تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۷ (ص ۲۴-۱۳) DOI: 10.22059/ijswr.2018.133364.667312

مقایسه عملکرد مدل‌های هیدرولیکی مختلف و ارائه مدل ترکیبی BMA به‌منظور شبیه‌سازی حرکت آب در خاک

فرید فیض‌اله‌پور[۱]، سینا بشارت[۲]، افشین خورسند*[۳]
۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه
۲. استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه
۳. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه
(تاریخ دریافت: ۳/ ۶/ ۱۳۹۵- تاریخ بازنگری: ۲۳/ ۵/ ۱۳۹۶- تاریخ پذیرش: ۲۹/ ۵/ ۱۳۹۶)

چکیده

تاکنون مدل‌های هیدرولیکی مختلفی برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع در خاک ارائه شده است، اما در تحقیقات اندکی توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی نحوه حرکت آب در خاک ارزیابی شده است. لذا در مطالعه حاضر، عملکرد ۵ مدل هیدرولیکی مختلف ارائه شده در مدل HYDRUS-2D ، از جمله مدل‌های ون‌گنوختن-معلم، ون‌گنوختن اصلاح شده، کوسوگی، بروکس-کوری و دورنر در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور بهبود نتایج بدست آمده، یک مدل ترکیبی با استفاده از روش میانگین‌گیری بیزی (BMA) بر مبنای وزن‌دهی به عملکرد مدل‌های هیدرولیکی مذکور ارائه شده است. به منظور بررسی عملکرد مدل‌های مختلف، آزمایشی با روش آبیاری قطره‌ای T-Tape در مزرعه‌ای با خاک لوم رسی انجام گرفت. مقایسه نتایج مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک در زمان‌های آبیاری ۸ و ۲۴ ساعت و با استفاده از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده انجام گرفت. براساس نتایج بدست آمده، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده‌ی پیش‌بینی رطوبت حجمی خاک برای زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت به ترتیب در محدوده ۲۰ تا ۲۹ و ۲۶ تا ۳۹ درصد و مجذور میانگین مربعات خطا برای زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت به ترتیب در محدوده ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ و ۰/۰۵ تا ۰/۰۹ (cm^3cm^{-3}) بدست آمد. مقدار متوسط ضریب تعیین برای زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت به ترتیب، ۰/۹۳ و ۰/۸۹ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای سطحی، پارامترهای هیدرولیکی خاک، مدل هایدروس، مدل میانگین‌گیری بیزی

مقدمه

پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی نقش مهمی در حرکت آب‌های زیرزمینی، جریان آب در محیط‌های متخلخل، انتقال مواد آلاینده و طراحی سیستم‌های زهکشی دارد. ضرایب هیدرولیکی در محیط اشباع به بالاترین مقدار خود رسیده و در محیط غیراشباع با کاهش رطوبت حجمی، به شدت کاهش می‌یابد. در حالت غیراشباع، اندازه‌گیری این ضرایب خیلی مشکل و مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است. روش‌های صحرایی عموما با محدودیت‌هایی مانند تعداد تکرارهای آزمایش، صرف وقت زیاد و نامعین بودن مرزهای نمونه خاک، روبه‌رو هستند و از سوی دیگر، اندازه‌گیری آزمایشگاهی عمدتا در رطوبت‌های نزدیک اشباع امکان‌پذیر است و نتایج به دست آمده اکثرا مربوط به خاک‌های دست‌خورده است؛ بنابراین محققان برای تعیین ضرایب هیدرولیکی از مدل‌ها و یا روابط تجربی استفاده می‌کنند. مدل HYDRUS یکی از مدل‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که در آزمایشگاه شوری آمریکا ارائه شده است (Simunek *et al*, 1998). این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است. این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و برای تخمین مشخصات هیدرولیکی خاک، پنج مدل هیدرولیکی مختلف از جمله مدل های ون‌گنوختن-معلم، ون‌گنوختن-معلم اصلاح شده، بروکس-کوری، کوسوگی و دورنر ارائه شده است (Simunek *et al*, 1999).

تاکنون از مدل HYDRUS در مطالعات بسیاری همچون بررسی تاثیر روش‌های مختلف آبیاری و تغییرات مکانی هدایت

* نویسنده مسئول: af_kh38@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

هیدرولیکی اشباع بر انتقال املاح در آبیاری جویچه‌ای (Wang *et al*, 1997)، تحلیل رطوبت و شوری خاک (Forkutsa *et al*, 2009; Simunek *et al*, 2008; Xie *et al*, 2011)، شبیه‌سازی آبشویی آب و نیترات در مزارع ذرت و کلزا تحت آبیاری جویچه‌ای مداوم و یک در میان (Tafteh and Sepaskhah, 2012)، بررسی توزیع رطوبت در خاک اطراف یک قطره‌چکان (Nagavi *et al*, 2012; El-nesr *et al*, 2014)، بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای در خاک دو لایه (Khanjani and Dalir hasannia, 2014) و جذب آب ریشه (Vrugt *et al*, 2001) استفاده شده است. نتایج اغلب این تحقیقات نشان داده است که مدل HYDRUS توانسته نحوه توزیع آب و املاح در خاک را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی به خوبی توصیف نماید؛ اما توجه به این نکته لازم است که اطلاع از مشخصات هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح بسیار ضروری است. Pouryazdankhah and Khaledian (2013) با بررسی اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D به این نتیجه رسیدند که در شبیه‌سازی با این مدل، لحاظ نمودن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک، نقش مهمی در بهبود نتایج شبیه‌سازی ایفا می‌کند، به ویژه این تغییرات بعد از اولین آبیاری بسیار مشهود می‌باشد.

حرکت آب در خاک، پدیده‌ای پیچیده و غیرخطی است که طیف وسیعی از عوامل محیطی بر آن تاثیرگذار هستند. همواره به دلیل وجود عدم قطعیت در اندازه‌گیری داده‌ها و عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های هیدرولیکی مختلف، نتایج حاصل نیز دارای عدم قطعیت می‌باشند. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین عدم قطعیت خروجی‌های مختلف تحت روش های گوناگون، روش میانگین‌گیری بیزی (BMA[1]) است. Ajami *et al*(2006) برای تحلیل عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب از این روش استفاده کردند. آنها با استفاده ترکیبی از خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی تواستند عملکرد بهتری نسبت به استفاده از یک مدل تنها بدست آورند. در مطالعه‌ای دیگر، Ajami *et al* (2007) با استفاده از ترکیب سه سناریو ناشی از تغییر ساختار مدل هیدرولوژیکی، توانستند باند عدم قطعیت آن را بهبود ببخشند. علاوه بر این، Hemri (2012) نیز برای تعیین عدم قطعیت رواناب تولید شده در رودخانه آلپ از روش BMA استفاده کرد. با توجه به مطالعات انجام شده، تاکنون تحقیقی در زمینه بررسی کارایی و مقایسه مدل‌های هیدرولیکی ارائه شده در مدل HYDRUS-2D در پیش‌بینی حرکت آب در خاک صورت نگرفته است. لذا هدف از تحقیق حاضر، مقایسه داده‌های رطوبت حجمی مزرعه‌ای با داده‌های شبیه‌سازی شده آبیاری قطره‌ای سطحی، با استفاده از ۵ مدل هیدرولیکی ون‌گنوختن-معلم، ون‌گنوختن-معلم اصلاح شده، بروکس-کوری، کوسوگی و دورنر موجود در مدل HYDRUS-2D بوده است. هم‌چنین برای نخستین بار در این مطالعه یک مدل ترکیبی با استفاده از روش BMA با هدف بهبود شبیه‌سازی حرکت آب در خاک ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های میدانی

