

شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D

مهدی جوزی^{۱*}، نرجس مهدوی مقدم^۲، حمید زارع ایبانه^۳، حسین باقری^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

مقاله پژوهشی

چکیده

مدیریت آبیاری قطره‌ای نیازمند داشتن اطلاعات مناسب از توزیع افقی و عمودی رطوبت در خاک ناحیه ریشه است. در این پژوهش توزیع رطوبت خاک تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری قطره‌ای براساس ضرایب منحنی مشخصه رطوبتی برآوردی از سه روش متفاوت در مدل Hydrus-2D شبیه‌سازی شد. این سه روش شامل برآورد منحنی مشخصه رطوبتی از روش‌های حل معکوس با داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی (IS1)، حل معکوس با داده‌های رطوبت خاک پس از آبیاری (IS2)، و رزتا بود. برای تعیین دقت مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد آماره‌های RMSE و R^2 برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی در روش‌های IS1، IS2 و رزتا به ترتیب ۰/۰۰۸ و ۰/۹۹۹، ۰/۱۵۳ و ۰/۹۵۸، ۰/۱۲۵ و ۰/۹۷۷ به دست آمد. دقت روش‌های IS1 به اطلاعات منحنی مشخصه رطوبتی، رزتا به برخی خصوصیات زودیافت خاک و IS2 به رطوبت خاک پس از آبیاری وابسته بود. میانگین آماره‌های RMSE و R^2 در شبیه‌سازی توزیع افقی رطوبت برای روش‌های IS1، IS2 و رزتا به ترتیب ۴/۶ و ۰/۹۹۴۱، ۲/۸ و ۰/۹۹۵۱، ۵/۵ و ۰/۹۹۰۵ حاصل شد. میانگین این آماره‌ها نیز در شبیه‌سازی توزیع عمودی رطوبت برای روش‌های ذکر شده به ترتیب ۴/۶ و ۰/۹۸۳۰، ۴/۴ و ۰/۹۹۲۸، ۵/۴ و ۰/۹۹۳۲ به دست آمد. در پایان کاربرد روش IS1 به دلیل زمان و هزینه کمتر شبیه‌سازی‌ها و امکان انجام آن قبل از طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای توصیه شد.

واژه‌های کلیدی: برنامه رزتا، حل معکوس، ضرایب هیدرولیکی، مدل ون گنوختن، منحنی مشخصه رطوبتی.

^۱ استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

کرمانشاه، ایران، (* نویسنده مسئول) E-mail: jovzimehdi11@yahoo.com; m.jovzi@areeo.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. E-mail: n_m_calm1990@yahoo.com

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. E-mail: zare@basu.ac.ir

^۴ دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. E-mail: bagheri.hossein@live.com

مقدمه

لزوم طراحی درست آبیاری قطره‌ای و مدیریت آن نیازمند داشتن اطلاعات مناسب از توزیع افقی و عمودی رطوبت در خاک ناحیه ریشه است. مدل‌های شبیه‌سازی الگوی توزیع آب در خاک قادر به شبیه‌سازی توزیع رطوبت و ابعاد پیاز رطوبتی در خاک ناحیه ریشه و ارائه راه‌کارهای مدیریتی هستند. تحقیقات متعددی در دنیا با استفاده از مدل‌های مختلف تخمین الگوی توزیع رطوبت انجام یافته است. پوریزدان‌خواه و خالدیان (۱۳۹۱) عملکرد خوب مدل هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D) در شبیه‌سازی رطوبت خاک ناحیه ریشه مزرعه ذرت به‌روش آبیاری قطره‌ای - نواری^۱ را قبل از طراحی و اجرای سیستم آبیاری توصیه نمودند. نوروزیان و همکاران (۱۳۹۵) با مقایسه توزیع رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل HYDRUS-2D نشان دادند ضریب همبستگی^۲ (r) و ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) در یک خاک دو لایه مسطح و دو لایه شیب‌دار به‌ترتیب ۰/۸۲، ۲/۴۸ و ۰/۷۵، ۴/۰۳ سانتی‌متر است. از دیگر نتایج آنان تطابق بیشتر نیم‌رخ رطوبتی خاک‌های شیب‌دار با خاک‌های مسطح با افزایش مدت آبیاری بود. Siyal and Skaggs (2009) عملکرد مدل هایدروس دو بعدی را با توجه به ضریب تبیین ۹۷ درصد و میانگین ریشه مربعات خطای کمتر از ۱/۴ درصد در شبیه‌سازی جبهه رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مطلوب گزارش نمودند. نقوی و همکاران (۱۳۹۱) با مقایسه الگوی توزیع رطوبت در خاک اطراف قطره‌چکان طی دو زمان صفر و ۷۲ ساعت پس از آبیاری با مدل هایدروس دو بعدی نشان دادند خطای مدل بیشتر متوجه زمان‌های اولیه پس از آبیاری است و با گذشت زمان، میزان خطا به‌دلیل یکنواخت‌تر شدن توزیع رطوبت و توزیع مجدد رطوبت کاهش می‌یابد. دهقانی سانج و همکاران (۱۳۹۸) کاربرد مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک را با سیستم قطره‌ای زیرسطحی بررسی نمودند. نتایج نشان داد این مدل قادر به شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک است و

شرایط رطوبتی خاک را با دقت بالایی تخمین زد. افشار جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره‌چکان بر توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D نشان دادند این مدل دارای دقت برآوردهای بالاتری در عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر نسبت به ۴۵ سانتی‌متر بود. حیدری و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی اثر دبی بر الگوی خیس‌شده تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D نشان دادند دقت مدل هایدروس دو بعدی در دبی‌های پایین‌تر بیشتر بود و هرچه میزان ورودی‌های داده شده به مدل رزتا بیشتر باشد دقت مدل هایدروس بیشتر خواهد شد.

تعیین منحنی مشخصه رطوبتی در آزمایشگاه وقت‌گیر و هزینه‌بردار است و معمولاً از مدل ون‌گنوختن برای این مهم استفاده می‌شود. برای تخمین ضرایب هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن دو برنامه رزتا و روش حل معکوس توصیه شده است (باقری و همکاران، ۱۳۹۴). Chotpantararat et al. (2011) دقت قابل قبولی از برآورد ضرایب مدل ون‌گنوختن به‌روش حل معکوس از روی داده‌های منحنی رطوبتی، را برای شبیه‌سازی رطوبت خاک ارائه نمود. Xu and Xueyi (2013) ضرایب مدل ون‌گنوختن را از برنامه رزتا و روش حل معکوس تعیین کردند که نتایج‌شان بیان‌گر دقت بالاتر روش حل معکوس بود. Okamoto et al. (2015) در تخمین منحنی رطوبتی و شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک، برنامه رزتا را توصیه نمود. Autovino et al. (2018) عملکرد مدل Hydrus-2D در بررسی حرکت آب در خاک تحت دو سیستم آبیاری به‌روش حل معکوس در باغات زیتون را موفق دانستند. Karandish Et al (2017) با شبیه‌سازی حرکت آب در مزرعه‌ای مجهز به زهکش زیرسطحی با مدل Hydrus-2D/3D به‌روش حل معکوس نشان دادند این مدل ابزاری قوی و قابل اعتماد جهت برآورد حرکت آب در خاک و مدل‌سازی آن است. از دیگر نتایج آنان دقت بالاتر روش حل معکوس در تخمین ضرایب هیدرولیکی خاک نسبت به برنامه رزتا بود.

