

معرفی مدل توسعه یافته KDW-VG و بررسی کارایی آن در شبیه‌سازی عددی جریان ترجیحی آب در خاک

مصطفی مرادزاده^{1*}، هادی معاضد²، سعید برومند نسب³ و محمد رضا خالدیان⁴

تاریخ دریافت: 1394/8/12 تاریخ پذیرش: 1394/12/5

چکیده

جریان‌های ترجیحی سریع در خلل و فرج درشت خاک، مانند سوراخ و کانال‌های زیرزمینی که با فعالیت کرم‌ها و یا رشد ریشه گیاهان به وجود می‌آید، رخ می‌دهند. برای پیش‌بینی روند و توضیح این نوع جریان‌ها در خاک، دی پترو و همکاران (2003)، مدل موج سینماتیک، انتشار (KDW⁴) را توسعه و پیشنهاد دادند. نام‌برندگان این مدل را با اضافه کردن ترم انتشار به معادله موج سینماتیک (KW⁵) که به شدت توده‌ای است و توسط جرمن در سال 1985 ارائه شده بود، توسعه دادند (Di pietro et al., 2003)، (German., 1985). فرض‌های اساسی این مدل، این است که فلاکس جریان به تنهایی تابعی از مقدار آب متحرک است. ولی در مدل موج سینماتیک، انتشار با اضافه شدن بخش انتشار به معادله قبلی، فرض می‌شود که فلاکس جریان یک تابع غیر خطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان می‌باشد. بخش اول این فرض یک تابع توانی است که در آن فلاکس جریان به رطوبت متحرک وابسته است. این معادله توانی تنها یک معادله ریاضی است و از معنی و مفهوم فیزیکی چندانی برخوردار نیست. در این پژوهش این معادله توانی با صورت ظاهری معادله وان گنوختن که معنی فیزیکی قابل قبولی دارد، جایگزین شد و مدل ریاضی موج سینماتیک، انتشار-وان گنوختن (KDW-VG⁶) برای اولین بار معرفی شد. ابتدا ضرایب مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO⁷) به دست آمد و سپس مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به هیدروگراف حاصل از بارندگی و گذار آب از مسیرهای ترجیحی مدل فیزیکی که از انتهای ستون خاک برداشت شده بود، مورد صحت سنجی قرار گرفت. برای ایجاد مسیر ترجیحی در خاک، یک ستون ماسه درشت به قطر 1/4 سانتی‌متر در مرکز ستون خاکی به قطر خارجی 160 و ارتفاع 300 میلی‌متر ایجاد شد. نتایج این پژوهش نشان از تطابق بسیار خوب مدل با مشاهدات آزمایشگاهی داشت و مقادیر RMSE بین مشاهدات و پیش‌بینی‌های مدل حاضر نسبت به مطالعات پیشین کم‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، محیط متخلخل، مدل فیزیکی، مدل‌سازی ریاضی، هیدروگراف بارندگی

مقدمه

توسط کرم خاکی و یا ریشه گیاهان ایجاد می‌شود، رخ می‌دهد (Gerke., 2006). آغاز این پدیده در هنگام نفوذ آب به میزان رطوبت اولیه خاک، میزان و شدت بارندگی و هدایت هیدرولیکی خاک بستگی دارد (Jarvis., 2007). به‌طور کلی جریان ترجیحی پدیده‌ای شایع است که به طور معنی‌داری حرکت آب و املاح را در محیط خاک سرعت می‌بخشد (Koestel and Jorda., 2014). بنابراین جریان‌های ترجیحی به شکل معنی‌داری بر زندگی انسان‌ها، محصولات و امنیت اکولوژی تأثیر گذاشته‌اند (Jianzhi et al., 2007). املاحی که به وسیله این عمل منتقل می‌گردند، باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند (Flury., 1996) و به طور غیر مستقیم بر میزان و غلظت املاح رواناب نیز تأثیر می‌گذارند. از طرفی توزیع اندازه‌های دانه‌های خاک شامل گستره پیوسته‌ای از ریز دانه‌ها تا درشت دانه‌ها می‌شود. تعادل بین نیروهایی که جریان را به جلو می‌رانند (فشار و جاذبه) و نیروهای مقاومت (اصطکاک جداره‌های خارجی ذرات خاک و

آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که جریان‌های ترجیحی حاصل از نفوذ آب از طریق خلل و فرج بزرگ، سبب ایجاد انشعابات متعدد در پروفیل خاک و در نتیجه نگاهداشت ناچیز آب می‌شود (Clothier et al., 2015). (Alaoui., 2008). جریان از خلل و فرج درشت خاک، زیر مجموعه‌ای از جریان‌های ترجیحی است که در مسیرهایی که