آزمایش‌های میدانی بر روی خاکی با بافت لوم رسی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه انجام گرفت. خاک محل آزمایش تا عمق ۸۰ سانتی‌متری، جهت یکنواختی بیشتر شخم زده شد و بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین گردید. نتایج خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است (Khanmohammadi *et al*, 2012). در این تحقیق، از روش آبیاری قطره‌ای سطحی استفاده گردید. قطر لوله‌ها ۲ سانتی‌متر و فاصله قطره‌چکان‌ها روی لوله ۱ متر بود. زمان‌های آبیاری بر اساس ساعات کارکرد نرمال در آبیاری قطره‌ای سطحی ۸ و ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. دبی قطره‌چکان‌ها در طول آزمایش ثابت و برابر با ۴ لیتر در ساعت در نظر گرفته شد. بر اساس دبی قطره‌چکان‌ها و زمان کاربرد، حجم آب کاربردی به ترتیب ۳۲ و ۹۶ لیتر بدست آمد. برای تعیین میزان رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج Wet استفاده گردید. قرائت رطوبت‌ها در فواصل افقی ۱۰ سانتی‌متر و فواصل عمودی ۴ سانتی‌متر انجام گرفت.

شبیه سازی جریان آب در خاک

با توجه به عدم هم‌پوشانی قطره‌چکان‌ها روند حرکت آب در طول نفوذ و توزیع، به صورت متقارن در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی نفوذ و توزیع رطوبت خاک، مدل HYDRUS-2D مورد استفاده قرار گرفت (Simunek *et al*, 2006). معادله‌ی حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتروپیک خاک، معادله‌ی ریچاردز به صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۱)

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

که در آن؛ θ رطوبت حجمی آب خاک (L^3L^{-3})، h پتانسیل فشاری آب (L)، t زمان (T)، r محور افقی، z محور عمودی (رو به بالا، مثبت (Cote *et al*, 2003)) و K(h) هدایت

1- Beyesian Model Averaging

Archive of SID

www.SID.ir

هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1}) می‌باشد. رطوبت اندازه‌گیری‌شده خاک قبل از انجام آزمایش، به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. شرط مرزی بالادست در زمان آبیاری بصورت قطره چکان با جریان ثابت و پس از اتمام آبیاری، قطره چکان با جریان صفر و سطح خاک به عنوان شرایط مرزی بالادست در نظر گرفته شد که برابر مقدار تبخیر از سطح خاک می‌باشد. زهکشی آزاد برای حرکت آب در مرز پایین‌دست در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مزرعه‌ی آزمایشی.

عمق (cm)	بافت خاک	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	چگالی ظاهری (gcm^{-3})	رطوبت حجمی خاک (٪)	
						مکش ۳۳ (kpa)	مکش ۱۵۰۰ (kpa)
۰-۸۰	لوم رسی	۵۴/۸	۳۹/۶	۵/۶	۱/۵۵	۲۸	۵/۴

تعیین مشخصات هیدرولیکی خاک غیراشباع

مشخصات هیدرولیکی خاک در حالت غیراشباع، K(h) و Θ(h)، دارای توابع به شدت غیرخطی با بار فشاری می‌باشند. در مدل HYDRUS، پنج مدل تحلیلی مختلف به صورت زیر برای تخمین مشخصات هیدرولیکی خاک ارائه شده است.

مدل ون‌گنوختن- معلم (VM)

van Genuchten (1980) از مدل آماری توزیع اندازه-منافذ Mualem (1976) برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع استفاده کرد (El-nesr *et al*, 2014):

(رابطه ۲)

$$\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} \quad , \quad m=1-\frac{1}{n} \quad , \quad n\rangle 1$$

(رابطه ۳)

$$K(h)=K_s\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^l\left[1-\left(1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$$

که در آن؛ θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقیمانده در خاک (L^3L^{-3})، l پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک، h مکش ماتریک (L)، n و m پارامترهای شکل منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، α عکس مقدار ورود هوا (L^{-1}) و k_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (LT^{-1}) می‌باشند.

مدل ون گنوختن- معلم اصلاح شده (MVM)

van Genuchten (1980) معادلات Vogel and Cislerova (1988) را اصلاح کردند و مدلی با انعطاف پذیری بالا در توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک در نقاط نزدیک به رطوبت اشباع ارائه کردند. توابع K(h) و Θ(h) توسط Vogel and Cislerova (1988) بصورت زیر ارائه شده است:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_a+\frac{\theta_m-\theta_a}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<h_s\\ \theta_s & h\geq h_s\end{cases}$$

(رابطه ۴)

(رابطه ۵)

$$K(h)=\begin{cases}K_sK_r(h) & h\leq h_s\\ K_k+\frac{(h-h_k)(K_s-K_k)}{h_s-h_k} & h_k<h<h_s\\ K_s & h\geq h_s\end{cases}$$

$$K_r=\frac{K_k}{K_s}\left(\frac{S_e}{S_{ek}}\right)^{1/2}\left[\frac{F(\theta_r)-F(\theta)}{F(\theta_r)-F(\theta_k)}\right]^2$$

(رابطه ۶)

$$F(\theta)=\left[1-\left(\frac{\theta-\theta_a}{\theta_m-\theta_a}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^m$$

(رابطه ۷)

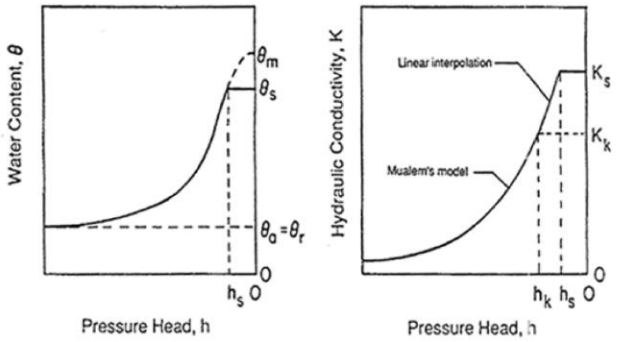
$$S_{ek}=\frac{\theta_k-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$$

(رابطه ۸)

