

تخمین رطوبت خاک با تعیین ضرایب منحنی رطوبتی ون گنوختن در آبیاری قطره‌ای

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۲۷

چکیده

در این مطالعه، دقت شبیه‌سازی توزیع دو بعدی رطوبت خاک با اعمال ضرایب منحنی رطوبتی برآوردی از مدل‌های پنج‌گانه برنامه Rosetta و دو روش حل معکوس و دونقطه‌ای در محیط Hydrus-2D برای یک سیستم آبیاری قطره‌ای بررسی شد. بیش‌ترین دقت برآورد ضرایب مدل ون گنوختن به روش دو نقطه‌ای با $RMSE=0/06$ و کم‌ترین دقت به مدل ۵ برنامه رزتا با $RMSE=0/87$ تعلق داشت. در همین راستا، منحنی‌های رطوبتی برآوردی نیز بیانگر بیش‌ترین شباهت نتایج روش‌های حل معکوس و دونقطه‌ای به منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده با $RMSE=0/08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ برای روش معکوس و $0/22$ برای روش دونقطه‌ای است. همچنین نتایج شبیه‌سازی توزیع دوبعدی رطوبت در پروفیل خاک نشان داد که دقت روش دونقطه‌ای با $RMSE=0/46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و $R^2=0/97$ بیش از سایر روش‌ها و دقت مدل ۱ و ۲ برنامه رزتا با $RMSE=0/07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ کم‌تر از سایر روش‌ها بود. بیش‌تر بودن دقت شبیه‌سازی توزیع دوبعدی رطوبت به‌عنوان نتیجه نهایی کار با توجه به دقت قابل قبول برآورد ضرایب هیدرولیکی مدل رطوبتی و منحنی رطوبتی در روش دونقطه‌ای قابل انتظار است. ضمن آن که به‌کارگیری این روش با نیاز اطلاعاتی دو نقطه رطوبتی در مقایسه با روش حل معکوس با نیاز اطلاعاتی بیش‌تر از دیدگاه هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن و از نظر دقت برای شبیه‌سازی توزیع دوبعدی رطوبت قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: برنامه رزتا، حل معکوس، روش دو نقطه‌ای، ضرایب هیدرولیکی خاک، Hydrus-2D

مقدمه

مهم، برنامه‌ها و مدل‌هایی ارائه شده که Hydrus جزو پرکاربردترین آن‌ها و یکی از مدل‌های توانمند در شبیه‌سازی انتقال رطوبت در خاک بر پایه حل عددی معادله ریچاردز است (اژدری، ۱۳۸۷). این مدل در قالب نسخه‌های یک، دو و سه بعدی توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه و در اختیار محققین قرار گرفته است (Simunek et al., 1998). در برخی مطالعات آزمایشگاهی و مزرعه‌ای از مدل Hydrus برای شبیه‌سازی رطوبت و برآورد مستقیم و معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده شده است (Wang et al., 2006; Abbasi et al., 2003 a,b). پاتل و راجپوت توانمندی مدل Hydrus در شبیه‌سازی توزیع دو بعدی رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را مناسب گزارش نمودند (Patel and Rajput., 2008). کوته و همکاران الگوی توزیع مکانی و زمانی رطوبت را متاثر از مشخصه‌های هیدرولیکی و لایه‌بندی خاک، دبی قطره‌چکان و تناوب آبیاری دانستند و مدل Hydrus را ابزاری مناسب در شبیه‌سازی توزیع رطوبت معرفی نمودند (Cote et al., 2003). از اطلاعات اساسی و لازم در مدل Hydrus برای تعیین چگونگی توزیع مکانی و زمانی رطوبت و مقدار آن، منحنی مشخصه رطوبتی خاک است. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک در قالب مدل‌های مختلف موجود در Hydrus امکان‌پذیر است که مدل رطوبتی ون گنوختن یکی از

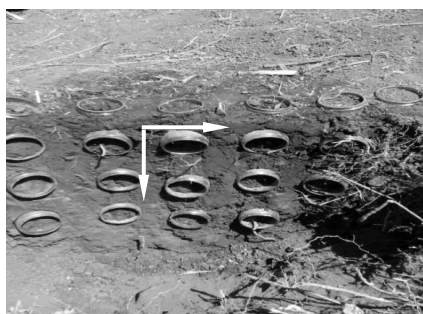
کمبود منابع آب و کاهش روز افزون آن به دلیل مصرف زیاد در بخش کشاورزی، اهمیت سامانه‌های آبیاری تحت فشار و مدیریت آب را نشان می‌دهد. سامانه‌های آبیاری تحت فشار، به‌ویژه آبیاری قطره‌ای، از پربازده‌ترین روش‌های آبیاری هستند که با توجه به ارزش بالای آب، برای کشت اکثر گیاهان از استقبال خوبی برخوردارند (فروغی و قائمی، ۱۳۸۴). اطلاع از وضعیت توزیع رطوبت در خاک تحت آبیاری قطره‌ای اطلاعات مفیدی از راندمان سیستم، تلفات آب، توزیع و تبخیر رطوبت از خاک ارائه می‌دهد. از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، شکل توزیع رطوبت می‌باشد. شناخت و توصیف الگوی توزیع زمانی و مکانی رطوبت در مزرعه دشوار و نیازمند استفاده از روش‌های جدید است. برای این

۱- دانشیار آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

فاصله نصب یک متر روی لوله‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر اخذ گردید. رطوبت خاک و توزیع افقی و عمودی آن پس از ۵ ساعت آبیاری، به روش توزین به تعداد ۲۴ نمونه برای هر قطره‌چکان به دست آمد. نمونه‌ها با سیلندرهای استوانه‌ای به قطر ۵ و ارتفاع ۴ سانتی‌متر در فواصل ۵ سانتی‌متری از دو طرف قطره‌چکان تا ۴۰ سانتی‌متر از سطح و عمق خاک مطابق شکل ۱ برداشت شد.