^۱ Tape

^۲ Correlation coefficient

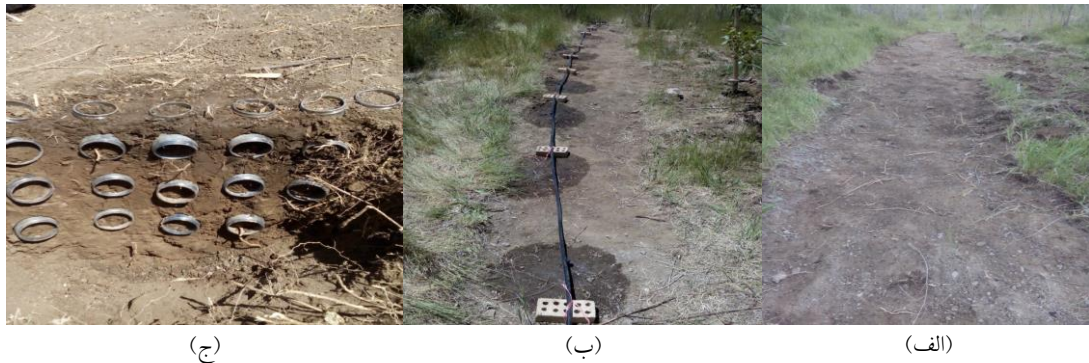
^۳ Root mean square error

برآورد ضرایب منحنی مشخصه رطوبتی خاک به سه روش برنامه رزتا، حل معکوس با دو سری داده منحنی رطوبتی و داده رطوبت خاک پس از آبیاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در قطعه زمینی مجهز به یک خط آبیاری قطره‌ای با قطر ۱۶ میلی‌متر و ۷ قطره‌چکان تنظیم شونده نتافیم به فاصله ۱ متر و دبی ۴ لیتر بر ساعت در دانشگاه بوعلی سینا اجرا شد (شکل ۱ الف و ب).

بررسی‌ها نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه مشخصات هیدرولیکی خاک در نحوه توزیع رطوبت خاک است و یکی از راه‌کارهای نشان دادن این اثر برآورد ضرایب منحنی مشخصه رطوبتی خاک و مدل‌سازی آن است. مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک را دارد و در صورت صحت‌سنجی می‌توان از چگونگی توزیع رطوبت در طول دوره آبیاری مطلع شد. بنابراین هدف از این پژوهش تعیین توزیع رطوبت خاک در مزرعه مجهز به سامانه آبیاری نواری قطره‌ای و قابلیت‌سنجی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی این تغییرات براساس



شکل (۱): الف، انتخاب زمین آزمایش، ب، اجرای آبیاری قطره‌ای و ج، نمونه‌برداری رطوبتی عرضی و عمقی از پروفیل خاک

توجه به ابعاد شبکه‌بندی و قطر ۵ سانتی‌متری سیلندرها نمونه‌گیری، فاصله افقی و عمودی جداره سیلندرها از یکدیگر ۵ سانتی‌متر بود. ضمناً، از آنجایی‌که طی هر بار نمونه‌برداری نیم‌رخ خاک تخریب می‌شد، برای هر زمان موردنظر، یک عدد قطره‌چکان آبیاری‌کننده در محل دیگری تعبیه گردید.

برای مدل‌سازی رطوبت در محیط خاک از مدل HYDRUS استفاده شد. مدل HYDRUS-2D از مدل‌های شبیه‌ساز حرکت دو بعدی آب در خاک براساس حل عددی معادله دیفرانسیلی ریچاردز به روش اجزاء محدود^۲ در شرایط اشباع و غیر اشباع خاک در قالب معادله ۱ است (Simunek et al., 1999).

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

بافت خاک لوم رسی شنی بود که با دانه‌بندی به‌روش هیدرومتری بدست آمد. چگالی ظاهری خاک، ۱/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌روش گلف ۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. برای به‌دست آوردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک، رطوبت نمونه‌ها در مکش‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۳۴۵، ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با دستگاه جعبه شن^۱ در مکش‌های پایین و دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های بالاتر اندازه‌گیری شد. مدت زمان آبیاری با سیستم ۵ ساعت بوده و بعد از اتمام آبیاری اطلاعات توزیع رطوبت نیم‌رخ خاک در محل قطره‌چکان در زمان‌های ۰، ۱/۵، ۳، ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت تا عمق ۴۰ سانتی‌متر و شعاع ۳۰ سانتی‌متر با شبکه‌بندی ۱۰×۱۰ سانتی‌متر مربع از محل قطره‌چکان به‌روش توزین به‌دست آمد (شکل ۱ ج). با

² Finite element method

¹ Sand box

و به صورت معکوس برآورد نشد. در نهایت مدل HYDRUS-2D، با نتایج حاصل از هر سه روش، اجرا و الگوی توزیع رطوبت براساس الگوریتم بهینه‌سازی لوبگر مارکوات شبیه‌سازی شد. شرط اولیه در شبیه‌سازی شامل مقدار رطوبت خاک قبل از آبیاری (۲۵ درصد)، شرایط مرزی شامل مرز ورود نقطه‌ای آب در زمان آبیاری، مرز جریان متغیر بعد از آبیاری به علت تبخیر در مرز فوقانی (محل قطره‌چکان)، کناره‌های راست و چپ مرزهای بدون جریان و مرز تحتانی شرط مرزی زهکشی آزاد تعریف شد. جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای به صورت ربع بیضی متقارن، در دو جهت افقی و عمودی رو به پایین در نظر گرفته شد. برای ارزیابی عملکرد مدل HYDRUS-2D و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، از روش ترسیمی و شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

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

$$NRMSE = 100 * RMSE / \bar{O} \quad (6)$$

در این روابط O مقادیر اندازه‌گیری، P مقادیر پیش‌بینی، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است. R^2 بین صفر تا یک است که نزدیکی آن به یک نشانه همبستگی بیشتر و انطباق نتایج پیش‌بینی مدل با نتایج اندازه‌گیری شده است (Kozak et al., 2008). RMSE بر حسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و نزدیکی آن به صفر نشانه خطای کمتر مدل است.

نتایج و بحث

نتایج تعیین پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی برای هر سه روش مدل ۵ برنامه رزتا، حل معکوس با اطلاعات

مقادیر θ و $k(h)$ به ترتیب از رابطه Van Genuchten (1980) (رابطه ۲) و معلوم‌ون‌گنوختن (رابطه ۳) به دست آمد.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \Psi)^n \right]^m}, m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \quad (2)$$

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

در این روابط، θ رطوبت حجمی [$L^3 L^{-3}$], θ_r رطوبت باقی‌مانده [$L^3 L^{-3}$], θ_s رطوبت اشباع [$L^3 L^{-3}$], h پتانسیل ماتریک [L], $k(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع [LT^{-1}], K_s هدایت هیدرولیکی اشباع [LT^{-1}], S_e درجه اشباع موثر [-] و L فاکتور اعوجاج^۱ معادل ۰/۵ برای اکثر خاک‌ها [-], t زمان [T], x مختصات افقی [L], z مختصات عمودی [L] می‌باشد.

برای حل معادله ۱ ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی خاک از سه روش مدل ۵ برنامه رزتا، حل معکوس با داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی (IS1) و حل معکوس با داده‌های رطوبت خاک (IS2) به دست آمد. مدل ۵ برنامه رزتا تخمینی از منحنی مشخصه رطوبتی را براساس مشخصات درصد ذرات خاک، چگالی ظاهری و درصد رطوبت حجمی خاک در دو نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم ارائه می‌دهد. به همین ترتیب در روش IS1 برآورد منحنی مشخصه رطوبتی از برنامه RETC براساس حداقل اختلاف با منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی به دست آمد. در روش IS2 نیز منحنی مشخصه رطوبتی از اعمال مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده پروفیل عرضی و عمقی خاک در اولین زمان پس از آبیاری در برنامه RETC برآورد گردید. آن‌گاه ضرایب α , n, m و درصد رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) خاک از منحنی مشخصه‌های حاصل از هر سه روش به دست آمد. در روش IS2 مشابه دو روش دیگر، مقدار اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع جهت جلوگیری از افزایش تعداد پارامترهای مجهول و حساسیت پایین مدل به آن در راستای افزایش دقت تعیین ضرایب رطوبتی استفاده شده