در معادلات بالا، با جایگزینی پارامتر Θ_s تابع نگهداشت ون‌گنوختن با یک پارامتر غیر واقعی Θ_m (اندکی بزرگتر از Θ_s)، امکان یک حداقل ارتفاع کاپیلاری، h_s در نظر گرفته شده است (شکل ۱). اگرچه تغییر Θ_m به Θs تغییر چندانی در منحنی نگهداشت آب خاک نداشته است، اما تاثیر آن در شکل و مقدار تابع هدایت هیدرولیکی، به ویژه خاک‌های ریز بافت قابل توجه می‌باشد. هم‌چنین برای افزایش انعطاف‌پذیری معادلات تحلیلی، پارامتر Θ_r در تابع نگهداشت با پارامتر غیر واقعی Θa ($\Theta r\geq\Theta a$) جایگزین شده است. در معادله (۶)، برای مقادیر رطوبت یکسان یا کمتر از رطوبت اشباع، Θ_k ($\Theta s\geq\Theta k$) هدایت هیدرولیکی پیش بینی شده با هدایت هیدرولیکی اندازه گیری شده مطابقت داده شده است، به طوری که $Kk=K(\Theta k)$ و $K_k\leq K_s$. در صورتی که $\Theta a=\Theta r$، $\Theta m=\Theta k=\Theta s$ و $K_k=K_s$، توابع هیدرولیکی Vogel and Cislerova (1988) به معادلات اصلی van Genuchten (1980) تنزل پیدا خواهند کرد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- توابع نگهداشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی ارائه شده در معادلات (۴) و (۵)

مدل کوسوگی (K)

Kosugi (1996) یک مدل توزیع لوگ-نرمال به صورت زیر ارائه کرده است:

(رابطه ۹)

$$S_e = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left\{\frac{\ln(\frac{h}{\alpha})}{\sqrt{2}n}\right\} & h<0 \\ 1 & h\geq 0 \end{cases}$$

با استفاده از مدل معلم، مدل هدایت هیدرولیکی به صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۱۰)

$$K = \begin{cases} K_s S_e^{1/2}\left\{\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left[\frac{\ln(\frac{h}{\alpha})}{\sqrt{2}n}+\frac{n}{\sqrt{2}}\right]\right\}^2 & h<0 \\ K_s & h\geq 0 \end{cases}$$

مدل بروکس و کوری (BK)

توابع نگهداشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی خاک ارائه شده توسط Brooks and Corey (1964) به صورت زیر است:

(رابطه ۱۱)

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h<-1/\alpha \\ 1 & h\geq -1/\alpha \end{cases}$$

(رابطه ۱۲)

$$K = K_s S_e^{2/(n+l+2)}$$

مدل دورنر (D)

Durner (1994) محیط متخلخل را به دو ناحیه متداخل تقسیم کرد و برای تخمین مشخصات هیدرولیکی هر کدام از این نواحی، از معادله ون‌گنوختن-معلم استفاده کرد:

(رابطه ۱۳)

$$S_e = w_1[1+(\alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1} + w_2[1+(\alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2}$$

با ترکیب این معادله نگهداشت و مدل توزیع اندازه-منافذ Mualem (1976) رابطه زیر حاصل می‌شود:

(رابطه ۱۴)

K(s_e) = K_s ((w_1 S_(e_1) + w_2 S_(e_2))^l (w_1 α_1 [1 − ⟦(1 − S_(e_1)^(1/m_1))⟧^(m_1)] + w_2 α_2 [1 − ⟦(1 − S_(e_2)^(1/m_2))⟧^(m_2)])^2)/(w_1 α_1 + w_2 α_2)^2

به طوری که w_i بیانگر فاکتور وزنی برای دو ناحیه متداخل و α_i، n_i، m_i و l پارامترهای تجربی برای توابع هیدرولیکی (i=1,2) هستند. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی خاک برای مدل‌های مختلف، با استفاده از مقادیر پیشنهادی مدل Rosetta (Schaap *et al*, 2001) انجام گرفت (جدول ۲). مزیت روش مدل‌سازی معکوس در آن است که با بهره‌گیری از رطوبت خاک در شرایطی مشابه با شرایط مزرعه که اغلب مواقع امکان‌پذیر است، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برآورده می‌شود (Abbasi, 2009).

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی خاک برای مدل‌های مختلف.

مدل	θ_s (cm^3/cm^3)	θ_r (cm^3/cm^3)	K_s (cm/hr)	n (-)	α (1/cm)	L (-)	θ_m (cm^3/cm^3)	θ_a (cm^3/cm^3)	θ_k (cm^3/cm^3)	K_s (cm/hr)	w_2	α_2	n_2 (-)
VM	۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۰/۸۵	۱/۲	۰/۰۰۲۵	۰/۵	-	-	-	-	-	-	-
MVM	۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۰/۸۵	۱/۲	۰/۰۰۲۵	۰/۵	۰/۳۵	۰/۰۲۹	۰/۳۴	۰/۸۳	-	-	-
K	۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۰/۸۵	۱/۲	۰/۰۰۱	۰/۵	-	-	-	-	-	-	-
BK	۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۰/۸۵	۱/۳	۰/۰۰۶	۰/۵	-	-	-	-	-	-	-
D	۰/۳۴۷	۰/۰۲۹	۰/۸۵	۱/۲	۰/۰۰۲۵	۰/۵	-	-	-	-	۰/۵	۰/۰۰۶	۱/۳

ترکیب مدل‌های هیدرولیکی به روش میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA)

در شبیه‌سازی‌های حرکت آب در خاک با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی مختلف، عدم قطعیت موجود در فرآیندهای مختلف (عدم قطعیت در داده‌های ورودی، پارامترهای موجود در مدل-سازی و فرآیندهای در نظر گرفته شده)، باعث به وجود آمدن چندین خروجی در یک منطقه و در یک زمان معین شده و در نتیجه باعث ایجاد عدم قطعیت در نتایج می‌گردد. در اغلب موارد

Archive of SID

www.SID.ir

سعی شده است که با استفاده از مقایسه آماری یکی از این مدل-ها انتخاب شده و شبیه‌سازی داده‌ها با استفاده از آنها صورت گیرد که این امر می‌تواند با توجه به احتمال وقوع سایر سناریوها، باعث ایجاد خطا در نتایج شود. از این‌رو در نظر گرفتن نتایج مدل‌ها و سناریوهای ممکن در شبیه‌سازی می‌تواند دقت آن را بالا برده و اعتمادپذیری به پیش‌بینی‌های مدل را افزایش دهد. یکی از متداول‌ترین این روش‌ها برای ترکیب نتایج مدل‌ها و تحلیل عدم قطعیت آنها، روش BMA می‌باشد.