شکل ۱- توزیع افقی و عمودی نمونه برداری عمقی از نیم‌رخ خاک

شبه‌سازی توزیع دو بعدی رطوبت در محیط Hydrus حاصل حل عددی معادله ریچاردز به روش تفاضلات محدود مطابق رابطه ۱ به حالت غیراشباع است:

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

که در آن، θ رطوبت حجمی $[L^3L^{-3}]$ ، t زمان $[T]$ ، $K(h)$ هدایت آبی غیراشباع $[LT^{-1}]$ ، h مکش ماتریک $[L]$ ، x و z به ترتیب مختصات افقی و عمودی $[L]$ است. برای حل معادله ۱ لازم است تا معادلات ون گنوختن (رابطه ۲) و هدایت هیدرولیکی معلوم-ون گنوختن (رابطه ۳) به کار گرفته شوند (van Genuchten., 1980).

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

$$K(S_e) = K_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

در این روابط، θ_r رطوبت باقی مانده $[L^3L^{-3}]$ ، θ_s رطوبت اشباع $[L^3L^{-3}]$ ، h پتانسیل ماتریک $[L]$ ، n و m ضرایب شکل منحنی رطوبتی، $K(S_e)$ هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $[LT^{-1}]$ ، K_s هدایت آبی اشباع $[LT^{-1}]$ ، L فاکتور اعوجاج $[-]$ و S_e درجه اشباع موثر $[-]$ ، برابر $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ است.

در این مطالعه، ابتدا ضرایب منحنی رطوبتی ون گنوختن شامل θ_r ، θ_s ، n و α از روش‌های حل معکوس، دو نقطه‌ای و مدل‌های پنج‌گانه برنامه رزتا برآورد و سپس با اعمال در مدل ون گنوختن، منحنی رطوبتی تعیین شد. در روش حل معکوس، ضرایب منحنی رطوبتی با

پراکندگی آن‌ها می‌باشد. مزیت مدل ون گنوختن پیوستگی آن در بازه نقطه اشباع تا نقطه پژمردگی دائم برای اکثر بافت‌ها می‌باشد (عباسی، ۱۳۸۶). تعیین ضرایب مدل ون گنوختن به دلیل نیاز به منحنی رطوبتی اندازه‌گیری، عملی هزینه‌بردار و زمان‌بر است که روش‌هایی از جمله دو نقطه‌ای، حل معکوس و شبکه عصبی برای آن پیشنهاد شده است. برنامه رزتا^۱ به عنوان پراکندگی‌ترین توابع انتقالی برای تخمین سلسله مراتبی ضرایب منحنی رطوبتی بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است (Schaap et al., 2001). گزارش افشار جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۱) همبستگی بالایی از شبه‌سازی توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای با برنامه رزتا را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی نشان داد. لیکن نتایج اسماعیل‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵) حاکی از دقت کم برنامه رزتا در برآورد ضرایب مدل ون گنوختن به دلیل بسندگی آن به اطلاعات بافت خاک و عدم لحاظ نمودن اطلاعات ساختمان خاک بود. به اعتقاد گیمنز و همکاران نیز بیش‌تر توابع انتقالی تجربی بوده و کاربرد آن‌ها محدود به مکان‌های مورد تحقیق است (Gimenez et al., 1997). ریتز و همکاران در مطالعه خود روش حل معکوس را در تعیین ضرایب هیدرولیکی مدل ون گنوختن (n, α, θ_s) موفق برشمردند (Ritter et al., 2003). رضانی و همکاران (۱۳۹۲) استفاده از روش دو نقطه‌ای را با توجه به نیاز اطلاعاتی آن به دو نقطه از منحنی رطوبتی، نسبت به حل معکوس با نیاز اطلاعاتی بیش‌تر برای تعیین ضرایب مدل ون گنوختن توصیه نمودند. باقری و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی چندین روش تعیین ضرایب مدل ون گنوختن، دقت روش دو نقطه‌ای را قابل قبول ارزیابی نمودند. بنابراین هدف این مطالعه: ۱) دقت برآورد ضرایب مدل ون گنوختن از روش‌های مختلف، ۲) برآورد منحنی‌های رطوبتی متناظر با روش‌های برآورد ضرایب و ۳) شبه‌سازی رطوبت توزیعی در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای در مدل Hydrus-2D است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در زمین‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا با مختصات جغرافیایی $33^{\circ}33'$ تا $35^{\circ}38'$ عرض شمالی و $47^{\circ}45'$ تا $49^{\circ}36'$ طول شرقی با اجرای یک سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. خصوصیات خاک شامل بافت به روش هیدرومتری، چگالی ظاهری به روش سیلندر، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش گلف و رطوبت در مکش‌های $0/33$ و 15 بار به وسیله دستگاه صفحات فشاری تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های رطوبت خاک از میانگین اندازه‌گیری‌های رطوبت توزیعی از ۳ قطره‌چکان تنظیم‌شونده نتافیم^۲ با دبی اسمی ۴ لیتر بر ساعت، به

1- Rosetta

2- Netafim

$$\varphi(q, b) = \sum_{j=1}^{\beta} V_j \sum_{i=1}^{\gamma} W_{ij} [q_j^*(z, t_i) - q_j(z, t_i, b)]^2 \quad (4)$$

اعمال نقاط رطوبتی اندازه‌گیری در مکش‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۳۳۰، ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در برنامه RETC از طریق حداقل‌سازی اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی مطابق تابع هدف $\varphi(q, b)$ در رابطه ۴، برآورد گردید:

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک آزمایش

ذرات خاک (%)	رطوبت حجمی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	چگالی ظاهری	هدایت هیدرولیکی اشباع
شن سیلت رس	۲۳/۹	۱/۵۱	۰/۰۸۶
۱۳/۵	۰/۵۲	۱۵ بار	
۶۲/۶	۰/۳۳	۳۳ بار	

برآوردی از روش‌های یاد شده، لحاظ $Ks=0/086 \text{ cm min}^{-1}$ و فاکتور اعوجاج ۰/۵ مطابق مطالعه شاپ و همکاران در محیط Hydrus-2D، منحنی مشخصات رطوبتی خاک و شکل توزیع رطوبتی برای سیستم آبیاری قطره‌ای شبیه‌سازی گردید (Schaap et al., 2005). بدین ترتیب ۷ منحنی رطوبتی از روش‌های حل معکوس، دو نقطه‌ای و مدل‌های پنج‌گانه رزتا با اعمال ضرایب در مدل ون گنوختن و به صورت متناظر ۷ شکل توزیع رطوبتی دو بعدی در محیط Hydrus شبیه‌سازی گردید. دقت ضرایب، منحنی‌ها و پیازهای رطوبتی از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، ضریب تعیین^۲ (R^2)، راندمان مدل^۳ (EF) و جرم باقی‌مانده^۴ (CRM) بررسی گردید. بهترین مقادیر R^2 و EF یک و RMSE و CRM صفر می‌باشد. RMSE برای قضاوت درستی روش‌ها و مقادیر منفی و مثبت CRM به ترتیب تمایل مدل به بیش‌برآورد و کم‌برآورد است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2 \sum_{i=1}^n P_i^2} \right)^2 \quad (9)$$

$$EF = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (10)$$

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

در این روابط، پارامترهای O_i ، P_i ، \bar{O} و n به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری، پیش‌بینی، میانگین مقادیر اندازه‌گیری و تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشند.

که در آن، $b(\theta_r, \theta_s, \alpha, n, m)$ بردار عوامل مشخصه مجهول، $q_j^*(z, t_i)$ مقادیر اندازه‌گیری رطوبت در عمق z ، زمان t_i و β و γ به ترتیب تعداد داده‌های اندازه‌گیری و قرائت شده برای هر سری داده، w_{ij} و v_j نیز به ترتیب ضرایب وزنی برای هر قرائت و هر سری از داده‌های اندازه‌گیری می‌باشند.

در روش دو نقطه‌ای، با اعمال فرضیات $\theta_r=0$ ، $\theta_s=\phi$ (برابری رطوبت اشباع با تخلخل خاک) و $n=1/(1-m)$ و مقادیر رطوبت متناظر با مکش‌های ۳۳۰ و ۱۵۰۰ سانتی‌متر در مدل ون گنوختن، دو معادله غیر خطی ۵ و ۶ حاصل شدند. با حل این دو معادله در محیط Solver اکسل، ضرایب α و m با حداقل‌سازی اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری و داده‌های تخمینی منحنی رطوبتی از تابع هدف رابطه ۴، به دست آمد.

$$\theta_1 = \frac{\theta_s}{\left(1 + \alpha h_1^{1+m} \right)^m} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_s}{\left(1 + \alpha h_2^{1+m} \right)^m} \quad (7)$$

در این روابط، θ_1 و θ_2 به ترتیب مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) در مکش $h_1=330$ و $h_2=15000$ سانتی‌متر می‌باشد.

در مدل‌های پنج‌گانه برنامه رزتا، ضرایب θ_r ، θ_s ، n و α با اعمال مشخصات فیزیکی و رطوبتی خاک به عنوان اطلاعات ورودی، برآورد شدند (Simunek et al., 2006). در مدل ۱ برنامه رزتا از کلاس بافت خاک، در مدل ۲ از درصد ذرات خاک و در مدل ۳ از درصد ذرات خاک و چگالی ظاهری خاک استفاده شد. به همین ترتیب در مدل ۴ علاوه بر اطلاعات ورودی مدل ۳ از مقدار رطوبت در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر (ظرفیت مزرعه) و در مدل ۵ از اطلاعات مدل ۴ به همراه درصد رطوبت در مکش ۱۵۰۰ سانتی‌متر (نقطه پژمردگی) استفاده شد. در نهایت، با اعمال ضرایب θ_r ، θ_s ، n و α

- 1- Root mean square error
- 2- Determination coefficient
- 3- Modeling efficiency
- 4- Coefficient of residual mass

نتایج و بحث

ضرایب هیدرولیکی مدل ون گنوختن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- ضرایب مدل ون گنوختن از روش‌های مختلف

روش	α (cm^{-1})	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	n
معکوس	۰/۰۰۱۴	۰/۵۹۰۶	۰	۱/۸۷۴۲
دونقطه‌ای	۰/۰۰۱۶۷	۰/۶	۰	۱/۹۸۶۴
رزتا ۱	۰/۰۲۱۱	۰/۳۸۳۷	۰/۰۶۶۳	۱/۳۳۹۸
رزتا ۲	۰/۰۲۷۵	۰/۳۸۳۹	۰/۰۶۴۵	۱/۳۱۸۸
رزتا ۳	۰/۰۲۵۱	۰/۳۸۱	۰/۰۶۱۹	۱/۳۱۲
رزتا ۴	۰/۰۰۰۸	۰/۴۴۶۱	۰/۱۱۳۴	۲/۲۱۲
رزتا ۵	۰/۰۰۰۳	۰/۴۴	۰/۱۰۳۳	۳/۵۹۹۵