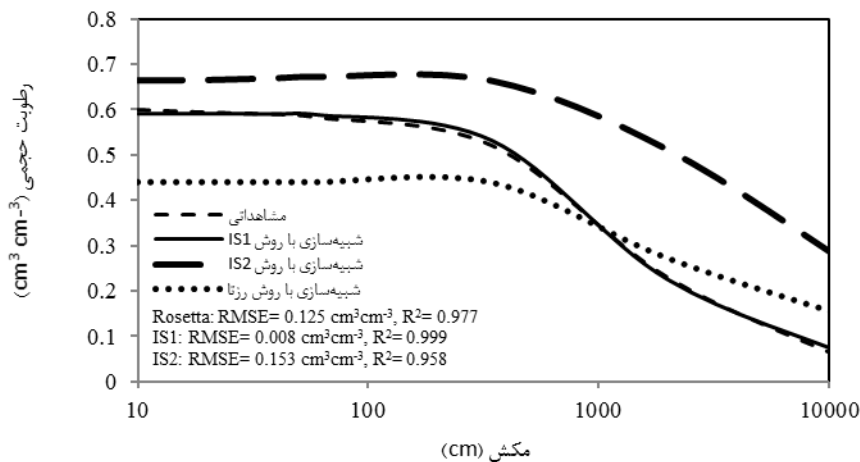
¹ Tortosity factor

ضرایب n ، α و مقدار θ_s نسبت به دو روش دیگر تا حدودی تفاوت دارد. باقری و همکاران (۱۳۹۴) بیش‌برآوردی ضرایب n و θ_r و کم‌برآوردی α و θ_s در مدل ۵ رزتا را کم بودن اطلاعات در لایه ورودی ساختار شبکه عصبی مربوط به آن گزارش نمودند. اطلاعات لایه ورودی برنامه رزتا شامل چگالی خاک، درصد اندازه ذرات، رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت پژمردگی است. شبکه عصبی برنامه‌ای داده محور است که دقت برآوردهای آن به تعداد نرون‌های اطلاعاتی در لایه ورودی بستگی دارد. Emami and Astaraei (2012) عدم لحاظ ماده آلی خاک در ساختار برنامه رزتا و تاثیر چشم‌گیر آن در برآورد θ_s را دلیل ضعف برنامه رزتا دانسته‌اند. برای تحلیل بهتر نتایج جدول ۱، منحنی‌های مشخصه رطوبتی برآوردی در مقایسه با منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری به‌همراه مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در شکل ۲ آمده است.

منحنی مشخصه رطوبتی (IS1) و حل معکوس با اطلاعات رطوبت خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای (IS2) در جدول ۱ آمده است. این جدول براساس مقادیر n ، α و θ_r برآوردی و درصد تفاوت مقدار θ_s برآوردی با θ_s اندازه‌گیری برای هر سه روش تنظیم شده است. جدول ۱ نشان می‌دهد مقدار n از روش‌های IS1، رزتا، IS2 به‌ترتیب ۱/۸۷، ۳/۶۰، ۱/۵۵، مقدار α برابر ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۱، θ_r معادل ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۳، ۰/۰۲۵ و نیز θ_s نیز ۰/۶۰، ۰/۴۴، ۰/۶۶ برآورد شد. طبق مطالعه Zhang et al. (2018) بسته به نوع بافت خاک مقدار ضریب n بین ۱/۲ - ۲/۶۹ و مقدار α بین ۰/۰۱۶ - ۰/۰۱۸ متغیر بوده است. همچنین طبق بانک اطلاعاتی (Carsel and Parrish (1988) برای بافت خاک لومی رسی شنی مقادیر ضرایب n و α برابر ۰/۵۹ و ۱/۴۸ و مطابق مجموعه داده Rawls et al. (1982) به‌ترتیب مقادیر آن‌ها ۰/۳۶ و ۱/۲۵ گزارش شده که متفاوت از مقادیر بدست آمده در این مطالعه است. بدین ترتیب مقادیر برآوردی n ، α و θ_r در روش IS1 و IS2 در دامنه مقادیر متون مرجع و در روش رزتا برآورد

جدول (۱): ضرایب هیدرولیکی خاک و ارزیابی آن‌ها

روش	n برآوردی	α برآوردی	θ _r (cm ³ cm ⁻³)		θ _s (cm ³ cm ⁻³)	
			برآوردی	اندازه‌گیری	تفاوت (درصد)	برآوردی
IS1	۱/۸۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲۵	۰/۶۰	۰
رزتا	۳/۶۰	۰/۰۰۰۳	۰/۱۰۳	۰/۰۲۵	۰/۴۴	-۲۷
IS2	۱/۵۵	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۶۶	۱۰



شکل (۲): منحنی‌های رطوبتی برآوردی از هر سه روش IS1، IS2 و رزتا در مقایسه با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری.

می‌باشد که بیان‌گر برآوردهای بهتر روش IS1 از منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. روش IS1 این برتری را هم دارد که با اطلاعات منحنی رطوبتی عمل می‌نماید و این اطلاعات در آزمایشگاه و قبل از طراحی و اجرای سیستم آبیاری قابل دست‌یابی است. به عبارتی روش IS1 به اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای وابسته نیست و از نظر هزینه و زمان نسبت به روش IS2 در اولویت است و از نتایج آن در طراحی بهتر سیستم آبیاری قطره‌ای می‌توان بهره گرفت. در جدول ۲ دقت شبیه‌سازی الگوی توزیع افقی و عمودی رطوبت با اعمال ضرایب هیدرولیکی (جدول ۱) و اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی در محیط HYDRUS-2D در قالب سه آماره RMSE، NRMSE و R^2 بین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف پس از پایان آبیاری آمده است. این جدول برای شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در فواصل مختلف افقی و عمودی از محل قطره‌چکان در مقایسه با مقادیر مشاهداتی تنظیم شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد دقت شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در امتداد قائم به روش IS2 در زمان‌های صفر، ۱/۵ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری و در زمان‌های ۳، ۶ و ۲۴ ساعت پس از آبیاری به روش IS1 در مقایسه با روش رزتا بیشتر بود. به همین ترتیب دقت شبیه‌سازی در توزیع افقی رطوبت به روش IS2 در ۵ زمان ۰، ۱/۵، ۳، ۶ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری نسبت به دو روش IS1 و رزتا مناسب‌تر بود. شبیه‌سازی‌های روش رزتا در دو امتداد عمودی و افقی تنها در ۷۲ ساعت پس از آبیاری در مقایسه با روش‌های IS1 و IS2 از RMSE و NRMSE کمتری برخوردار بود که می‌تواند نشانه دقت روش رزتا در رطوبت‌های کم خاک به واسطه اهمیت کمتر بافت خاک باشد (رضانی و همکاران، ۱۳۹۲). این نتیجه در راستای دقت بیشتر برنامه رزتا در مکش‌های بالاتر از نقطه ظرفیت زراعی خاک در برآورد منحنی مشخصه رطوبتی در شکل ۲ نیز است. مدل رزتا با توجه به بیشتر بودن RMSE در ۸۵/۵ درصد از زمان‌های پس از آبیاری نسبت به دو روش IS1 و IS2 از دقت بالایی برخوردار نیست. میانگین RMSE و NRMSE برای روش رزتا در تمام زمان‌های پس از آبیاری برای شبیه‌سازی افقی توزیع رطوبت به ترتیب ۵/۵ و