در روش BMA فرض می‌شود که تمامی مدل‌ها مفید بوده و در شبیه‌سازی، قابلیت استفاده را دارند ولی درجه اعتماد به آنها متفاوت می‌باشد که توسط وزن هر یک از آنها معلوم می‌گردد. وزن هر یک از شبیه‌سازی‌ها و واریانس مربوط به تابع توزیع آنها از طریق تابع توزیع پسین هر کدام تعیین می‌شود. سپس با استفاده از وزن‌های تعیین شده، یکی از مدل‌های شبیه‌سازی انتخاب و با استفاده از تابع توزیع آن عددی تصادفی انتخاب می-شود. در این روش مقادیر مورد نیاز جهت تخمین باند عدم قطعیت، از طریق متوسط‌گیری وزنی مقادیر شبیه‌سازی‌ها محاسبه می‌شوند. وزن هر یک از این شبیه‌سازی‌ها بستگی به میزان همبستگی آنها با داده‌های مشاهداتی دارند که توسط احتمالات پسین هر مدل اندازه‌گیری می‌شوند. اگر فرض شود که f1، f2، ... و fk مدل‌های شبیه‌سازی موجود (سناریوهای شبیه‌سازی شده) باشند و تابع توزیع هرکدام از آنها به صورت $g_k(y \mid f_k)$ باشد، آنگاه مدل پیش‌بینی کننده BMA مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$P(y \mid f1,...fk) = \sum_{k=1}^{k} w_k g_k(y \mid f_k) \qquad \text{(رابطه ۱۵)}$$

در رابطه بالا، W_K احتمال انتخاب شبیه‌سازی k به عنوان بهترین شبیه‌سازی می‌باشد که بر اساس عملکرد شبیه‌سازی kام تعیین می‌گردد. این مقادیر خاصیت احتمالی دارند، به طوری که هر یک از آنها غیر منفی بوده و مجموع تمامی آنها برابر با ۱ می‌باشد ($\sum_{k=1}^{k} w_k = 1$). در این مطالعه به منظور ترکیب مدل‌های هیدرولیکی مختلف، از بسته Ensemble BMA در نرم‌افزار R استفاده شد.

شاخص های ارزیابی عملکرد مدل ها

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل با نتایج اندازه‌گیری در سطح مزرعه از یکسری شاخص‌های ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار نش ساتکلیف (NS)، ضریب باقیمانده (CRM) (Moriasi *et al*, 2007) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید (روابط ۱۶ الی ۱۹):

$$NRMSE = \frac{1}{\overline{O}} \times \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۶)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2} \qquad \text{(رابطه ۱۷)}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \qquad \text{(رابطه ۱۸)}$$

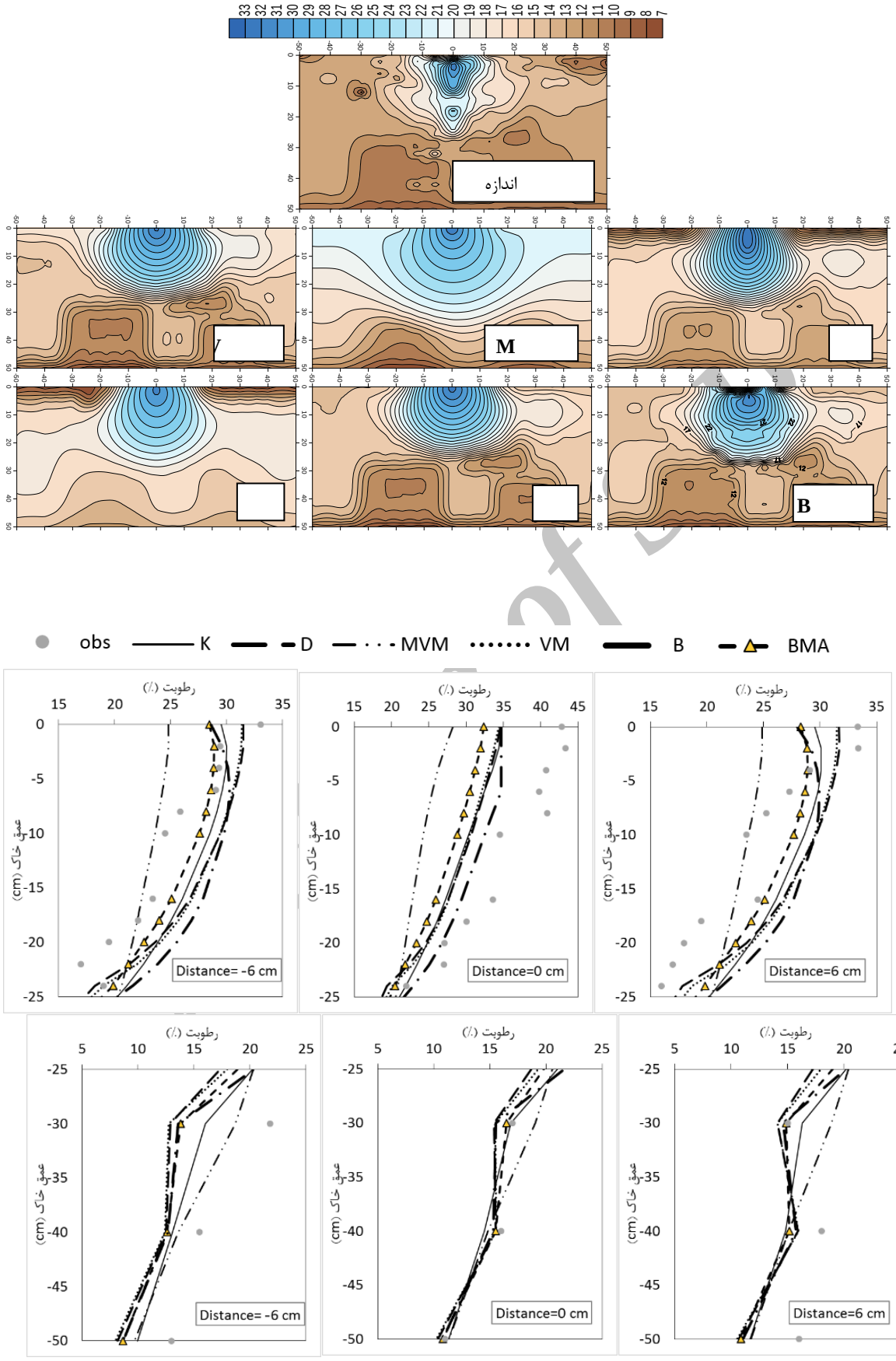
$$CRM = 1 - \left(\sum_{i=1}^{n} S_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} O_i\right) \qquad \text{(رابطه ۱۹)}$$

که در آن، Si مقادیر پیش‌بینی شده، Oi مقادیر اندازه-گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. NRMSE در بازه ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪ به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰٪ نشان دهنده عدم اطمینان از مدل می‌باشد. شاخص RMSE نشان دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد، این شاخص هر چه به سمت عدد صفر میل کند نشان از تخمین بهتر مدل خواهد بود. آماره CRM نشانگر تمایل مدل برای بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. ضریب تعیین از صفر تا ۱ متغیر و مقدار کارایی نش - ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر می‌باشد (Sing *et al*, 2008; Eitzinger *et al*, 2004).