مطابق نتایج جدول ۲، مقادیر n و α برآوردی عکس یکدیگر می‌باشند. به‌گونه‌ای که حداکثر مقدار n معادل ۳/۶ متناظر با حداقل مقدار $\alpha=۰/۰۰۰۳$ و حداقل مقدار n معادل ۱/۳۱ متناظر با حداکثر مقدار $\alpha=۰/۰۲۷۵$ بود. نتایج مطالعه مهدیان و قهرمان (۱۳۹۲) حاکی از منفی بودن رابطه همبستگی n با α در سه کلاس بافتی سبک، متوسط و سنگین بود که در راستای نتایج پژوهش حاضر است. از نکات دیگر، بیش‌تر بودن دامنه تغییرات بین پارامترهای α ، n و θ_r و θ_s برآورد شده در مدل‌های پنج‌گانه رزتا نسبت به دو روش حل معکوس و دو نقطه‌ای است. این امر بیانگر عدم کفایت استفاده از اطلاعات بافت خاک به‌علت تغییرپذیری زیاد مکانی و به‌تبع کارایی کم‌تر برنامه رزتا می‌باشد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین تمامی مدل‌های برنامه رزتا مقدار θ_s را کم‌تر و مقدار θ_r را بیش‌تر از روش معکوس و دو نقطه‌ای برآورد نمودند که نشان‌دهنده دامنه کم‌تر رطوبتی است. با علم به اینکه روش معکوس از تمامی نقاط منحنی رطوبتی استفاده نموده و دقت بالاتر آن قابل انتظار است. بنابراین ضرایب روش معکوس به‌عنوان ضرایب واقعی منحنی رطوبتی منظور و آماره‌های خطای ضرایب روش‌های مختلف نسبت به آن محاسبه گردید که در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- دقت روش‌های مختلف برآورد ضرایب منحنی رطوبتی

روش	CRM (-)	EF (%)	R ² (-)	RMSE (-)
دونقطه‌ای	-۰/۰۴۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹	۰/۰۶
رزتا ۱	۰/۲۷	۰/۸۵	۰/۹۹۷	۰/۲۹
رزتا ۲	۰/۲۷۳	۰/۸۵	۰/۹۹۷	۰/۳۰
رزتا ۳	۰/۲۷۸	۰/۸۴	۰/۹۹۷	۰/۳۰
رزتا ۴	-۰/۱۲	۰/۹۳	۰/۹۸۶	۰/۱۹
رزتا ۵	-۰/۶۸	-۰/۲۹	۰/۹۶۶	۰/۸۷

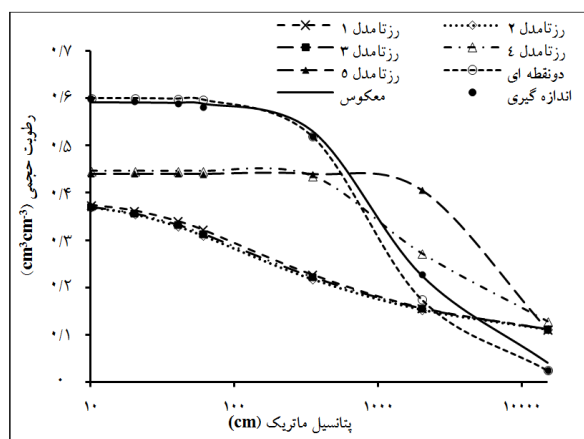
از جدول ۳ ملاحظه می‌گردد که برآورد ضرایب مدل ون گنوختن از روش دو نقطه‌ای به‌واسطه احراز کم‌ترین RMSE بالاترین دقت را دارد. در حالی که دقت مدل ۵ برنامه رزتا با $\text{RMSE}=۰/۸۷$ کم‌ترین است. به‌طور کلی خطای برآورد مدل‌های پنج‌گانه برنامه رزتا با میانگین $\text{RMSE}=۰/۳۹$ نسبت به روش دونقطه‌ای با $\text{RMSE}=۰/۰۶$ قابل توجه است. علت این امر می‌تواند در ماهیت داده‌ها و خطای برنامه رزتا نسبت به دو روش حل معکوس و دو نقطه‌ای باشد. برنامه رزتا براساس توابع انتقالی کلاس‌های بافت خاک عمل می‌نماید که ممکن است خطای بیش‌تر آن ناشی از عدم قطعیت‌های وابستگی منحنی رطوبتی خاک و تجربی بودن توابع انتقالی باشد و در مطالعه اسماعیل‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵) و گیمنز و همکاران هم آمده است (Gimenez et al., 1997). از طرفی آماره جرم باقی‌مانده (CRM) برای روش دونقطه‌ای $-۰/۰۴۹$ بود که بیانگر کم‌ترین مقدار بیش‌برآورد است. اما بزرگی مقدار این آماره و مثبت بودن آن در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ برنامه رزتا بیانگر کم‌برآورد بیش‌تر ضرایب منحنی رطوبتی و منفی بودن آن در مدل‌های ۴ و ۵ رزتا نشانه بیش‌برآوردی است. به‌همین ترتیب مقادیر R^2 و EF در جدول ۲ نیز نشان‌دهنده وضعیت بهتر برآورد ضرایب منحنی رطوبتی به کمک روش دو نقطه‌ای است. ضمن آن‌که در بین مدل‌های مختلف برنامه رزتا، مدل ۴ بهترین برآورد ضرایب هیدرولیکی خاک را داشت.

در شکل ۲، منحنی‌های رطوبتی برآوردی از مدل ون گنوختن (رابطه ۲) با ضرایب هیدرولیکی جدول ۲ ترسیم و دقت آن‌ها در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری در جدول ۴ آمده است.

از شکل ۲ ملاحظه می‌گردد که برآورد منحنی‌های رطوبتی از روش‌های حل معکوس و دونقطه‌ای بیش‌ترین نزدیکی را به نقاط اندازه‌گیری داشت. RMSE روش معکوس و دو نقطه‌ای به‌ترتیب $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ $۰/۰۰۸$ و $۰/۰۲۲$ است که نسبت به سایر روش‌ها کم‌تر است (جدول ۴).