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز
2-3- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

4- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان
(*- نویسنده مسئول: Email: Moradzadeh.Mostafa@gmail.com)

4- Kinematic-dispersive wave
5- Kinematic wave
6- Kinematic dispersive wave-van Genuchten
7- Particle swarm optimization

یک پروفیل خاک (جریان در منافذ قابل زهکشی)، $w_t \equiv \frac{\partial w}{\partial t}$ اولین مشتق جزئی آن نسبت به زمان، و u فلاکس حجمی نرمال آب متحرک به سطح خارجی V می باشد. در این جا فرض می شود که منافذ ریز به طور کامل اشباع هستند و بنابراین هیچ آب قابل تبدلی بین دو نوع منفذ وجود ندارد. قانون پیوستگی برای جریان w به صورت رابطه 1 بیان می شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

همچنین فرض می شود که فلاکس حجمی آب، u ، تابعی غیر خطی از w و w_t باشد (مانند رابطه 2):

$$u = u(w, w_t) \quad (2)$$

بنابراین گرادینان فضایی فلاکس برابر می شود با رابطه 3:

$$\nabla \cdot u = c \nabla w + v_w \nabla w_t \quad (3)$$

که در آن، $v_w = \frac{\partial u}{\partial w_t} \Big|_{w_t = \text{const}}$ و $c = \frac{\partial u}{\partial w} \Big|_{w_t = \text{const}}$

فرض این که جریان آب فقط در جهت عمودی روبه پایین، z ، انجام می شود، معادلات 1 و 3 به ترتیب برابر می شوند با روابط 4 و 5:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = c \frac{\partial w}{\partial z} + v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \quad (5)$$

با ترکیب معادلات 4 و 5 معادله 6 حاصل می شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c \frac{\partial w}{\partial z} = -v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \quad (6)$$

با استفاده از عبارت $\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} = -\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ و ضرب عبارت $\frac{\partial u}{\partial w}$ معادله 6، این معادله به صورت معادله 7 تبدیل می شود:

$$v_w \frac{\partial u}{\partial z} + c \frac{\partial u}{\partial z} = v_w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (7)$$

هر دو معادله 6 و 7 به ترتیب برای w و u معادلات غیر خطی انتقال - انتشار می باشند. در نظر داشته باشید، شکل تابعی مقدار فلاکس آب متحرک بر ضرایب هیدرودینامیک c ، v_w و v_u اثر می گذارد ولی شکل به دست آمده معادلات دیفرانسیل را تغییر نمی دهد. همچنین در این جا فرض می شود که معادله 2 به شکل معادله 8 است.

$$u = f(w) + g(w_t) \quad (8)$$

با احتساب $f(w) = bw^a$ و $g(w_t) = \pm v_w \frac{\partial w}{\partial t}$ که در آن بعد a شاخص توزیع جریان در

جریان آب) که خلاف نیروهای قبلی عمل می کنند، تغییر اینرسی کل مومنتوم خطی مربوط به آب نفوذکننده را تعیین می کنند و در نتیجه میانگین سرعت آب در خلل و فرج به دست می آید. وقوع هر کدام از این نیروها در جریان آب، به اندازه ذرات و در نتیجه به رفتار هیدرولیکی که با اندازه های متفاوت ذرات خاک تغییر می کند، بستگی دارد. جرمن، جرمن و بون و چن و واگنت، رابطه ای بین متوسط فلاکس آب و ناحیه متحرک آب در منافذ قابل زهکشی استخراج کردند. هر دو مدل به یک رابطه غیر خطی بین فلاکس و مقدار آب متحرک منجر شدند (Chen and Wagenet., 1992)

(German and Beven., 1985) مجموع این رابطه ها به همراه قانون پیوستگی به مدل موج سینماتیک (KW) برای توصیف فرآیند جریان در منافذ قابل زهکشی منجر می شود (German, 1990). اگرچه مدل موج سینماتیک به طور معمول جریان های ترجیحی را بیش تر از مقدار واقعی تخمین می زند ولی به خوبی جریان آب متحرک را در خاک های ساختمان دار نشان می دهد.