نتایج و بحث

نتایج توزیع رطوبت خاک برای داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت پس از آبیاری به ترتیب در شکل-های ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق تر عملکرد مدل های مختلف در محل قطره چکان، نمودار تغییرات رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در فواصل ۶-، صفر و ۶ سانتی متری از قطره چکان مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، میزان رطوبت حجمی بدست آمده از مدل های مختلف در ۸ ساعت پس از آبیاری بین ۷ تا ۳۳ درصد متغیر بوده است. بطوریکه بیشترین رطوبت حجمی در محل قطره-چکان بوده و با گذشت زمان به نقطه اشباع (۳۴/۷ درصد) نزدیک شده است. با توجه به شکل ۲، پیشروی آب در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس-کوری، کوسوگی، دورنر و مدل ترکیبی BMA نشان می‌دهد که در داده‌های شبیه-سازی عمق پیشروی رطوبت منظم‌تر و در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری رطوبت، عمق بیشتری داشته‌اند. پیشروی آب در عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر برای مدل MVM نشان می‌دهد که عمق پیشروی رطوبت خیلی منظم نمی‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در زمان ۸ ساعت پس از آبیاری قطره‌ای سطحی برای ۵ مدل موجود در HYDRUS-2D و مدل BMA.

www.SID.ir

مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار دو مدل HYDRUS-2D و BMA در پیش‌بینی رطوبت حجمی برای زمان ۸ ساعت، در جدول ۳ آورده شده است. مقدار NRMSE در زمان ۸ ساعت برای ۵ مدل VM، MVM، BK، K و D بیشتر از ۲۰ درصد (در محدوده‌ی ۲۲ تا ۲۹ درصد) به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی متوسط می‌باشد. هم‌چنین مقدار خطای نرمال‌شده توسط مدل ترکیبی BMA، ۲۰/۳۶ درصد بدست آمد که مقدار عددی مدل BMA از خطای ۵ مدل هیدرولیکی HYDRUS-2D کمتر می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار خطای نرمال شده در زمان ۸ ساعت برای مدل BMA و K بدست آمد که به ترتیب برابر با ۲۰/۳۶ و ۲۸/۶۳ درصد می‌باشد (جدول ۳). مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در زمان ۸ ساعت برای ۵ مدل HYDRUS-2D کمتر از ۰/۰۶ (در محدوده‌ی ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ cm^3cm^{-3}) به دست آمد که نزدیک به عدد صفر می‌باشد. مقدار خطای RMSE برای مدل ترکیبی BMA، ۰/۰۴۲ (cm^3cm^{-3}) بدست آمد که از مقدار عددی خطای ۵ مدل HYDRUS-2D همانند رطوبت حجمی زمان ۴ ساعت کمتر می‌باشد (جدول ۳). هم‌چنین با توجه به جدول ۳، کمترین و بیشترین مقدار خطای RMSE برای مدل BMA و مدل‌های MVM و K (دارای خطای یکسان با مقدار ۰/۰۵۸۹ cm^3cm^{-3}) بدست آمد. با توجه به جدول ۳، مقدار آماره CRM در زمان ۸ ساعت برای مدل‌های VM، MVM و D، منفی به دست آمد که نشان داد، نرم‌افزار تمایل به بیش‌برآورد دارد، هم‌چنین مقدار این آماره برای دو مدل BK و K مثبت بدست آمد که نشان داد نرم‌افزار تمایل به کم‌برآورد دارد. مقدار آماره CRM برای مدل ترکیبی BMA منفی (۰/۰۲۴-) بدست آمد که نشان‌دهنده‌ی بیش‌برآوردی مدل BMA می‌باشد. شاخص نش - ساتکلیف برای زمان ۸ ساعت نزدیک به یک بوده و بالای ۹۷ درصد محاسبه گردید (جدول ۳). هم‌چنین بیشترین مقدار نش - ساتکلیف برای مدل ترکیبی BMA بدست آمد که برابر با ۹۹ درصد می‌باشد. با توجه به جدول ۳، ضریب تعیین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی رطوبت در زمان ۸ ساعت خیلی نزدیک به یک بوده و بالای ۹۰ درصد (در محدوده‌ی ۹۰ تا ۹۶ درصد برای n=۱۴) محاسبه گردید که بیشترین مقدار همبستگی برای مدل ترکیبی BMA (۹۵/۴ درصد) بدست آمد.

جدول ۳- پارامترهای آماری ارزیابی مدل HYDRUS-2D و BMA برای رطوبت حجمی در زمان ۸ ساعت پس از آبیاری.

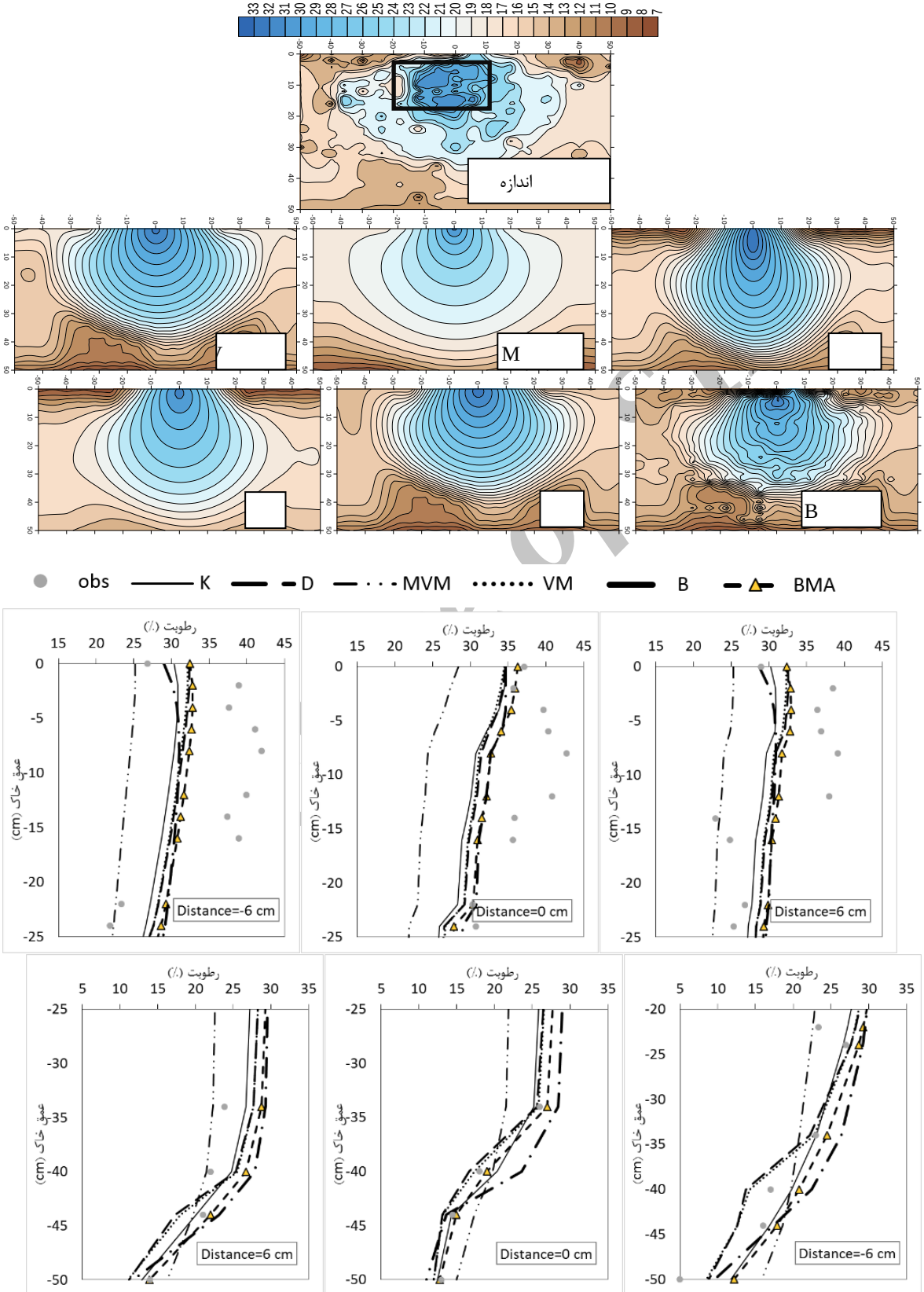
مدل	R^2 (-)	CRM (-)	NS (-)	RMSE (cm^3cm^{-3})	NRMSE (%)
VM	۰/۹۴۱	-۰/۱۱۷	۰/۹۸۲	۰/۰۵۲۶	۲۸/۶۱۴
MVM	۰/۹۰۸	-۰/۰۲۴	۰/۹۷۷	۰/۰۵۸۹	۲۵/۵۴۴
BK	۰/۹۴۲	۰/۰۲۸	۰/۹۸۵	۰/۰۴۷۲	۲۲/۸۸۷
K	۰/۹۱۳	۰/۱۰۹	۰/۹۷۷	۰/۰۵۸۹	۲۸/۶۲۵
D	۰/۹۵۱	-۰/۰۸۰	۰/۹۸۶	۰/۰۴۶۱	۲۲/۳۷۱
BMA	۰/۹۵۴	-۰/۰۲۴	۰/۹۸۸	۰/۰۴۱۹	۲۰/۳۵۹