جدول ۴- دقت منحنی‌های رطوبتی برآوردی روش‌های مختلف

مدل	CRM (-)	EF (%)	R ² (-)	RMSE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)
معکوس	-۰/۰۰۶	۱	۱	۰/۰۰۸
دونقطه‌ای	۰/۰۰۷	۰/۹۹	۱	۰/۰۲۲
رزتا ۱	۰/۳۹۶	-۰/۰۶	۰/۹۷	۰/۲۱۸
رزتا ۲	۰/۴۱۱	-۰/۱۳	۰/۹۷	۰/۲۲۵
رزتا ۳	۰/۴۰۶	-۰/۱۱	۰/۹۳	۰/۲۰۴
رزتا ۴	۰/۱۶۴	۰/۶۷	۰/۹۸	۰/۱۲۲
رزتا ۵	۰/۱۳۴	۰/۶۵	۰/۹۸	۰/۱۲۵

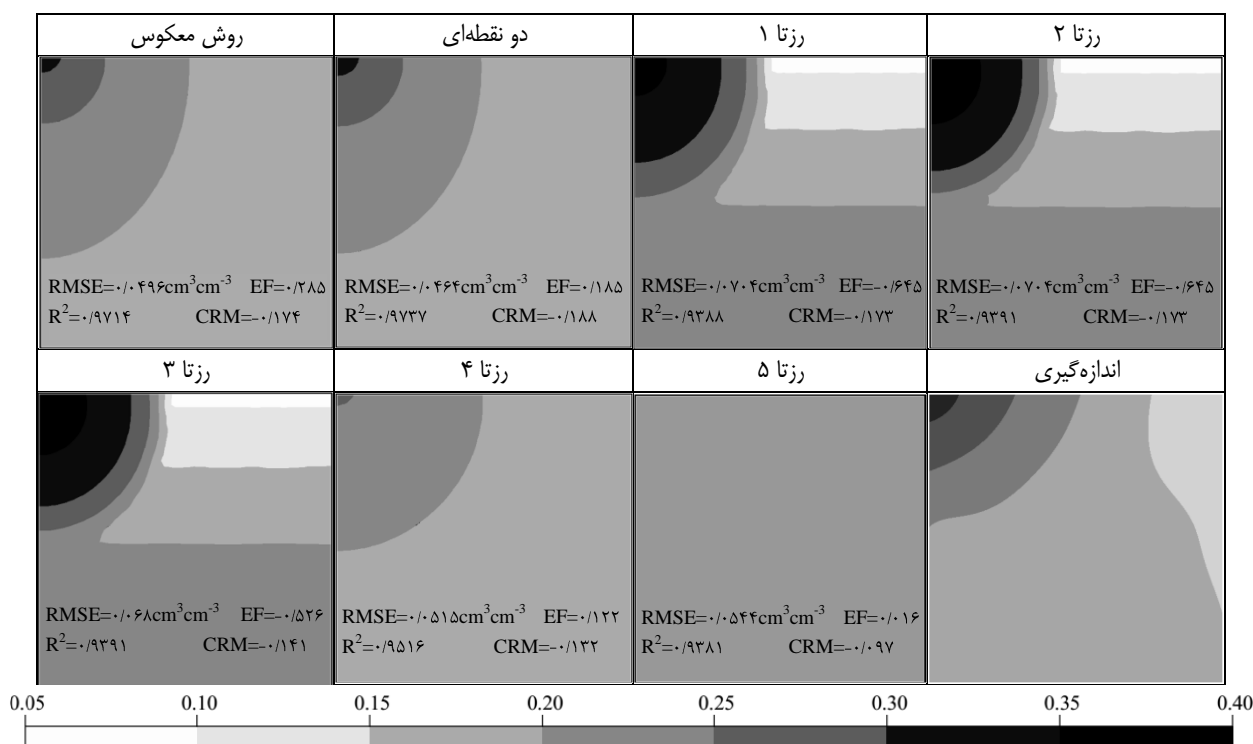


شکل ۲- منحنی‌های رطوبتی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده

رزتا است که عمدتاً از اطلاعات فیزیکی خاک نظیر بافت و درصد اندازه ذرات خاک استفاده می‌شود. در حالی که در روش حل معکوس و روش دو نقطه‌ای از اطلاعات منحنی رطوبتی استفاده می‌شود. همچنین ماهیت روش‌های معکوس و دو نقطه‌ای ریاضی- فیزیکی است و برای اکثر خاک‌ها قابل استفاده هستند ولی برنامه رزتا براساس ویژگی‌های خاک‌های بانک اطلاعاتی^۱ USDA در قالب شبکه عصبی با یک لایه پنهان و شش نرون در ۵۰ تکرار به صورت یکسان برای تمامی ۵ مدل ایجاد شده است (عباسی، ۱۳۸۶؛ رضانی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین دقت بالاتر مدل‌های ۴ و ۵ رزتا به نسبت مدل‌های ۱، ۲ و ۳ رزتا را می‌توان به نیاز اطلاعاتی بیشتر و وابسته بودن به مقادیر رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم مرتبط دانست. در نهایت پیاز رطوبتی اندازه‌گیری و برآورد شده با روش‌های مختلف به همراه دقت آن‌ها براساس آماره‌های آمده در روابط ۸ تا ۱۱ محاسبه و در شکل ۳ ارائه شد.

همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد بالاترین دقت شبیه‌سازی توزیع دو بعدی رطوبت در پروفیل خاک به روش دو نقطه‌ای با $RMSE=0.046 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و $R^2=0.97$ و کم‌ترین دقت به مدل ۱ و ۲ برنامه رزتا با $RMSE=0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ تعلق دارد. بالاتر بودن دقت روش دو نقطه‌ای و روش معکوس در شبیه‌سازی رطوبت مطابق شکل ۳ می‌تواند به واسطه دقت بهتر منحنی رطوبتی در این دو روش (شکل ۲ و جدول ۴) و دقت بالاتر برآورد ضرایب منحنی رطوبتی برای مدل ون گنوختن (جدول ۳) باشد. به همین ترتیب نتایج جدول ۳ نشان داد که کم‌ترین دقت برآورد ضرایب هیدرولیکی منحنی رطوبتی با تفاوت فاحشی به مدل‌های ۱ و ۲ برنامه رزتا تعلق دارد که با توجه به دقت نه‌چندان مناسب و رفتار مشابه این دو مدل در برآورد منحنی رطوبتی (شکل ۲ و جدول ۴)، نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳ برای مدل ۱ و ۲ برنامه رزتا قابل انتظار است.

نتایج حاصل از شکل ۲ و جدول ۴ در راستای مطالعات پن و وو، وروگت و همکاران و لامبوت و همکاران مبنی بر دقت مناسب روش معکوس و نتایج کریسول و همکاران و باقری و همکاران (۱۳۹۴) مبنی بر قابل قبول بودن روش دو نقطه‌ای است (Vrugt et al., 2003; Pan and Wu., 1999; Lambot et al., 2002; Cresswell et al., 2006). از آنجایی که حل معکوس از اطلاعات تمام نقاط اندازه‌گیری منحنی رطوبتی برای برآورد ضرایب بهره می‌گیرد بنابراین می‌توان انتظار کم‌تر بودن خطا (RMSE) را داشت. با این وجود صفر نشدن RMSE در روش حل معکوس می‌تواند نشانه خطای مدل و یا احتمالاً خطای اندازه‌گیری باشد. لیکن دقت کم‌تر مدل‌های پنج‌گانه رزتا به‌خصوص در مکش‌های کم و نزدیک نقطه اشباع ناشی از موثر بودن عامل ساختمان خاک بر منحنی رطوبتی و عدم لحاظ آن در برنامه است (بای‌بوردی، ۱۳۸۳). برتری منحنی‌های رطوبتی حاصل از دو روش حل معکوس و دو نقطه‌ای نسبت به مدل‌های پنج‌گانه رزتا در مقایسه با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری در آماره‌های محاسبه شده جدول ۴ نیز آمده است. از طرفی شکل ۲ نشان می‌دهد برآوردهای مدل ۱، ۲ و ۳ رزتا به دلیل تشابه ضرایب هیدرولیکی آن‌ها (جدول ۲) در تمامی مکش‌ها مشابه یکدیگر است. به همین صورت برآوردهای مشابه مدل ۴ و ۵ برنامه رزتا به‌خصوص در مکش‌های پایین و اطراف نقطه پژمردگی دائم به علت برابری نزدیک مقادیر ضرایب θ_s و θ_r در دو مدل است و اختلاف برآوردی آن‌ها مرتبط به تفاوت ضرایب شیب آن‌ها به‌ویژه ضریب n است. مطابق نتایج جدول ۴ میانگین قدر مطلق آماره‌های $RMSE$ ، R^2 ، EF و CRM در دو روش حل معکوس و دو نقطه‌ای به ترتیب ۰/۰۱۵، ۱، ۱ و ۰/۰۰۶۵، در سه مدل ۱، ۲ و ۳ برنامه رزتا با رفتاری یکسان به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۹۶، ۰/۱ و ۰/۴ و در دو مدل ۴ و ۵ رزتا با رفتاری مشابه ۰/۱۲، ۰/۹۸، ۰/۶۶ و ۰/۱۵ است. علت این امر همان‌گونه که قبلاً بیان شد در ماهیت نیاز اطلاعاتی مدل‌های برنامه



شکل ۳- پیاز رطوبتی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بلافاصله پس از آبیاری

خطاسنجی بهتر است. لیکن نتایج مدل ۴ نشان می‌دهد که عمده خطای شبیه‌سازی شامل کم‌برآورد در محل قطره‌چکان، و برآورد یکسان رطوبت در بازه $0/25 - 0/20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ از دو لایه رطوبتی نسبت به نتایج مشاهداتی است. به همین ترتیب مدل ۵ برنامه رزتا با اینکه براساس آماره‌های خطاسنجی دقت قابل قبولی دارد لیکن در مقایسه با مقادیر مشاهداتی، این مدل تمامی پروفیل خاک را در قالب یک بازه رطوبتی $0/25 - 0/20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ شبیه‌سازی نموده که نشان‌دهنده اثر متقابل خنثی‌کننده اطلاعات ورودی در شبیه‌سازی نسبت به مدل ۴ است. به عبارت دیگر دخالت دادن اطلاعات رطوبتی نقطه پژمردگی دائم چندان موفقیت‌آمیز نبوده است. ضمن آن که عدم تغییر رطوبت از نقطه اشباع تا مکش ۲۰۰۰ سانتی‌متری بر خلاف سایر مدل‌ها و سپس کاهش سریع آن با شیب تند در منحنی رطوبتی (شکل ۲) دلیلی بر یکنواختی رطوبت برآوردی توسط این مدل است. خان محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در برآورد رطوبت خاک در یک سیستم آبیاری قطره‌ای به این نتیجه رسیدند که مدل ۵ برنامه رزتا در زمانی که اطلاعات هیدرولیکی خاک در دسترس نیست می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. محمدی و دلبری (۱۳۹۴) نشان دادند که خطای مدل ۵ برنامه رزتا در تخمین رطوبت خاک در دامنه رطوبتی $0/35 - 0/15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ برابر $0/10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود که دقت نه چندان مناسبی برای این مدل است. فارغ از نوع مدل مورد استفاده در برنامه