(German et al., 1997), (Mdaghri-Alaoui., 1998) از طرفی مدل موج سینماتیک شدیداً توده ای¹ است و بنابراین قادر نیست اثر انتشار² را به حساب آورد. به این دلیل که فرض های اساسی این مدل، این است که فلاکس جریان به تنهایی تابعی از مقدار آب متحرک می باشد. از همین روی، مدل موج سینماتیک، انتشار (KDW) به وسیله دی پترو و همکاران در سال 2003 پیشنهاد شد تا دقیق تر بتوان جریان های ترجیحی را از میان منافذ قابل زهکشی توضیح داد. در این مدل، ترم انتشار به مدل موج سینماتیک اضافه شد و در آن فرض شد که فلاکس جریان یک تابع غیر خطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان می باشد (Di pietro et al., 2003). بخش اول این فرض یک تابع توانی است که در آن فلاکس جریان به رطوبت متحرک وابسته است و بخش دوم آن یک معادله دیفرانسیل است که پدیده پسماند³ رطوبتی در مقابل هدایت هیدرولیکی آب در خاک را مدل می کند. معادله توانی به کار رفته شده توسط دی پترو و همکاران، تنها یک معادله ریاضی است و از معنی و مفهوم فیزیکی چندانی برخوردار نیست. در این پژوهش این معادله توانی با صورت ظاهری معادله وان گنوختن که معنی فیزیکی قابل قبولی دارد جایگزین شد و مدل ریاضی موج سینماتیک، انتشار - وان گنوختن (KDW-VG) برای اولین بار معرفی شد.

تئوری مدل موج سینماتیک، انتشار برای جریان های ترجیحی از میان منافذ قابل زهکشی

در این مدل، w ، مقدار حجم آب متحرک در a مقدار حجم V از

- 1- Convective
- 2- Dispersive
- 3- Hysteresis

همان طور که از شکل 1 نیز پیدا است، عبارت توانی معادله 9 یعنی $bw(z, t)^a$ بیش تر یک مفهوم ریاضی است و کم تر معنی فیزیکی می دهد. در این جا عبارت با شکل ظاهری مدل وان گنوختن جایگزین شد تا بر معنی فیزیکی معادله 9 افزوده شود.

مدل وان گنوختن

رابطه وان گنوختن (Coppola et al., 1980) و (Hardie et al., 2013) و عباسی و همکاران (2012)، معروف ترین رابطه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع است. این رابطه پایه فیزیکی دارد و بر توزیع اندازه منافذ خاک استوار می باشد و به صورت رابطه 13 ارایه می شود:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (13)$$

$$S_e = \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \quad (14)$$

در رابطه های بالا، S_e اشباع نسبی یا درجه اشباع، $K(S_e)$ و K_s به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و اشباع $[L.T^{-1}]$ ، l پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک و m و n پارامترهای برازش منحنی هستند. هم چنین w رطوبت، w_r رطوبت باقی مانده و w_s ، رطوبت اشباع خاک می باشند. از آن جایی که فلاکس u از نظر معنی فیزیکی و ابعادی مانند هدایت هیدرولیکی می باشد و مانند آن مقدارش در رطوبت های مختلف متفاوت است، در این جا از شکل و صورت ظاهری مدل وان گنوختن به جای عبارت اول معادله 9 یعنی $bw(z, t)^a$ استفاده می شود و با توجه به شرایط آزمایش ها، برخی تغییرات اندک در تعاریف پارامترهای ورودی مدل وان گنوختن لحاظ می شود. در رابطه 13 مقدار S_e همواره بین صفر و یک تغییر می کند. یعنی اگر مقدار w ، برابر w_r باشد کسر برابر صفر و اگر برابر با w_s باشد کسر برابر یک خواهد شد. بنابراین با توجه به اینکه S_e مقداری نرمال شده و بی بعد است، در این پژوهش نیز با بازتعریف پارامترهای کسر S_e به صورت (w_{min}) و (w_{max}) این موضوع رعایت شده است و مقدار S_e ، همواره بین صفر و یک تغییر می کند. در واقع به جای w_r ، مقدار کمینه رطوبت های مشاهده شده در آزمایش (w_{min}) و به جای w_s و (w_{max}) از آنجایی که آزمایش ها در شرایط غیر اشباع انجام شده (مقدار بیشینه رطوبت های مشاهده شده در هر آزمایش (w_{max}) تعریف می شود.