با توجه به شکل ۳ حداکثر جبهه‌ی رطوبتی مربوط به آبیاری پس از ۲۴ ساعت می‌باشد. با توجه به شکل ۳ و کادر مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر رطوبت پس از ۲۴ ساعت آبیاری در داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به محل قطره‌چکان‌ها نیست بلکه مربوط به عمق پایین‌تر قطره‌چکان می‌باشد که مربوط به عمق ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر و فاصله‌ی افقی ۱۰ تا ۱۰- سانتی‌متر می‌باشد. در صورتی که در داده‌های شبیه‌سازی برای ۶ مدل این حداکثر رطوبت در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر و فاصله افقی ۵- تا ۵ سانتی‌متر قرار دارد. مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل‌ها برای زمان ۲۴ ساعت، در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، مقدار NRMSE در زمان ۲۴ ساعت برای دو مدل MVM و K بیشتر از ۳۰ درصد (در محدوده‌ی ۳۱ تا ۳۹ درصد) به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی توسط این دو مدل مناسب نبوده و در زمان ۲۴ ساعت برای این دو مدل، عدم اطمینان از نتایج مدل HYDRUS-2D وجود دارد. مقدار خطای نرمال شده برای سه مدل VM، BK و D بیشتر از ۲۰ درصد (در محدوده‌ی ۲۷ تا ۳۰ درصد) به دست آمد که نشان می‌دهد مدل‌سازی رطوبت HYDRUS-2D توسط این سه مدل متوسط می‌باشد. هم‌چنین مقدار خطای نرمال شده توسط مدل ترکیبی BMA، ۲۶/۵۰ درصد بدست آمد که همانند زمان ۸ ساعت مقدار این خطا در مدل BMA نسبت به ۵ مدل موجود در نرم-

Archive of SID

www.SID.ir

افزار HYDRUS-2D کمتر می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار خطای نرمال‌شده در زمان ۲۴ ساعت برای مدل ترکیبی BMA و MVM بدست آمد که به ترتیب برابر با ۲۶/۵۰ و ۳۸/۲۹ درصد می‌باشد (جدول ۴).



شکل ۳- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در زمان ۲۴ ساعت پس از آبیاری قطره‌ای سطحی برای ۵ مدل موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D و مدل BMA.

www.SID.ir

مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در زمان ۲۴ ساعت برای ۵ مدل HYDRUS-2D کمتر از ۰/۰۹ (در محدوده‌ی ۰/۰۶ تا ۰/۰۹ cm^3cm^{-3}) به دست آمد که نزدیک به عدد صفر می‌باشد، لازم به ذکر است که مقدار این خطا در زمان ۲۴ ساعت بیشتر از خطای رطوبت حجمی بدست آمده در زمان ۸ ساعت می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار خطای RMSE برای مدل BMA و مدل MVM بدست آمد. مقدار خطای RMSE برای مدل ترکیبی BMA، ۰/۰۵۹ (cm^3cm^{-3}) بدست آمد که از مقدار عددی خطای ۵ مدل HYDRUS-2D (همانند رطوبت حجمی زمان ۸ ساعت) کمتر می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴- پارامترهای آماری ارزیابی مدل HYDRUS-2D و BMA برای رطوبت حجمی در زمان ۸ ساعت پس از آبیاری.

مدل	R^2 (-)	CRM (-)	NS (-)	RMSE (cm^3cm^{-3})	NRMSE (%)
VM	۰/۸۹۴	-۰/۰۴۵	۰/۹۵۳	۰/۰۶۷۳	۲۹/۸۹۴
MVM	۰/۸۳۳	۰/۰۶۱	۰/۹۲۴	۰/۰۸۶۲	۳۸/۲۸۶
BK	۰/۹۱۱	۰/۰۸۰	۰/۹۵۸	۰/۰۶۴۱	۲۸/۴۸۳
K	۰/۹۰۶	۰/۱۴۸	۰/۹۴۹	۰/۰۷۰۱	۳۱/۱۲۲
D	۰/۹۱۰	-۰/۰۱۲	۰/۹۶۱	۰/۰۶۱۶	۲۷/۳۶۹
BMA	۰/۹۱۶	-۰/۰۱۰	۰/۹۶۳	۰/۰۵۹۷	۲۶/۵۰۱

