متر

## نتیجه‌گیری

کارایی یک مدل وقتی مناسب و کاربردی ارزیابی می‌شود که بتواند در شرایط طبیعی و مزرعه‌ای تخمین خوبی از پارامترهای مدنظر داشته باشد. نتایج به‌دست آمده برای این پژوهش نشان‌دهنده این است که با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی بدست آمده از حل معکوس توسط خود مدل توانایی قابل قبولی را برای شبیه‌سازی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به نتایج می‌توان از این مدل به عنوان یک مدل عددی خوب برای تخمین رطوبت در خاک-های سنگین تحت آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی استفاده کرد. لازم به ذکر است که مدل دارای حساسیت بالایی نسبت به پارامترهای هیدرولیکی است و به کوچک‌ترین تغییرات در پارامترهای ورودی مدل واکنش نشان می‌دهد. مهم‌ترین مسئله در کار با مدل HYDRUS-2D تعریف دقیق شرایط مرزی، شرایط اولیه (مانند رطوبت اولیه) و پارامترهای هیدرولیکی می‌باشد. اندکی تغییر در مقادیر رطوبت اولیه و پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های نیم‌رخ خاک پروسه شبیه‌سازی مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه پژوهش حاضر روی خاک سنگین (رس‌سیلتی) و شرایط مزرعه‌ای انجام شده است در مجموع شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D مناسب بود و از این مدل می‌توان برای خاک‌هایی با بافت مشابه در دیگر مناطق کشاورزی برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و ابزار مناسب برای طراحی و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی استفاده کرد.

## منابع

- علیزاده، ا. 1387. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات آستان قدس رضوی. 484 صفحه.
- علیزاده، ا. 1388. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. انتشارات آستان قدس رضوی. 460 صفحه.
- ملایی کندلوس، م.، لیاقت، ع. ا. و عباسی، ف. 1385. شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. دومین کارگاه فنی کمیته ملی آبیاری و زهکشی، کرج، 108: 30-22.
- Anonymous. 2009. Soil moisture equipment corp. MiniTrase Kit 6050X3K1B. (in site <http://www.soilmoisture.com>). USA.
- Amin, M.S.M and Ekhnaj, A.I.M. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. 7th International micro irrigation congress, 10-16 September, PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia.
- American Society of Agricultural Engineering (ASAE). (1999). Soil and water terminology. S 526.1. ASAE Standards. St. Joseph, MI.
- Camp, C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. Transactions of the American society and agriculture engineering. 41.5: 1353-1367.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J and Zaradny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research. 27.4: 337-350.
- Haverkamp, R., P.J. Ross, K.R.J., Smetten and Parlange, J.Y. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. Water Resource Research. 30.11: 2931-2935.
- Kandelous, M.M and Simunek, J. 2010a. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Agricultural Water Management. 97.7: 1070-1076.
- Kandelous, M.M and Simunek, J. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Soil Science Society of America Journal. 28.5: 435-444.
- Kandelous, M.M., Simunek, J., van Genuchten, M.Th., and Malek, K. 2011. Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. Soil Science Society of America Journal. 75.2: 488-497.
- Patel, N and Rajput, T.B.S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. Agricultural Water Management, 95.12: 1335-1349.
- آخوندعلی، ع. م.، یآوری پور، ع. 1385. الگوهای رطوبتی ناشی از کاربرد عمودی لوله‌های تراوا به طول 45 سانتی‌متر. دوم آذر ماه. کمیته ملی آبیاری و زهکشی، دومین کارگاه فنی خردآبیاری، موسسه تحقیقات اصلاح بذر و نهال، کرج. صفحه 20-11.
- اژدری، خ. 1387. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی 15.1: 1-14.
- پوریزدان‌خواه، ه. و خالدیان، م. ر. 1391. بهبود کارایی مدل HYDRUS-2D در اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، 6: 1440-1449.
- حیدرژاده، م.، ضیاءتبار احمدی، م. و گلمایی، س. ج. 1385. اصول خرد آبیاری. دومین کارگاه فنی خرد آبیاری، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، کرج، 108: 115-122.



- multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0. Report.
- Siyal, A.A and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 96.6: 669–677.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, 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.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*. 44: 792-898.
- Radcliffe, D.E and Simunek, J. 2010. *Soil physics with HYDRUS modeling and applications*. CRC press. Taylor and Francis Group. 373 pages.
- Rahimzadegan, R. 1977. Water movement in field soil from a point source. M.Sc. Thesis, Utah state university, Logan, Utah, USA.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318–333.
- Roberts, T.L., White, S.A., Warrick, A.W and Thompson, T.L. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 95.6: 669–677.
- Simunek, J., Sejna, M and van Genuchten, M.T. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and

## Numerical Simulation of Soil moisture under Subsurface tape Drip Irrigation

M. Gharahsheikhbayat,<sup>1</sup> M.R. Khaledian<sup>2\*</sup>, M. Biglouei<sup>3</sup> and P. Shahinroksar<sup>4</sup>

Received: Nov.23. 2014

Accepted: May.13, 2015

### Abstract

To design drip irrigation system, the distribution and changes in soil moisture should be determined in situ that it is very costly and time consuming. This study evaluated the performance of HYDRUS-2D model to estimate soil moisture after irrigation under subsurface line source was in a heterogeneous heavy soil. Irrigation was done at three tape installation depths of 10, 20 and 30 cm with three volumes of 10, 15 and 20 liters in silty clay soil with three repeating. Observed and simulated data were compared using statistical indices i.e. RMSE, nRMSE and CRM. Results showed that the minimum and maximum of RMSE values were 0.013 and 0.045  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , respectively. nRMSE of all treatments except of one, the second replication of 10 liters of irrigation water with installation depth of 20 cm, were less than 10% categorized in the excellent class of soil moisture simulation. Maximum and minimum values of CRM were 0.100 and -0.065, respectively. Results from the model showed this model can be used in the design and management of subsurface drip irrigation systems in heterogeneous soils with heavy texture.

**Keywords:** Heavy soil texture, HYDRUS-2D model, Rasht, Simulation, Soil moisture

---

1- M. Sc. Student of Irrigation and Drainage, University of Guilan, Rasht

2- Assistant professor, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht and Dept. of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran

3- Assistant professor, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht

4- Researcher, Research Center for Agriculture and Natural Resources, Rasht

(\*-Corresponding author Email: [khaledian@guilan.ac.ir](mailto:khaledian@guilan.ac.ir))