ماکروپور¹ و b ، ضریب رسانایی² و بعد آن برابر با $[LT^{-1}]$ و v_w نیز انتشار پذیری آب³ و بعد آن برابر است با $[L]$ و همه اعداد مثبتی هستند، معادله 8 را به صورت معادله 9 می توان نمایش داد.

$$u(z, t) = bw(z, t)^a \pm v_w \frac{\partial w(z, t)}{\partial t} \quad (9)$$

با این توضیح که علامت منفی برای حالتی است که در رطوبت های یکسان، هدایت هیدرولیکی زهکشی از مرحله نفوذ آب بیش تر باشد و مثبت برای حالتی که در رطوبت های یکسان هدایت هیدرولیکی مرحله نفوذ آب از زهکشی بیش تر است. از رابطه 9، سرعت سیگنالی c به صورت رابطه 10 تعریف می شود.

$$c(w) = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_i = \text{constant}} = abw^{a-1} \quad \text{هم چنین:} \quad (10)$$

$$v_u = c(w) v_w \quad (11)$$

با توجه به فرض های بالا، c به شکل اولیه مدل سینماتیک که توسط جرمن (1985 و 1990) ارائه شد تغییر پیدا می کند. در جایی که او از $g(w_r)$ صرف نظر کرد. با استفاده از رابطه $w = \left(\frac{u}{b}\right)^{\frac{1}{a}}$ و با ترکیب با معادلات 7، 8 و 11 معادله موج سینماتیک، انتشار به صورت معادله 11 حاصل می شود:

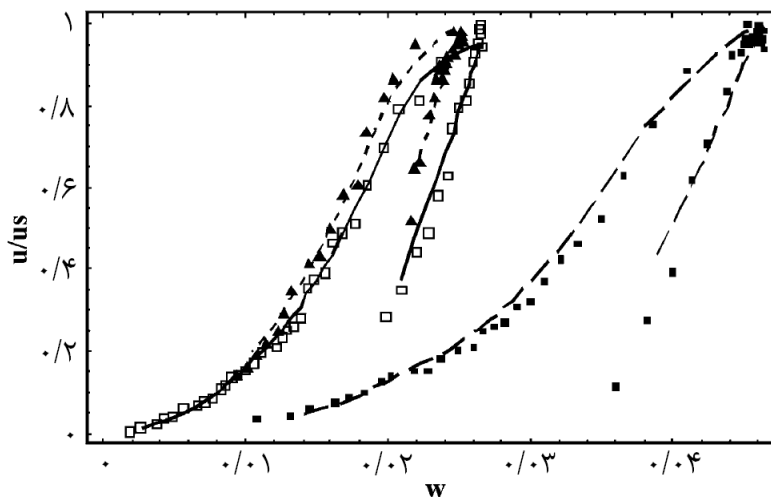
$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} + ab^a u(z, t)^{\frac{a-1}{a}} \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = v_w ab^a u(z, t)^{\frac{a-1}{a}} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} \quad (12)$$

که در آن، $v_u = cv_w$ بنابراین مدل به سه پارامتر a ، b و v_w بستگی دارد. که $u(z, t)$ [mm h⁻¹] فلاکس آب در زمان t و عمق z می باشد و a شاخص توزیع جریان در ماکروپور، b [mm h⁻¹] یک ضریب رسانایی (Rousseau et al., 2004) و v_w [mm] ضریب انتشار پذیری آب است.

بهبود مدل KDW در ترکیب با مدل وان گنوختن - معرفی مدل توسعه یافته KDW-VG

همان طور که اشاره شد دی پترو در سال 2003 از معادله 9 برای مدل کردن فلاکس u استفاده نمود که در آن $\pm v_w \frac{\partial w(z, t)}{\partial t}$ عبارت اصلاح کننده مدل کردن u در حالت پس ماند و $bw(z, t)^a$ یک معادله توانی است که به نظر می رسد از روی شکل توانی تغییرات فلاکس u نسبت به مقدار آب متحرک، w ، انتخاب شد (شکل 1).

- 1- Macropore-flow distribution index
- 2- Conductance
- 3- Water dispersion coefficient



شکل 1- فلاکس نسبی ($\frac{u}{u_s}$) در مقابل مقدار آب متحرک برای سه شدت ورودی u_s . علامتها مربوط هستند به فلاکس های اندازه گیری شده

و خطوط مربوط می شوند به مقادیر برازش داده شده با معادله 9، (Di Pietro et al., 2003).

$$u(z,t) = u_m \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^l \left(I - \left[I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right) \pm \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} \quad (15)$$