مقدار آماره CRM در زمان ۲۴ ساعت برای مدل‌های VM و D، منفی به دست آمد که نشان داد، نرم‌افزار تمایل به بیش-برآورد دارد، هم‌چنین مقدار این آماره برای سه مدل MVM، BK و K مثبت بدست آمد که نشان داد نرم‌افزار تمایل به کم-برآورد دارد و رطوبت را بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای پیش‌بینی می‌کند. مقدار آماره CRM برای مدل ترکیبی BMA منفی (۰/۰۱-) بدست آمد که نشان‌دهنده‌ی بیش‌برآوردی مدل BMA می‌باشد (جدول ۴). شاخص نش - ساتکلیف برای زمان ۲۴ ساعت نزدیک به یک بوده و بالای ۹۲ درصد محاسبه گردید (جدول ۴). قابل ذکر است که مقدار عددی شاخص نش - ساتکلیف در زمان ۲۴ ساعت نسبت به زمان ۸ ساعت کمتر می-باشد. هم‌چنین نزدیک‌ترین عدد به یک مربوط به مقدار نش - ساتکلیف (۹۶ درصد) مدل ترکیبی BMA می‌باشد. با توجه به جدول ۴، ضریب تبیین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی رطوبت در زمان ۲۴ ساعت نزدیک به یک بوده و بالای ۸۰ درصد (در محدوده‌ی ۸۳ تا ۹۲ درصد برای n=۱۴) محاسبه گردید، لازم به ذکر است که ضریب تعیین در زمان ۲۴ ساعت نسبت به زمان ۸ ساعت کمتر شده است و در این زمان، بیشترین مقدار همبستگی برای مدل ترکیبی BMA (۹۱/۶ درصد) بدست آمد.

در تحقیق Nagavi *et al* (2012) میزان توانایی مدل شبیه‌ساز HYDRUS-2D جهت تخمین توزیع رطوبت در خاک اطراف قطره‌چکان بررسی گردید. حداکثر مقدار خطا RMSE به ازای زمان ۱/۵ ساعت از شروع آبیاری در عمق ۳۰ سانتی‌متری در محل نصب قطره‌چکان، ۰/۰۵ $m^3 m^{-3}$ بدست آمد. همچنین برآوردها با سپری شدن ۷۲ ساعت از اتمام آبیاری و میانگین خطای ۰/۰۰۲ $m^3 m^{-3}$ =RMSE به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شد. در تحقیق Khanmohammadi *et al* (2012) پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصله نشان داد که HYDRUS-2D توانایی بالایی در پیش‌بینی توزیع مقدار آب خاک دارد (ضریب تعیین بین ۰/۹۱ تا ۰/۹۶ و بازه RMSE بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ $m^3 m^{-3}$ برای سه آزمایش مختلف با زمان‌های متفاوت).

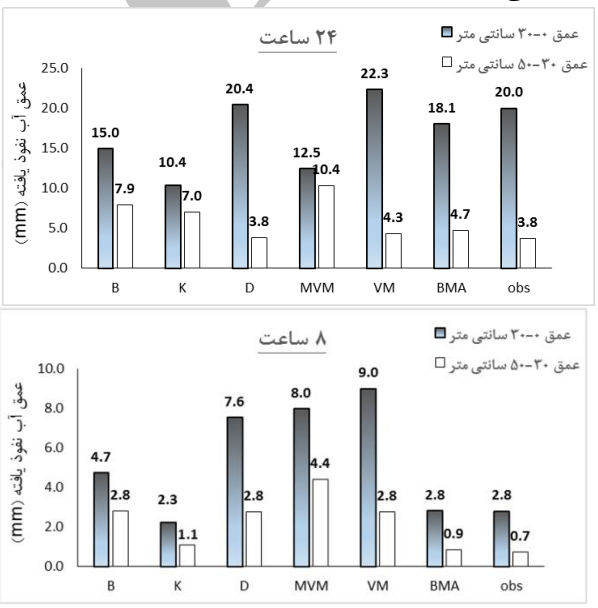
در تحقیقی دیگر، Khorami *et al* (2013) بیان کردند که مدل عددی HYDRUS 2D/3D با متوسط RMSE ۸ درصد در دو جهت افقی و عمودی حرکت آب در خاک، در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی عملکرد بسیار خوبی دارد. Skaggs *et al* (2004) و Kandelous and Simunek (2010) جهت بررسی میزان دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل HYDRUS-2D از مقادیر درصدهای رطوبت اندازه‌گیری شده استفاده کردند. مقدار خطای RMSE از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۴ برای شرایط آزمایش آنها تغییر کرد. آنها معتقد بودند که خطاهای ایجاد شده ناچیز بوده و می‌توان از مدل در شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف قطره-چکان استفاده کرد.

در شکل ۵، مقادیر عمق آب نفوذی برآورد شده توسط مدل‌های VM، MVM، B، K و D و مدل BMA در مدت زمان ۸ و ۲۴ ساعت ارائه شده است. با توجه به این شکل، در زمان ۸ ساعت، عمق آب نفوذ یافته در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در مدل-های VM، MVM و D نسبت به دو مدل K و B بیشتر می‌باشد،

Archive of SID

www.SID.ir

بیشترین و کمترین عمق آب نفوذی مربوط به مدل‌های VM و K بوده که به ترتیب مقادیرشان ۹/۰ و ۲/۳ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متر، بیشترین عمق آب نفوذی مربوط به مدل MVM (۴/۴ میلی‌متر) می‌باشد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد عمق آب نفوذی برای داده‌های مشاهداتی در اعماق ۳۰-۰ و ۵۰-۳۰ سانتی‌متری به ترتیب ۲/۸ و ۰/۷ میلی‌متر بدست آمده که خیلی نزدیک به مقادیر مدل BMA (اعماق ۳۰-۰ و ۵۰-۳۰ سانتی‌متری به ترتیب ۲/۸ و ۰/۹ میلی‌متر) می‌باشد، لذا مدل BMA نسبت به ۵ مدل موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. قابل ذکر است که در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر (۲/۳ میلی‌متر)، فقط مدل K بین ۵ مدل موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D مقدار نزدیک‌تری به مقدار عمق آب نفوذ یافته داده‌های مشاهداتی دارد.



شکل ۵- عمق آب نفوذ یافته برای زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت برای تمامی مدل‌ها.