از شکل ۲ ملاحظه می‌گردد منحنی مشخصه رطوبتی حاصله از روش IS1 با RMSE و R^2 به ترتیب ۳-۳cm³ و ۰/۰۸ و ۰/۹۹۹ دارای کمترین خطا بوده و با منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی تطابق خوبی دارد. دقت بالای این روش می‌تواند ناشی از به‌کارگیری اطلاعات تمامی نقاط منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی در دامنه حداکثر رطوبت در نزدیکی نقطه اشباع تا حداقل رطوبت در نزدیکی نقطه پژمردگی دائم باشد. در مقابل منحنی مشخصه رطوبتی حاصله از روش IS2 با RMSE و R^2 به ترتیب ۳-۳cm³ و ۰/۱۵ و ۰/۹۵۸ کمترین نزدیکی را به منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی داشت. روش IS2 منحنی مشخصه رطوبتی را بالاتر از منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی برآورد نموده است (شکل ۲). در روش IS2 مقدار بیش‌برآوردی در مکش‌های بالاتر از نقطه ظرفیت زراعی بیشتر و در مکش‌های پائین‌تر از ظرفیت زراعی کمتر است. (Hopmans et al. (2002 نشان داد استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به تنهایی برای دست‌یابی به پاسخ مطمئن و منحصر به‌فرد جهت برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک کافی نمی‌باشد. منحنی مشخصه رطوبتی حاصله از روش مدل ۵ برنامه رزتا دارای RMSE برابر ۳-۳cm³ ۰/۱۲۵ و R^2 برابر ۰/۹۷۷ بود که دقت آن نسبت به روش IS1 کمتر و از روش IS2 بیشتر است. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی در مکش‌های ماتریک پائین‌تر از نقطه ظرفیت زراعی در برنامه رزتا کمتر از منحنی مشخصه رطوبتی مشاهداتی و در مکش‌های بالاتر از نقطه ظرفیت زراعی بیشتر است. بدین ترتیب تفاوت مقادیر برآوردی در مکش‌های کمتر از نقطه ظرفیت زراعی خاک بر عکس روش IS2 بیشتر و در مکش‌های بالاتر از نقطه ظرفیت زراعی کمتر است. بافت خاک تعیین کننده میزان مکش در رطوبت‌های کم است و دقت بیشتر مدل رزتا در مکش‌های ماتریک بالا به دلیل اثرگذاری کمتر بافت خاک است (رضانی و همکاران، ۱۳۹۲). ساختار برنامه رزتا شبکه عصبی است که بر پایه اطلاعات زودیافت خاک می‌باشد و عدم لحاظ ساختمان خاک و ماده آلی (رضانی و همکاران، ۱۳۹۰) علت کم برآوردی این برنامه است. در مجموع نتایج شکل ۲ هم‌راستا با نتایج جدول ۱

رزتا در محیط HYDRUS-2D در زمان‌های ۰، ۳، ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت پس از آبیاری در شکل ۳ آمده است. در تمامی این شکل‌ها، قطره‌چکان در گوشه سمت چپ سطح بالایی (سطح زمین) استقرار دارد. شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات هم‌زمان افقی و عمودی رطوبت حجمی تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری است که حاکی از افزایش رطوبت نسبت به مقدار اولیه قبل از آبیاری است. میانگین رطوبت اولیه نیم‌رخ خاک ۲۵ درصد بود. بیشترین مقدار رطوبت بلافاصله پس از آبیاری ۳۵/۱۳ درصد در محل قطره‌چکان اندازه‌گیری شد. به‌همین ترتیب بیشترین مقدار رطوبت معادل ۳۴/۹ درصد توسط مدل HYDRUS-2D در هر سه روش شبیه‌سازی شد که از مقدار اندازه‌گیری شده رطوبت به میزان ۰/۶۵ درصد کمتر برآورد گردید. همان‌گونه که بیان شد تغییرات مقدار رطوبت در سطح زمین به‌دلیل آبیاری افزایش یافت و اثرات آن تا ۶ ساعت پس از آبیاری

۲۱/۸ درصد و برای شبیه‌سازی عمودی توزیع رطوبت به‌ترتیب ۵/۴ و ۲۱/۰۴ درصد است که از میانگین RMSE و NRMSE دو روش دیگر بیشتر است (جدول ۲). در این راستا رضائی و همکاران (۱۳۹۲) برنامه رزتا را برای خاک‌های اروپا به‌واسطه استفاده از سه بانک اطلاعاتی با ۵۵۴ نمونه از خاک‌های اروپا مناسب دانسته و برای خاک‌های دیگر مناطق دارای محدودیت دانسته‌اند. به‌همین ترتیب میانگین آماره‌های R^2 ، RMSE و NRMSE برای توزیع افقی در تمام زمان‌های پس از آبیاری به‌روش IS2 به‌ترتیب ۰/۹۹۵۱، ۲/۸ و ۱۵/۲۱ درصد و برای توزیع عمودی رطوبت ۰/۹۹۲۸، ۴/۴ و ۱۸/۹۳ درصد و در روش IS1 برای توزیع افقی ۰/۹۹۴۱، ۴/۶ و ۱۹/۱۶ درصد و برای توزیع عمودی ۰/۹۸۳۰، ۴/۶ و ۱۸/۴۰ درصد حاصل شد (جدول ۲). در مجموع مقایسه مقادیر R^2 ، RMSE و NRMSE در جدول ۲ برای هر یک از زمان‌های پس از آبیاری فاقد نظم و روند مشخصی برای روش‌های شبیه‌سازی است. مقایسات ترسیمی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به هر سه روش IS1، IS2 و



جدول (۲): مقادیر توزیع عمودی و افقی رطوبت (برحسب درصد) بر آوردی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی.