همان طور که پیش تر اشاره گردید، مقدار c در مدل KDW برابر است با: $\frac{\partial u}{\partial w} \Big|_{w_i = constant}$. بنابراین با مشتق گیری از معادله 15، مقدار c در مدل KDW-VG، به صورت معادله 16 محاسبه می شود:

$$c(w) = \frac{\partial u}{\partial w} \Big|_{w_i = constant} =$$

$$\frac{l \times u_m (w(z,t) - w_{min})^{l-1}}{(w_{max} - w_{min})^l} \times \left(I - \left[I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right) + \frac{2u_m}{w_{max} - w_{min}} \left(I - \left[I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right) \times \left(I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right)^{m-1} \times \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m} + l-1} \quad (16)$$

میانگین مربعات (RMSE) بین داده های آزمایشگاهی و فلاکس پیش بینی شده با معادله 15 مطابق معادله 17 با استفاده از روش بهینه سازی تراکم ذرات (PSO) کمینه می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(u_i - \left[u_m \left(\frac{w_i - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^l \left(I - \left[I - \left(\frac{w_i - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right) \pm v_w \frac{\partial w}{\partial t} \Big|_i \right]^2 \right)} \quad (17)$$

خاک در زمان t_i و میانگین اندازه گیری شده رطوبت خاک در زمان t_i . بنابراین پس از به دست آمدن ضرایب مدل KDW-VG، مدل

همان طور که مشاهده می شود چه معادله قبلی و چه معادله وان گنوختن هر دو از صورت یک تابع توانی پیروی می کنند ولی با این تفاوت که مدل وان گنوختن معنی و مفهوم فیزیکی بیشتری دارد و تنها یک تابع توانی ریاضی نیست. بنابراین فرم کلی معادله وان گنوختن برای مدل فلاکس u و با در نظر گرفتن بخش پس-ماند (افزودن عبارت دوم معادله 9 یعنی $\pm v_w \frac{\partial w(z,t)}{\partial t}$) به صورت رابطه 15 تعریف می شود:

در این جا نیز مقدار v_u به صورت قبل در نظر گرفته می شود، یعنی برابر است با: $v_u = cv_w$. بنابراین تمام پارامترهای مدل KDW-VG مشخص شدند. هم چنین برای تخمین پارامترهای مدل، یعنی ضرایب m و l و پارامتر v_w ، در این جا، خطای جذر

که در آن N ، u_i و w_i به ترتیب برابر هستند با تعداد مشاهدات آزمایشگاهی، فلاکس های مشاهداتی در انتهای ستون

مذکور به صورت معادله 18 معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial t} + c(w) \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = v_u \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \quad (18)$$

که در آن،

$$c(w) = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_i = \text{const}} =$$

$$\frac{l \times u_{in} (w(z,t) - w_{min})^{l-1}}{(w_{max} - w_{min})^l} \times \left(I - \left[I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right)^2 + \frac{2u_{in}}{w_{max} - w_{min}} \left(I - \left[I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right) \times \left(I - \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right)^{m-1} \times \left(\frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m} + 1}$$

$$v_u = c(w) \cdot v_w$$

9

داده شده KDW-VG در برآورد جریان ترجیحی آب با هدف رسیدن به نقطه کمینه سراسری از طریق روش بهینه‌سازی تراکم ذرات تعیین شود. سپس مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به هیدروگراف حاصل از بارندگی و گذار آب از مسیرهای ترجیحی مدل فیزیکی که از انتهای ستون خاک برداشت شده بود، مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. در این جا فرض می‌شود که با توجه به معنی و مفهوم فیزیکی مدل وان گنوختن، مدل توسعه داده شده این پژوهش می‌تواند جریان ترجیحی آب در خاک را بهتر از مدل‌های قبلی پیش-بینی نماید. از آن جایی که پارامترهای مدل مورد استفاده از طریق کمینه کردن معادله 17 با روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO) به دست آمده است، در ادامه ویژگی‌های این مدل ارائه می‌شود.

ویژگی‌های روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO)

بهینه‌سازی تراکم ذرات یکی از روش‌های بهینه‌سازی است که از طبیعت الهام گرفته است و برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی با فضای جستجوی بسیار بزرگ و بدون نیاز به اطلاع از گرادینان تابع هدف ابداع شده است. این روش اولین بار در سال 1995 توسط دو نفر به نام‌های کندی⁴ و ابرهارت⁵ معرفی شد. این الگوریتم در ابتدا برای شبیه سازی پرواز دسته جمعی پرندگان مورد استفاده قرار می‌گرفت ولی پس از ساده سازی الگوریتم اولیه مشاهده شد که این الگوریتم در واقع یک نوع عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهد و به همین علت می‌تواند برای حل سایر مسایل بهینه‌سازی نیز استفاده شود (Eberhart and Kennedy., 1995). این روش، شیوه‌ای مناسب برای یافتن محل بهینه‌سراسری تابع می‌باشد (Tsoulos and Stavrakoudis., 2010). در این الگوریتم برای حل یک مساله بهینه‌سازی، جمعیتی از پاسخ‌های نامزد با استفاده از یک رابطه ساده، به طور تصادفی در دامنه مساله به حرکت در می‌آیند و