آماره باقی‌مانده جرم (CRM) در تمامی روش‌های شبیه‌ساز منفی است که نشانه بیش‌برآورد مقادیر شبیه‌سازی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. بیش‌ترین بیش‌برآورد به روش دو نقطه‌ای و کم‌ترین بیش‌برآورد به مدل ۵ برنامه رزتا مربوط است. در عین حال، مقادیر بیش‌برآورد روش معکوس و مدل‌های ۱ و ۲ برنامه رزتا به یک اندازه و معادل $0/17$ می‌باشد. بررسی‌های جزئی بین مدل‌های ۱ و ۲ برنامه رزتا نشان می‌دهد که دقت دو مدل براساس آماره RMSE یکسان است لیکن آماره ضریب تعیین (R^2) نشان می‌دهد که مدل ۲ برنامه رزتا به صورت غیرمعنی‌داری وضعیت مطلوب‌تری دارد. این نتیجه نشان می‌دهد برنامه رزتا نسبت به اطلاعات ورودی در قالب بافت خاک در مدل ۱ و درصد اندازه ذرات خاک در مدل ۲ رفتار مشابهی دارد. در مدل ۳ برنامه رزتا، وضعیت شبیه‌سازی به‌واسطه اضافه شدن اطلاعات چگالی خاک بهتر شده است. اما عمده خطای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ برنامه رزتا مربوط به بیش‌برآورد مقدار رطوبت در شعاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متری محل قطره‌چکان است و با افزایش فاصله، برآوردها از بازه کم‌برآورد $0/10 - 0/05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در سطح زمین تا بیش‌برآورد $0/25 - 0/20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ در عمق خاک نوسان دارد. نتایج شبیه‌سازی در مدل‌های ۴ و ۵ برنامه رزتا که به ترتیب از اطلاعات تکمیلی رطوبت خاک در مکش‌های ۳۳۰ و ۱۵۰۰ سانتی‌متر نیز استفاده شده نشان می‌دهد که دقت کار از نظر آماره‌های

افشار جهانشاهی، م.، زارع ایبانه، ح.، نقوی، ح. و اسلامی، ا. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره چکان با دبی‌های یکسان بر توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D. فصل‌نامه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰۳: ۱۰۱-۱۱۳.

باقری، ح.، زارع ایبانه، ح.، افراسیاب، پ. و افروزی، ع. ۱۳۹۴. بررسی دقت روش‌های مختلف در تعیین ضرایب شبیه منحنی رطوبتی و گنوختن. فصل‌نامه مهندسی منابع آب ایران. ۸: ۴۱-۵۲.

بای‌بوردی، م. ۱۳۸۳. اصول مهندسی آبیاری. جلد اول، چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

پوریزدان‌خواه، ه.، خالدیان، م.، بیگلویی، م. و رخسار، ش. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی توزیع رطوبت تحت یک منبع خطی در خاک سنگین با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی. پژوهش آب در کشاورزی. ۱۱۳: ۲۸-۵۹۹.

خان محمدی، ن.، رضایی، ح.، بشارت، س. و بهمنش، ج. ۱۳۹۱. ارزیابی شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای براساس مشخصات هیدرولیکی خاک و اندازه‌گیری‌های میدانی. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰: ۱-۱۰.

رضانی، م.، صالحی خشک‌رودی، ش. و لیاقت، ع. ۱۳۹۲. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری دو نقطه‌ای. پژوهش آب در کشاورزی. ۳: ۲۷-۳۴۶-۳۳۷.

رضانی، م.، قنبریان علویجه، ب.، لیاقت، ع. و صالحی خشک‌رودی، ش. ۱۳۹۰. برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های شور و شور سدیمی. آب و آبیاری. ۱۰: ۱۱-۱۱۰-۹۹.

زارع ایبانه، ح.، فرخی، ا.، اژدری، خ. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی رطوبت و نیتروژن در خاک مزرعه پیاز تحت آبیاری قطره‌ای. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۵: ۲۰-۱۹-۱.

شفیعی، م.، قهرمان، ب.، ثقفیان، ب.، داوری، ک. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP با استفاده از روش GLUE. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸: ۲-۴۷۷-۴۸۸.

عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

فروغی، ف. و قائمی، ع. ا. ۱۳۸۴. تعیین عمق بهینه آب آبیاری گندم براساس خط مشی‌های مختلف مدیریتی در آبیاری بارانی

رزتا، در برخی مطالعات نتایج مناسبی از برنامه رزتا برای شبیه‌سازی رطوبت خاک گزارش شده است (پوریزدان‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳؛ زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۲؛ اژدری، ۱۳۸۷) اما از آنجایی که این روش براساس بانک اطلاعاتی منابع خاک کشور ایجاد نشده نمی‌توان نتایج آن را بدون ارزیابی و صحت‌سنجی قبلی به کار بست.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضرایب منحنی رطوبتی ون گنوختن با روش حل معکوس، دو نقطه‌ای و مدل‌های پنج‌گانه برنامه رزتا تعیین و پس از ارزیابی، منحنی‌های رطوبتی برآوردی آن‌ها مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج ضرایب هیدرولیکی روش‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با روش معکوس نشان از برتری روش دو نقطه‌ای داشت. در بین مدل‌های رزتا مدل ۴ بیش‌ترین دقت و مدل ۵ به دلیل بیش‌برآوردی زیاد ضریب n کم‌ترین دقت در تخمین ضرایب را داشت. مقایسه منحنی‌های رطوبتی برآوردی با اندازه‌گیری بیانگر دقت بیش‌تر روش حل معکوس به واسطه استفاده از تمامی نقاط منحنی رطوبتی و پس از آن روش دو نقطه‌ای است. همچنین مدل‌های ۱، ۲ و ۳ رزتا منحنی رطوبتی را مشابه و مدل‌های ۴ و ۵ رزتا منحنی رطوبتی را با دقتی نزدیک به هم برآورد نمودند که در این بین دقت مدل ۴ رزتا بهتر بود. در ادامه، پیاز رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای با کمک ضرایب منحنی‌های رطوبتی برآوردی با روش‌های مختلف در محیط نرم‌افزار Hydrus-2D شبیه‌سازی شد. بیش‌ترین دقت در شبیه‌سازی دوبعدی پیاز رطوبتی به روش دو نقطه‌ای و کم‌ترین دقت به مدل‌های ۱ و ۲ رزتا تعلق داشت. در بین مدل‌های پنج‌گانه برنامه رزتا مدل ۴ بیش‌ترین دقت را داشت در حالی که تمامی روش‌ها مقادیر رطوبت خاک را بیش از مقدار اندازه‌گیری برآورد نمودند. در مجموع، می‌توان روش دو نقطه‌ای را به واسطه دقت بالا در برآورد ضرایب و منحنی رطوبتی، عدم اتکا به نرم‌افزارهای تخصصی، نیاز اطلاعاتی کم‌تر در مقایسه با روش حل معکوس از دیدگاه هزینه‌بر و زمان‌بر بودن و از نظر دقت برای شبیه‌سازی توزیع دوبعدی رطوبت (پیاز رطوبتی) توصیه نمود.