رطوبت بر آوردی			فاصله افقی		رطوبت بر آوردی			فاصله عمودی		زمان پس از آبیاری
IS2	IS1	رزتا	رطوبت اندازه‌گیری	(cm)	IS2	IS1	رزتا	(cm)	(hr)	
۲۱/۹	۳۴/۸	۳۴/۰۲	۳۵/۱۳	۰	۲۲/۱	۳۴/۸	۴۰	۳۵/۱۳	۰	
۲۲/۱	۲۷/۴	۲۶/۰۷	۳۴/۷	۱۰	۲۱/۷	۲۸/۴	۳۰	۲۸/۸۳	۹	
۲۲/۳	۲۳/۱	۲۲/۵۱	۲۷/۵۳	۲۰	۲۰/۸	۲۵/۵	۲۶/۸	۲۵/۴۶	۱۶	
۲۲/۵	۱۷/۲	۱۹/۲۷	۲۲/۵۱	۲۹	۲۰/۳	۲۴/۹	۲۴	۲۹/۳۵	۲۷	
۰/۹۶۶۶ ۰/۹۸۸۵ ۰/۹۸۸۹			R ²		۰/۹۹۰۴ ۰/۹۹۵۹ ۰/۹۸۵۸			R ²		
۹/۱ ۵/۰ ۵/۳			RMSE		۷/۹ ۲/۲ ۳/۷			RMSE		
۳۰/۳۷ ۱۶/۶۸ ۱۷/۶۹			NRMSE (%)		۲۶/۶۱ ۷/۴۱ ۱۲/۴۶			NRMSE (%)		
۲۰/۸	۳۱/۸	۲۲/۳۸	۳۲/۷۲	۰	۲۰/۴	۳۱/۸	۲۲/۳۸	۳۲/۷۲	۱/۵	
۲۰/۷	۲۹/۹۴	۲۲/۰۲	۲۹/۱۸	۱۰	۲۰/۶	۲۹/۶۹	۲۲/۰۷	۲۸/۵	۱۶	
۲۰/۷	۲۷/۹۲	۲۱/۳۷	۲۸/۹۷	۱۸	۲۰/۷	۲۸/۸۳	۲۲/۰۳	۲۹/۹۹	۲۱	
۲۰/۲	۲۵/۳۸	۲۰/۶	۲۱/۲۶	۲۴	۲۰/۸۵	۲۶/۹۹	۲۱/۴۹	۳۴/۳۲۱	۳۱	
۰/۹۸۱۳ ۰/۹۹۴۳ ۰/۹۸۵۹			R ²		۰/۹۹۵۶ ۰/۹۸۹۷ ۰/۹۹۴۸			R ²		
۸/۹ ۲/۲ ۷/۴			RMSE		۱۱/۰ ۴/۰ ۹/۷			RMSE		
۳۱/۷۵ ۷/۸۵ ۲۶/۴۰			NRMSE (%)		۳۵/۲۸ ۱۲/۸۳ ۳۱/۱۱			NRMSE (%)		
۲۰/۱	۲۵/۵	۲۰/۸۹	۲۵/۶۶	۰	۲۰/۵	۳۰/۶۶	۲۰/۸۹	۲۵/۶۶	۳	
۲۰/۱	۲۶/۱	۲۰/۶۷	۲۶/۴۷	۱۰	۲۰/۶	۳۰/۹۱	۲۱/۰۵	۱۸/۹۲	۱۱	
۲۰/۲	۲۶/۷	۲۰/۲۴	۲۷/۰۸	۲۰	۲۰/۷	۲۹/۲۷	۲۰/۹۳	۲۱/۴۲	۲۰	
۱۹/۵	۲۸/۱	۱۹/۶۴	۲۸/۸۲	۲۹	۲۰/۸	۲۶/۹۷	۲۰/۸۸	۲۴/۰۰	۳۱	
۰/۹۹۶۹ ۰/۹۹۹۹ ۰/۹۹۵۶			R ²		۰/۹۸۷۰ ۰/۹۸۰۷ ۰/۹۸۶۵			R ²		
۷/۰ ۰/۳۵ ۶/۷			RMSE		۳/۴ ۷/۷ ۳/۱			RMSE		
۲۵/۹۲ ۱/۳۰ ۲۴/۸۱			NRMSE (%)		۱۵/۱۱ ۳۴/۲۲ ۱۳/۷۸			NRMSE (%)		
۱۹/۵	۲۷/۱۳	۱۹/۸۵	۲۴/۹۸	۰	۱۹/۹	۲۹/۱۳	۲۰/۸۵	۲۴/۹۸	۶	
۱۹/۶	۲۷/۹۸	۱۹/۷۹	۲۷/۴۴	۱۰	۱۹/۹۸	۳۰/۵	۲۱/۰۳	۲۳/۸۲	۹	
۱۹/۶	۲۵/۴۱	۱۹/۶۶	۲۵/۴	۲۰	۲۰	۲۸/۵۴	۲۱/۱۶	۲۵/۵۷	۲۱	
۱۹/۴	۲۳/۴۹	۱۹/۵	۲۵/۲۶	۲۹	۲۰/۱	۲۷/۹	۲۱/۲۳	۲۶/۹۸	۲۷	
۰/۹۹۸۷ ۰/۹۹۷۱ ۰/۹۹۸۶			R ²		۰/۹۹۳۹ ۰/۹۹۴۴ ۰/۹۹۴۱			R ²		
۶/۵ ۰/۱۴ ۶/۱			RMSE		۴/۸ ۴/۳ ۳/۹			RMSE		
۲۵/۲۲ ۰/۵۴ ۲۳/۶۷			NRMSE (%)		۱۹/۵۴ ۱۷/۵۱ ۱۵/۸۸			NRMSE (%)		
۱۷/۷	۲۳/۱۷	۱۸/۵۵	۱۸/۳۶	۰	۱۸	۲۳/۱۷	۱۸/۵۵	۱۸/۳۶	۲۴	
۱۸	۲۲/۲	۱۹	۲۱/۰۷	۱۰	۱۸/۸	۲۷/۵۸	۱۸/۸۱	۲۲/۴۶	۹	
۱۸	۲۱/۲۲	۱۹	۱۹/۵۷	۲۱	۱۹/۶	۲۷/۷۵	۲۰	۲۵/۰۷	۲۱	
۰/۹۹۷۵ ۰/۹۹۳۷ ۰/۹۹۷۷			R ²		۰/۹۹۳۰ ۰/۹۹۶۸ ۰/۹۹۳۲			R ²		
۲/۴ ۲/۷ ۱/۴			RMSE		۳/۵ ۴/۵ ۳/۳			RMSE		
۱۲/۲۰ ۱۳/۳۳ ۷/۱۲			NRMSE (%)		۱۵/۹۰ ۲۰/۴۴ ۱۴/۹۹			NRMSE (%)		
۱۶/۱۶	۲۰/۲۲	۱۷/۲۵	۱۹/۹۵	۰	۱۶/۳	۲۰/۲۲	۱۷/۲۵	۱۹/۹۵	۴۸	
۱۶/۱۶	۲۰/۲۲	۱۷/۲۵	۲۰/۰۳	۱۱	۱۷/۵	۲۵/۰۱	۱۷/۵۷	۲۲/۳۸	۱۲	
۱۶/۱۶	۲۰/۲۲	۱۷/۲۵	۱۸/۱۷	۲۱	۱۸/۱	۲۵/۶۴	۱۷/۷۱	۲۵/۱۲	۱۹	
۰/۹۹۸۰ ۰/۹۹۸۰ ۰/۹۹۸۰			R ²		۰/۹۹۶۲ ۰/۹۹۶۶ ۰/۹۹۴۶			R ²		
۳/۷ ۱/۲ ۲/۳			RMSE		۴/۹ ۲/۲ ۵/۱			RMSE		
۱۹/۰۹ ۶/۱۹ ۱۱/۸۷			NRMSE (%)		۲۱/۸۶ ۹/۸۱ ۲۲/۷۵			NRMSE (%)		

ادامه جدول (۲): مقادیر توزیع عمودی و افقی رطوبت (برحسب درصد) برآوردی در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای.

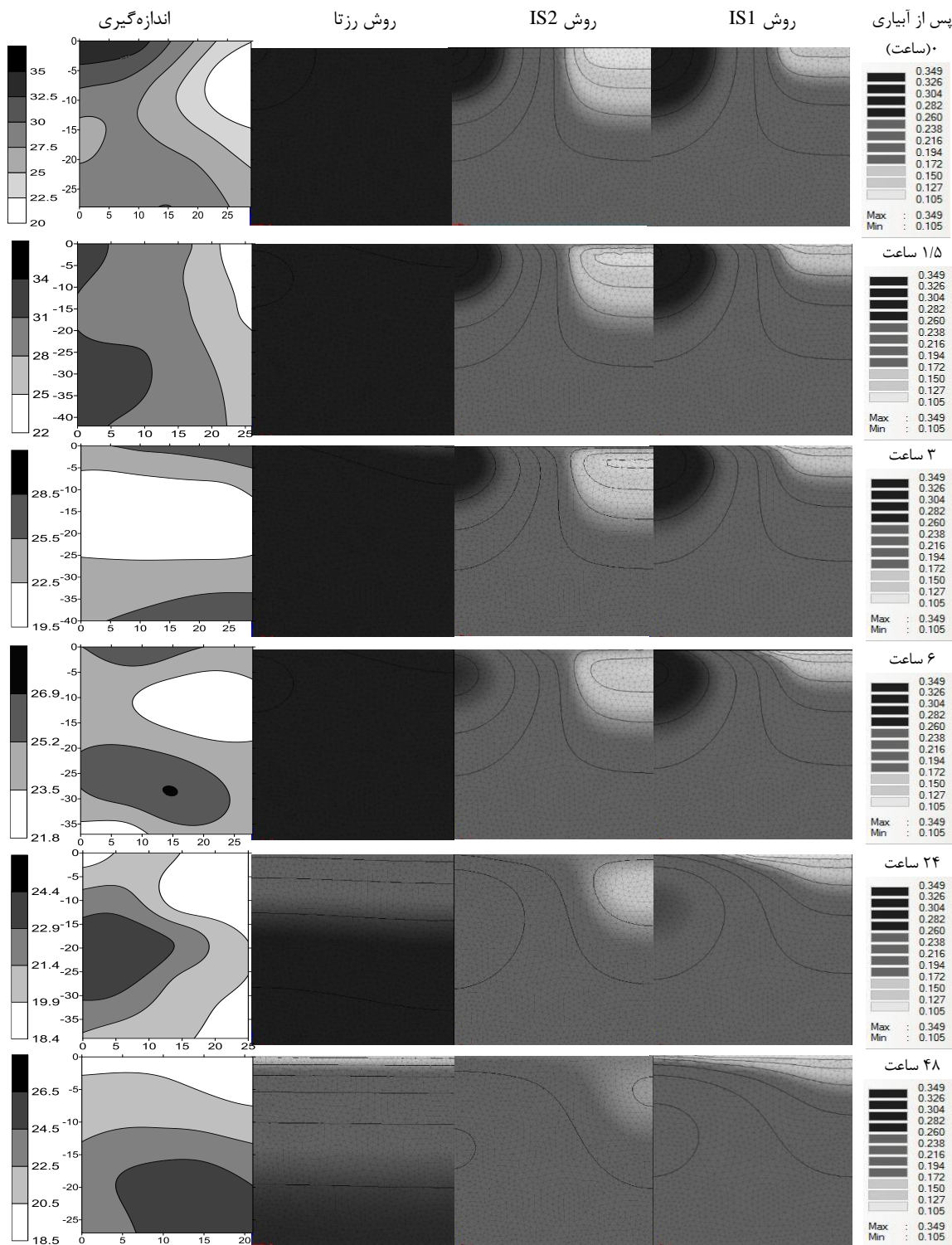
رطوبت برآوردی			رطوبت اندازه‌گیری	فاصله افقی (cm)	رطوبت برآوردی			رطوبت اندازه‌گیری	فاصله عمودی (cm)	زمان پس از آبیاری (hr)
IS2	IS1	رزتا			IS2	IS1	رزتا			
۱۴/۲	۲۱/۲۲	۱۶/۰۹	۱۴/۶۸	۰	۱۴/۲	۲۱/۲۲	۱۶/۰۹	۱۴/۶۸	۰	۷۲
۱۴/۱	۲۱/۲۲	۱۶/۰۹	۱۲/۵۴	۱۱	۱۶/۸	۲۴/۷۹	۱۶/۵۲	۱۹/۵۰	۱۲	
۱۴/۱	۲۱/۲۲	۱۶/۰۹	۱۲/۶۸	۲۵	۱۷/۷	۲۶/۰۸	۱۶/۷۸	۲۱/۳۵	۲۵	
۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۴۶	۰/۹۹۴۶	R ²		۰/۹۹۶۴	۰/۹۹۵۷	۰/۹۸۲۲	R ²		
۱/۱	۸/۰	۳/۰	RMSE		۲/۴	۵/۶	۳/۳	RMSE		
۸/۲۷	۶۰/۱۵	۲۲/۵۶	NRMSE (%)		۱۲/۹۷	۳۰/۲۵	۱۷/۸۳	NRMSE (%)		
۰/۹۹۰۵	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۴۱	R ²		۰/۹۹۳۲	۰/۹۹۲۸	۰/۹۸۳۰	R ²		میانگین همه
۵/۵	۲/۸	۴/۶	RMSE		۵/۴	۴/۴	۴/۶	RMSE		زمان‌های
۲۱/۸۳	۱۵/۲۱	۱۹/۱۶	NRMSE (%)		۲۱/۰۴	۱۸/۹۳	۱۸/۴۰	NRMSE (%)		پس از آبیاری