برای زمان ۲۴ ساعت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر، عمق آب نفوذ یافته در مدل‌های VM، D و B نسبت به ۲ مدل MVM و K بیشتر می‌باشد، بیشترین و کمترین عمق آب نفوذی مربوط به مدل‌های VM و K بوده که به ترتیب مقادیرشان ۲۲/۳ و ۱۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متر، بیشترین و کمترین عمق آب نفوذی به ترتیب مربوط به مدل MVM (۱۰/۴ میلی‌متر) و مدل D (۳/۸ میلی‌متر) می‌باشد. با توجه به این شکل، عمق آب نفوذ یافته برای داده‌های مشاهداتی در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، ۲۰/۰ میلی‌متر بدست آمده که به مقادیر مدل‌های BMA، VM و D (به ترتیب ۱۸/۱، ۲۲/۳ و ۲۰/۴ میلی‌متر) نزدیک می‌باشد. در مدت زمان ۲۴ ساعت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، مدل D نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. عمق آب نفوذ یافته برای داده‌های مشاهداتی در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متری، ۳/۸ میلی‌متر بدست آمده که نزدیک به مقادیر مدل‌های BMA، VM و D (به ترتیب ۴/۷، ۴/۳ و ۳/۸ میلی‌متر) می‌باشد، لذا برای زمان ۲۴ ساعت در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متری، مدل D نسبت به سایر مدل‌ها در اعماق پایین، رطوبت حجمی خاک را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، بررسی دقت مدل‌های ون‌گنوختن-معلم، ون‌گنوختن-معلم اصلاح شده، بروکس-کوری، کوسوگی و دورنر ارائه شده در مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت حجمی خاک می‌باشد. در این تحقیق، مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها به صورت عمقی و شعاعی، در مدت زمان‌های ۸ و ۲۴ ساعت مقایسه شدند. در این مطالعه یک مدل ترکیبی نیز با استفاده از روش میانگین گیری بیزی (BMA) با هدف بهبود شبیه‌سازی حرکت آب خاک ارائه شد. مقادیر رطوبت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با پارامترهای آماری R^2، CRM، NS، RMSE (cm^3cm^{-3}) و NRMSE ارزیابی شدند. در زمان ۸ ساعت بیشترین خطای NRMSE مربوط به مدل K و کمترین NRMSE مربوط به مدل ترکیبی BMA می‌باشد، هم‌چنین بیشترین خطای RMSE مربوط به مدل‌های MVM و K (دارای خطای یکسان با مقدار ۰/۰۵۸۹ cm^3cm^{-3}) و کمترین RMSE مربوط به مدل ترکیبی BMA می‌باشد. در زمان ۲۴ ساعت بیشترین خطای NRMSE مربوط به مدل MVM (۳۸/۲۹ درصد) و کمترین NRMSE مربوط به مدل ترکیبی می‌باشد، هم‌چنین بیشترین خطای RMSE مربوط به مدل‌های MVM و کمترین RMSE مربوط به مدل ترکیبی می‌باشد. برای زمان ۸ ساعت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر، عمق آب نفوذ یافته در مدل‌های VM، MVM و D بیشتر بوده و در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متر، بیشترین عمق آب نفوذ یافته مربوط به مدل MVM می‌باشد. برای مدت زمان ۸ ساعت، مدل BMA نسبت به ۵ مدل موجود در HYDRUS-2D رطوبت حجمی خاک را مناسب‌تر پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین برای زمان ۲۴ ساعت در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر، عمق آب نفوذ یافته در مدل‌های VM، D و B بیشتر و در عمق ۵۰-۳۰ سانتی‌متر، بیشترین و کمترین عمق آب نفوذ یافته مربوط به مدل‌های MVM و D می‌باشد. برای مدت زمان ۲۴ ساعت، مدل D نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل ترکیبی BMA نسبت به ۵ مدل VM، MVM، BK، K و D موجود در مدل HYDRUS-2D، نتایج مناسب‌تری نشان می‌دهد.

Archive SID
www.SID.ir

REFERENCES

Abbasi, F. (2009). Assessment of Indirect Methods to Estimate Soil Hydraulic Properties for Simulating Soil Moisture in a Sandy Loam Soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 9(4), 31-44. (In Farsi)

Ajami, N. K., Duan, Q., Gao, X., and Sorooshian, S. (2006). Multi model combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model inter comparison project results. *Journal of Hydrometeorology*, 7(4), 755-768.

Ajami, N. K., Duan, Q., and Sorooshian, S. (2007). An integrated hydrologic Bayesian multi model combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resources Research*, 43(1).

Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media, Hydrol. Paper No. 3, *Colorado State Univ, Fort Collins, CO*.

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 Sciences*, 22, 143–156.

Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.*, 32(9), 211-223.

Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and Dubrovsky, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Modell*, 171, 223-246.

El-nesr, M., Alazba, A., and Simunek, J. (2014). HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science*, 32(2), 111–125.

Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y. I., Lamers, J. P. A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C., and Vlek, P. L. G. (2009). Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics *Irrigation Sciences*, 27, 319-330.

Hemri, S. (2012). Calibrating multi-model runo predictions for a head catchment using Bayesian model averaging. Master thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

Kandelous, M. M., and Simunek, J. (2010). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97, 1070-1076.

Khanjani, S., and Dalir hasannia, R. (2014). Investigation of the development of moisture front in drip irrigation under linear source in dual layer soil. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(2), 419-429.

Khanmohammadi, N., Rezaie, H., Besharat, S., and Behmanesh, J. (2012). Evaluation of Soil Water Profile Simulations in Drip Irrigation Based on Soil Hydraulic Properties and Experimental Observation. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 3(6), 187-195. (In Farsi)

Khorami, M., Mojtaba, SH. A., Alizadeh, A., and Ansari, H. (2013). Evaluation of different methods to estimate the soil wetting pattern in a loamy soil under drip irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 3(7), 402-411. (In Farsi)

Kosugi, K. (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.*, 32(9), 2697-2703.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.

Nagavi, H., Hoseini nia, M., Karimi, SH., and Irandoost, M. (2012). The ability of HYDRUS-2D model in the simulation moisture distribution in soil under subsurface drip irrigation system. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 16(61), 59-68. (In Farsi)

Pouryazdankhah, H. and Khaledian, M. R. (2013). Improving Model Efficiency of HYDRUS-2D by Considering Temporal Variability in Soil Hydraulic Properties. *Journal of Water and Soil*, 26(6), 1440-1449. (In Farsi)

Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M. Th. (2001). ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedo transfer functions. *J. Hydrol*, 251, 163–176.

Simunek, J., van Genuchten, M. Th., Gribb, M. M., and Hopmans, J. W. (1998). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil and Tillage Research*, 47/1-2, Special issue "State of the art in soil physics and in soil technology of antrophic soils", 27-36.

Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M. Th. (1999). The HYDRUS-2D software package for simulating two dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, p 251, Intl. Ground Water Modeling Center, Colo. School of Mines, Golden, CO.

Simunek, J., van Genuchten, M. Th., and Sejna, M. (2006). The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably- Saturated Media. *Technical Manual*, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech

Archive of SID

www.SID.ir

Republic, pp. 241.

Simunek, J., van Genuchten, M. Th., and Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J*, Special Issue "Vadose Zone Modeling", (in press).

Singh, A. K., Tripathy, R., and Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water Nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776–786.

Skaggs, T. H., T.J. Trout, T. J., Simunek, J., and Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng*, 4, 304-310.

Tafteh, A., Sepaskhah, A. R. (2012). Yield and nitrogen leaching in maize field under different nitrogen application rates and partial root drying irrigation. *International Journal of Plant Production*, 6 (1), 93–114.

Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 44, 892-898.

Vogel, T. and Cislerova, M. (1988). On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 3, 1-15.

Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., and Simunek, J. (2001). Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sc. Soc. Am. J*, 65, 1027–1037.

Wang, D., Yates, S. R., Simunek, J., and van Genuchten, M. Th. (1997). Solute transport in simulated conductivity fields under different irrigations. *J. Irrig. Drain. Eng*, 123(5), 336-343.

Xie, T., Liu, X., and Sun, T. (2011). The Effects of Groundwater Table and Flood Irrigation Strategies on Soil Water and Salt Dynamics and Reed Water Use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modeling*, 222, 241-252.

Archive of SID

www.SID.ir