منابع

اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۰: ۱۶۸-۱۸۰.

اسماعیل‌نژاد، ل.، سیدمحمدی، ج. و شعبان‌پور، م. ۱۳۹۵. مقایسه روش فراکتالی و رزتا در تخمین منحنی رطوبتی خاک. دانش آب و خاک. ۲۶: ۱۹۳-۲۰۵.

- of California, Riverside. 769-782.
- Patel, N and Rajput, T.B.S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*. 95: 1335-1345.
- Ritter, A., Hupet, F., Monuz-Carpena, R., Lambot, S. And Vanclooster, M. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Management*. 59: 77-96.
- Schaap, M.G and van Genuchten, M.Th. 2005. A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*. 5:27-34.
- Schaap, M.G., Leij, F.J and van Genuchten, M.Th. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251: 163-176.
- Simunek, J., Huang, K., Senjina, M and van Genuchten, M.Th. 1998. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variability-saturated media. Version 1.01GWMCTPS-70. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Simunek, J., Sejna, M and Van Genuchten, M.Th. 2006. The HYDRUS Soft ware package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44:892-898.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Buten, W and Sorooshian, S. 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*. 39.8:1-14.
- Wang, F.X., Kang, Y and Liu, S.P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. *Agricultural Water Management*. 79: 248-264.
- عقربه‌ای، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۲۰۹: ۱-۱۵.
- محمدی، ا و دلبری، م. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D. دانش آب و خاک. ۱:۲۵: ۶۷-۷۸.
- مهدیان، م.س و قهرمان، ب. ۱۳۹۲. رابطه تجربی بین شاخه خشک و تر منحنی رطوبتی خاک با استفاده از مدل ون گنوختن. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۴:۲۷: ۵۲۱-۵۲۹.
- Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J and Van Genuchten, M.Th. 2003a. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. *Transactions of the ASAE*. 46.4: 1097-1111.
- Abbasi, F., Simunek, J., Van Genuchten, M.Th., Feyen, J., Adamsen, F.J., Hunsaker, D.J., Strelkoff, T.S and Shouse, P. 2003b. Overland water flow and solute transport: Model development and field data analysis. *Irrigation and Drainage Engineering*. 129.2: 71-81.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 143-156.
- Cresswell, H.P., Coquet, Y., Bruan, A and McKenzie, N.J. 2006. The transferability of Australian pedotransfer functions for predicting water retention characteristics of French soils. *Soil Use Management*. 22: 62-70.
- Gimenez, D., Perfect, E., Rawls, W.J and Pachepsky, Y. 1997. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: A review. *Engineering Geology*. 48:161-183.
- Lambot, S., Javaux, M., Hupet, F and Vanclooster, M. 2002. A global multilevel coordinate search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*. 38.11: 1-15.
- Pan, L and Wu, L. 1999. Inverse estimation of hydraulic parameters by using simulated annealing and downhill simplex method. In Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Eds. Van Genuchten, M.Th., Leij, F. and Wu, L., University

Soil Moisture Estimation by Determining of van Genuchten Retention-Curve Coefficients in Drip Irrigation

H. Zare Abyaneh^{*1}, N. Mahdavi Moghadam² and H. Bagheri³

Received: May.09, 2016

Accepted: Jan.17, 2017

Abstract

The accuracy of two-dimensional soil moisture simulation was studied with using retention curve coefficients that was estimated by five models of Rosetta program and inverse solution and two-point methods in Hydrus-2D for a drip irrigation system. The high accuracy was for the two-point method with RMSE=0.06 and low accuracy was for model 5 of Rosetta with RMSE=0.87 in estimating retention-curve coefficients. In this regard, determined retention curves with inverse and two-point methods were very similar to measured retention curve with RMSE=0.008 cm³ cm⁻³ for inverse method and RMSE=0.022 for two-point method. Results of two-dimensional moisture simulation in soil profile also showed the accuracy of two-point method with RMSE=0.046 cm³ cm⁻³ and R²=0.97 which was higher than the accuracies of other methods, and models 1 and 2 of Rosetta program with RMSE=0.07 cm³ cm⁻³ had lower accuracy than the other methods. It is acceptable that the two-point had higher accuracy because of high accuracy in determining retention curve and its hydraulic coefficients. In addition, this method is recommendable from the standpoint of being costly, time-consuming and needing to two-point of retention curve in comparison to inverse method that needs more point and because of accuracy for simulating two-dimensional moisture distribution.

Keywords: Hydrus-2D, Inverse solution, Rosetta program, Soil hydraulic parameters, Two-point method

1-Associate Professor in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

2-M.Sc. in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

3-Ph.D. Candidate in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

(* -Corresponding author; Email: zare@basu.ac.ir)