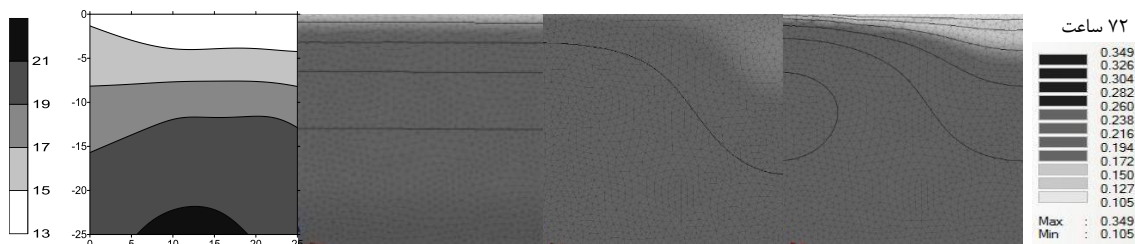
به زمان صفر ساعت پس از آبیاری توسعه عمودی و افقی رطوبت در پروفیل خاک را بخوبی نمایش می‌دهد. مطابق نتایج شکل ۳ حداکثر مقدار رطوبت در صفر ساعت پس از آبیاری و ۱/۵ ساعت پس از آن در محل قطره‌چکان در هر دو روش IS1 و IS2 قابل مشاهده است که مشابه نتایج اندازه‌گیری شده است و حداقل رطوبت مطابق آنچه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد در منتهی‌الیه سمت راست می‌باشد. ناحیه کمتر آبیاری شده در روش IS2 به شکل مربع در گوشه سمت راست می‌باشد و مساحت آن تا ۶ ساعت پس از آبیاری تقریباً ثابت است. در مقابل شبیه‌سازی به روش IS1 نشان می‌دهد مساحت ناحیه کمتر آبیاری شده به شکل مستطیل کوچکتری است از نظر شکلی با نتایج اندازه‌گیری صفر و ۱/۵ ساعت پس از آبیاری تقریباً هم‌خوانی دارد. لیکن شکل و وسعت آن مطابق نتایج شبیه‌سازی به روش IS1 از ۲۴ ساعت پس از آبیاری تا پایان ۷۲ ساعت پس از آبیاری به صورت مثلثی شکل از ناحیه سمت چپ در سطح به سمت محل استقرار قطره‌چکان توسعه یافته است که با نتایج اندازه‌گیری شده ترسیمی هم‌خوانی مناسبی دارد. مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در جدول ۲ نشان می‌دهد ۷۲ ساعت پس از آبیاری رطوبت در محل قطره‌چکان ۱۴/۶۸ درصد بود که در امتداد افقی به ۱۲/۶۸ درصد در ۲۵ سانتی‌متری سطح زمین کاهش یافت و در امتداد عمودی به ۲۱/۳۵ درصد در عمق ۲۵ سانتی‌متری افزایش یافت. مشابه چنین روند تغییراتی در شکل ۳ نیز آمده که نشان دهنده هم‌خوانی شکل ترسیمی حاصل از مقادیر اندازه‌گیری با شکل شبیه‌سازی به روش IS1 به‌ویژه در ۴۸ و ۷۲ ساعت

همواره از رطوبت در عمق بیشتر بود. شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل ۳ نشان داد با گذشت زمان از رطوبت سطح به دلیل تبخیر کاسته شده ولی مقدار رطوبت در اعماق تقریباً ثابت است. بیشترین گسترش توزیع افقی و عمودی رطوبت تا ۶ ساعت پس از آبیاری در مدل ۵ برنامه رزتا در تمام نقاط در حد ۳۴/۹ درصد شبیه‌سازی شد و پس از آن از رطوبت سطح زمین به دلیل تبخیر کاسته شد. کاهش رطوبت تقریباً به‌طور یکنواخت به‌صورت نواری باریک از سطح خاک، شروع و به عمق خاک گسترش یافت. به‌عبارتی دیگر مقدار رطوبت پروفیل خاک، ۲۴ ساعت پس از آبیاری در حدود ۳۰ درصد عمق، ۴۸ ساعت پس از آبیاری در حدود ۶۰ درصد عمق و ۷۲ ساعت پس از آبیاری تقریباً ۱۰۰ درصد ناحیه مورد ارزیابی از ۳۴/۹ درصد به حدود ۱۷ درصد کاهش یافت. در حالی‌که اندازه‌گیری‌های انجام شده در شکل ۳ در راستای برآوردهای مدل رزتا نمی‌باشد. مدل رزتا تخمین تقریباً یکسانی از رطوبت در فواصل مختلفی از قطره‌چکان نشان داد. نتایج مطالعه محمدی و دلبری (۱۳۹۴) نیز نشان‌دهنده دقت پایین برنامه رزتا با cm^3cm^{-3} تا $0/۱۵$ تا $0/۳۵$ $RMSE=0/۱۰$ در مقابل روند تغییرات افقی و عمودی رطوبت در روش IS1 و IS2 تقریباً مشابه یک‌دیگر بود. به‌طوری‌که روند تغییرات رطوبت در هر دو امتداد افقی و عمودی توسعه یافت و در زمان آبیاری به حداکثر مقدار در محل قطره‌چکان توسعه یافت و پس از آبیاری تغییرات رطوبت بیشتر متوجه جهت عمودی بود. ترسیم مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در زمان ۱/۵ ساعت پس از آبیاری نسبت

اعماق چهار زمان ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت پس از آبیاری،
بیشتر است (شکل ۳).

پس از آبیاری است. از طرفی شکل ترسیمی براساس
مقادیر اندازه‌گیری رطوبت نشان می‌دهد میزان رطوبت در





شکل (۳): شبیه‌سازی الگوی زمانی توزیع رطوبت در محیط HYDRUS-2D.

قابل استفاده است. ولی نتایج روش IS2 به طراحی و انجام یک مرحله آبیاری برای برداشت نتایج وابسته است و از نظر زمانی وقت‌گیر و از نظر اقتصادی هزینه‌بر است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضرایب منحنی رطوبتی ون‌گنوختن با روش IS1، IS2 و مدل ۵ رزتا تعیین و پس از ارزیابی، منحنی‌های رطوبتی برآوردی آن‌ها مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفت. مقادیر n و α در مقایسه با مقادیر متون مرجع حاکی از نامتعارف بودن برآوردهای رزتا برای مقادیر n و α بود. علاوه بر آن بیشترین تفاوت θ_s برآوردی و θ_s اندازه‌گیری نیز به روش رزتا مربوط بود. یکی از دلایل ضعف برنامه رزتا در برآورد θ_s می‌تواند عدم لحاظ پارامترهای بیشتری از محیط خاک باشد. نتایج منحنی‌های رطوبتی برآوردی این مطالعه بیان‌گر دقت بالای روش IS1 به‌واسطه استفاده از تمامی نقاط اندازه‌گیری منحنی رطوبتی و دقت بیشتر مدل ۵ رزتا در مقایسه با روش IS2 بود. روش IS2 در تمامی مکش‌ها رطوبت را بیشتر برآورد نمود و مدل ۵ رزتا در مکش‌های کم، رطوبت را کمتر و در مکش‌های زیاد، رطوبت را بیش از رطوبت اندازه‌گیری تخمین زد. نتایج شبیه‌سازی پروفیل‌های عمقی و عرضی رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای به‌کمک ضرایب هیدرولیکی تعیین شده با روش‌های مذکور در محیط HYDRUS-2D نشان داد دقت روش IS2 بیش از روش IS1 و رزتا بود. از عوامل مهم ضعف برنامه رزتا، تعداد کم و نوع داده‌های مورد نیاز آن، عدم لحاظ ویژگی‌های ساختمانی خاک و ماده آلی و ایجاد آن بر اساس بانک اطلاعاتی خاک USDA بود. با توجه به اهمیت بیشتر شبیه‌سازی رطوبت خاک به‌عنوان نتیجه مطالعه، روش IS2 با تکیه بر رطوبت خاک تحت آبیاری،

افزایش رطوبت در عمق به‌دلیل توزیع مجدد آن در عمق و تاثیر کمتر فرآیند تبخیر در عمق خاک و به‌همین ترتیب کاهش رطوبت در سطح زمین به‌دلیل دور بودن از قطره‌چکان و اثرپذیری سطح زمین از فرآیند تبخیر می‌باشد. مقایسه حالت‌های ترسیمی در شکل ۳ حاکی از هم‌خوانی اندازه‌گیری‌های ترسیمی با شبیه‌سازی‌های مدل IS1 به‌ویژه در زمان‌های طولانی‌تر پس از آبیاری دارد. کمترین مقدار رطوبت در هر دو روش در امتداد سطح افق و متناظر با محل قطره‌چکان در سطح زمین قابل مشاهده است. گسترش عمودی رطوبت در روش IS1 تا ۶ ساعت پس از آبیاری حفظ و در عین حال از دست رفتن رطوبت به‌واسطه تبخیر از انتهایی‌ترین مکان عرضی در سطح به سمت محل استقرار قطره‌چکان کاملاً مشهود است. در مقابل گسترش عمودی رطوبت در روش IS2 تا ۳ ساعت پس از آبیاری بود و از دست رفتن رطوبت از ناحیه انتهایی در سطح با سرعت بیشتری نسبت به روش IS1 در حال توسعه است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد مدل HYDRUS-2D برای برآورد رطوبت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف مناسب است، اما هیچ‌گونه نظم خاصی در تغییرات R^2 ، RMSE و NRMSE در زمان‌های مختلف پس از آبیاری بین روش‌ها وجود ندارد. این امر می‌تواند ناشی از عدم توجه به جریان‌های ترجیحی در مسیر ریشه‌ها، مسیر حرکت جانوران خاک‌زی و جریان در خلل و فرج درشت پروفیل خاک باشد. (Simunek et al. (2003). جریان ترجیحی را مهم‌ترین فرآیند برهم‌زننده پیش‌بینی‌های دقیق انتقال آب و املاح در خاک دانسته‌اند. از آنجایی که یکی از اهداف چنین مطالعاتی طراحی صحیح و مدیریت مناسب سیستم‌های قطره‌ای است لذا روش IS1 به‌دلیل وابستگی به داده‌های آزمایشگاهی منحنی رطوبتی برای این هدف



دقت بالاتری داشته ولی از جهت نیاز به زمان و حتی هزینه کمتر در در شبیه سازی توزیع رطوبت، روش IS1 توصیه گردید.

منابع

- افشار جهانشاهی، م.، ح. زارع ابیانه، ه. نقوی و ا. اسلامی. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره چکان با دبی های یکسان بر توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی و شبیه سازی آن با مدل HYDRUS-2D. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال ۳، شماره ۱۰، ص ۱۱۳-۱۰۱.
- پوریزدان خواه، ه. و م. خالدیان. ۱۳۹۱. بهبود کارایی مدل HYDRUS-2D در اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک. مجله آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۶، ص ۱۴۴۹-۱۴۴۰.
- دهقانی سانج، ح.، ح. حاجی آقابرگی و ا. کنعانی. ۱۳۹۸. کاربرد مدل HYDRUS-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم قطره ای زیر سطحی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۱۳ شماره ۶، ص ۱۵۴۹-۱۵۳۸.
- باقری، ح.، ح. زارع ابیانه، پ. افراسیاب و ع. افروزی. ۱۳۹۴. بررسی دقت روش های مختلف در تعیین ضرایب شبیه منحنی رطوبتی ون گنوختن. مجله مهندسی منابع آب، جلد ۸، شماره ۲۴، ص ۵۲-۴۱.
- حیدری، ز.، م. فراستی و ر. قبادیان. ۱۳۹۷. بررسی اثر دبی بر الگوی خیس شده تحت آبیاری قطره ای سطحی و شبیه سازی با مدل HYDRUS-2D. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال ۸، شماره ۳۲، ص ۱۴۴-۱۳۲.
- رمضانی، م.، ب. قنبریان علویچه، ع. لیاقت و ش. صالحی خشکرودی. ۱۳۹۰. برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک های شور و شور - سدیمی. مجله مدیریت آب و آبیاری، جلد ۱، شماره ۱، ص ۱۱۰-۹۹.
- رمضانی، م.، ش. صالحی خشکرودی، ع. لیاقت و م. غلامی سفید کوهی. ۱۳۹۲. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از اندازه گیری دو نقطه ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۷، شماره ۳، ص ۳۴۶-۳۳۷.
- محمدی، ا. و م. دلبری. ۱۳۹۴. شبیه سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS-1D. مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، ص ۷۸-۶۷.
- نقوی، ه.، م. حسینی نیا، ش. کریمی و م. ایراندوست. ۱۳۹۱. توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی. مجله علوم آب و خاک، جلد ۱۶، شماره ۶۱، ص ۶۹-۵۹.
- نوروزیان، ز.، ع. صدرالدینی، ا. ناظمی و ر. دلبر حسن نیا. ۱۳۹۵. بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره ای زیر سطحی در خاک های لایه ای مسطح و شیب دار. دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۲، ص ۲۷-۱۳.
- Autovino, D., G. Rallo and G. Provenzano. 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.
- Carsel, R.F. and R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24 (5): 755-769.
- Chotpanarat, S., Ch. Limpakanwech, W. Siri Wong, S. Siripattanakul and Ch. Sutthirat. 2011. Effects of soil water characteristic curves on simulation of nitrate vertical transport in a thai agricultural soil. *Sustainable Environment Research*, 21 (3):187-193.
- Emami, H., and A.R. Astaraei. 2012. Effect of organic and inorganic amendments on parameters of water retention curve, bulk density and aggregate diameter of a saline-sodic soil. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14:1625-1636.
- Hopmans, J.W., J. Simunek, N. Romano, and W. Durner. 2002. Simultaneous determination of water transmission and retention properties: inverse model. In J.H. Dane and G.C. Topp. Eds.,



Methods of soil analysis, Part 4 - Physical Methods, Soil Science Society of America, WI, pp. 963-1004.

Karandish, F., A. Darzi and J. Simunek. 2017. Application of HYDRUS (2D/3D) for Predicting the Influence of Subsurface Drainage on Soil Water Dynamics in a Rainfed-Canola Cropping System. *Irrigation and Drainage*, 67 (2): 29-39.

Kozak, E., Y. Pachepsky, C. Slawinski and R.T. Walszak. 2008. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. *Soil Science Society of America Journal*, 72:1243-1247.

Okamoto, K., K. Sakai, Sh. Nakamura, H. Cho, T. Nakandakari and Sh. Ootani. 2015. Optimal choice of soil hydraulic parameters for simulating the unsaturated flow: a case study on the island of miyakojima, japan. *Journal of Water*, 7(10): 5676-5688.

Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5): 1316-1320.

Simunek, J., M. Sejna and M.Th. Van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMCTPS70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.

Simunek, j., N.J. Jarris, M.Th. Van Genuchten and A. Gardenas. 2003. Review and comparison of model for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 213: 14-35.

Siyal, A.A. and T.H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96 (6):893-904.
unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.

Xu, Y. and Y. Xueyi. 2013. Estimating parameters of Van Genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 5:1977-1983.

Zhang, J., Z. Wang and X. Luo. 2018. Parameter Estimation for Soil Water Retention Curve Using the Salp Swarm Algorithm. *Water*, 10: 1-11.



Simulation of Soil Moisture Profile in Drip Irrigation with HYDRUS-2D Model

Mehdi Jovzi^{*1}, Narjes Mahdavi Moghaddam², Hamid Zare Abyaneh³, Hossein Bagheri⁴

Abstract

Drip irrigation management requires proper information on the horizontal and vertical distribution of moisture in the soil of the root zone. In this study, soil moisture distribution was simulated up to 72 hours after drip irrigation by coefficients of soil water characteristic curve with three different methods in the Hydrus-2D model. These methods were included estimating the soil water characteristic curve of inverse solution methods with soil water characteristic curve data (IS1), inverse solution with soil moisture data after irrigation (IS2), and Rosetta. To determine the accuracy of the simulated moisture values with the measured values, RMSE and R2 were used. The results showed that RMSE and R2 for estimating the soil water characteristic curve in IS1, IS2, and Rosetta methods were obtained 0.008 and 0.999, 0.153 and 0.958, 0.125 and 0.977, respectively. The accuracy of IS1 methods depended on the information of the soil water characteristic curve, Rosetta depended on some early soil properties, and IS2 depended on soil moisture after irrigation. Average RMSE and R2 in the simulation of horizontal moisture distribution for IS1, IS2, and Rosetta were obtained 4.6 and 0.9941, 2.8 and 0.9951, 5.5, and 0.9905, respectively. Also, the mean of these statistics in simulating the vertical distribution of moisture for the mentioned methods were 4.6 and 0.9830, 4.4 and 0.9928, 5.4 and 0.9932, respectively. Finally, the use of IS1 method was recommended due to the shorter time and cost of simulations and the possibility of performing it before the design of the drip irrigation system.

Keywords: Hydraulic coefficients, Inverse solution, Rosetta program, Soil water characteristic curve, Van Genuchten model.

¹ Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. (*Corresponding Author) E-mail: jovzimehdi11@yahoo.com; m.jovzi@areeo.ac.ir

² Graduated Master Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: n_m_calm1990@yahoo.com

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir

⁴ Graduated Ph.D., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: bagheri.hossein@live.com



Simulation of Soil Moisture Profile in Drip Irrigation with HYDRUS-2D Model

Mehdi Jovzi¹, Narjes Mahdavi Moghaddam², Hamid Zare Abyaneh³, Hossein Bagheri⁴

Introduction

Drip irrigation management requires proper information on the horizontal and vertical distribution of moisture in the soil of the root zone, which is related to soil water retention curve. The soil retention curve is one of soil hydraulic properties that have many applications in water and soil studies. The need for more time and high cost in measurement of retention curve were caused to using various strategies such as the inverse solution method and Rosetta program for its estimating and its coefficients determining. Determining of retention curve coefficients and using it in soil moisture simulating program including Hydrus-2D provide simulating of soil moisture profile. Therefore, the aim of this study is determining and evaluating soil hydraulic coefficients, retention curve and simulating of cross section and depth profile of soil moisture using Rosetta program and the inverse solution methods.

Methodology

The 5-hour irrigation operation was conducted by the drip irrigation system contains 7 emitters with one-meter distance on the main pipe after measuring of soil retention curve and some of soil physical properties. The soil profile was created in the center of wetting front at the 0, 1.5, 3, 6, 24, 48, 72 hours after end of irrigation, and soil moisture measuring was done by weight method in specific distances of cross section and depth profile. In this study, soil moisture distribution was simulated up to 72 hours after drip irrigation by coefficients of soil water characteristic curve determined using three different methods in the Hydrus-2D model.

The HYDRUS-2D model is one of the simulation models of two-dimensional movement of water in soil based on the numerical solution of Richards's differential equation by finite element method in soil saturated and unsaturated conditions (Simunek et al., 1999).

Hydrus-2D required to soil retention curve coefficients, irrigation rate and time, soil profile dimensions, soil hydraulic conductivity and drainage condition to solve water movement through soil profile. The coefficients of soil water characteristic curve were θ_s (cm³ cm⁻³), θ_r (cm³ cm⁻³), α and n . Hydraulic conductivity and bulk density were measured using Guelph permeameter and cylindrical core, respectively. The simulation methods were included estimating the soil water characteristic curve of inverse solution methods with soil water characteristic curve data (IS1), inverse solution with soil moisture data after irrigation (IS2), and Model 5 of Rosetta. This model of Rosetta required to amounts of sand, silt and clay content, soil bulk density and soil moisture at field capacity and permanent wilting point. To determine the accuracy of the simulated moisture values with the measured values, RMSE and R2 were used.

Discussion and Conclusion

The results showed that RMSE and R2 for estimating the soil water characteristic curve in IS1, IS2, and Rosetta methods were obtained 0.008 and 0.999, 0.153 and 0.958, 0.125 and 0.977, respectively.

¹ Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. (*Corresponding Author) E-mail: jovzimehdi11@yahoo.com; m.jovzi@areeo.ac.ir

² Graduated Master Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: n_m_calm1990@yahoo.com

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir

⁴ Graduated Ph.D., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: bagheri.hossein@live.com



The weakness of model 5 of Rosetta is due to the high overestimation of n and underestimated of θ_s and α coefficients. The results of Mohammadi and Delbari (2015) showed low accuracy of Rosetta model for simulation of soil moisture profile. The accuracy of IS1 methods depended on the information of the soil water characteristic curve, Rosetta depended on some early soil properties, and IS2 depended on soil moisture after irrigation. Average RMSE and R2 in the simulation of horizontal moisture distribution for IS1, IS2, and Rosetta were obtained 4.6 and 0.9941, 2.8 and 0.9951, 5.5, and 0.9905, respectively. Also, the mean of these statistics in simulating the vertical distribution of moisture for the mentioned methods were 4.6 and 0.9830, 4.4 and 0.9928, 5.4 and 0.9932, respectively.

Comparison of the results shows that the HYDRUS-2D model is suitable for estimating moisture at different times and places, but there is no specific order in the changes of R2, RMSE and NRMSE at different times after irrigation between methods. This can be due to not paying attention to the preferential flows in the root path, the path of soil animals and the flow in the large pores of the soil profile. Simunek et al. (2003) considered preferential flow as the most important process that disrupts accurate predictions of water and solute transport in soil.

Finally, the use of IS1 method was recommended due to the shorter time and cost of simulations and the possibility of performing it before the design of the drip irrigation system.

The most important reference

1. Mohammadi, H. and M. Delbari. 2015. Simulation of water and solute movement through soil using software of Hydrus-1D. *Journal of Water and Soil Knowledge*, 25(1): 67-78.
2. Simunek, J., M. Sejna and M.Th. Van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMCTPS70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.
3. Simunek, j., N.J. Jarris, M.Th. Van Genuchten and A. Gardenas. 2003. Review and comparison of model for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 213: 14-35.