ولی برای حل عددی معادله فوق بایستی $c(u)$ وجود داشته باشد. در مورد مدل KDW، این موضوع حل شد و همان طور که اشاره شد، به راحتی می‌توان با جایگزین کردن رابطه $w = \left(\frac{u}{b}\right)^a$ در

عبارت $c(w) = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_i = \text{const}} = abw^{a-1}$ مقدار w را بر

حسب u مرتب کرد. هر چند در اینجا دی‌پترو برای ساده سازی، زیرکانه ترم پس ماند معادله 9، یعنی عبارت $-v_w \frac{\partial w(z,t)}{\partial t}$ را در

معادله $u(z,t) = bw(z,t)^a - v_w \frac{\partial w(z,t)}{\partial t}$ در نظر نگرفت تا

بتواند به راحتی w را بر حسب u مرتب کند که اگر این کار را نمی‌کرد، از نظر جبری امکانی برای به وجود آوردن این تغییر متغیر وجود نداشت که این کار خود تا حدی می‌تواند معادله را از پاسخ‌های بهتر دور کند. اما در این جا برای این که کل ارتباط w و u لحاظ شود، با ایجاد یک ارتباط عددی بین این دو عبارت، تابع $w = f(u)$ به شکل یک چند جمله‌ای با استفاده از روش عددی کم‌ترین مربعات¹ یا تابعی نمایی در نظر گرفته شد. به این ترتیب اثر پس ماند رطوبتی نیز در این جا در نظر گرفته شد. در این پژوهش، معادله 18 با روش عددی تفاضلات محدود² برای شرایط مرزی و اولیه ارائه شده در رابطه 19 که به وسیله جرم در سال 1985 به کار برده شد، در محیط نرم افزار متلب³ حل می‌شود.

$$\begin{cases} u(z,t) = u_{in}(t), z=0, t > 0 \\ u(z,t) = u_0, z > 0, t = 0 \end{cases} \quad (19)$$

که در آن $u_{in}(t)$ ، فلاکس آب ورودی می‌باشد.

به طور کلی تلاش می‌شود که در ابتدا پارامترهای مدل توسعه

- 1- Least Square
- 2- Finite-difference
- 3- MATLAB

4- Kennedy
5- Eberhart

سه بار تکرار شد تا در نهایت کل نمونه خاک ساخته شد. خاک اصلی به کار رفته در مدل فیزیکی دارای ضریب یکنواختی (Cu) برابر 0/146، ضریب دانه‌بندی (Cc) برابر 1/183 و D₅₀ برابر 0/645 میلی‌متر بود. هم‌چنین ماسه سبکی که برای پر کردن حفره داخلی ایجاد شده در این مدل فیزیکی و نمونه خاک انتخاب شد، چیزی بین دو الک 20 و 18 (0/85 و 1 میلی‌متر) بود. پس از ساخت این نمونه خاک، از آن‌جایی که آزمایش‌ها برای حالت غیر اشباع طراحی شده بودند، لازم بود که هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک اندازه‌گیری شود تا شدت‌های بارندگی که بعداً اعمال خواهد شد، کم‌تر از این مقدار باشد. پس از انجام آزمایش بار ثابت، مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک، 172/6 میلی‌متر بر ساعت به دست آمد. ستون خاک ساخته شده پس از آماده شدن و قبل از انجام آزمایش‌های نفوذ، از پایین به مدت 48 ساعت با آب اشباع شد. پس از اشباع شدن ستون آماده شده با آب، فرصت داده شد تا ستون با نیروی ثقل زهکشی شود و به یک وزن ثابت برسد. پس از اطمینان از خالی شدن منافذی از خاک که در جریان ترجیحی دخالت دارند، یعنی عمدتاً ماکروپورها، ستون خاک به احتمال زیاد دارای رطوبتی خواهد شد که سبب وجود آن، آب باقی‌مانده در میکروپورها و به واسطه نیروی موئینگی است. در این‌جا انتظار می‌رود یک تبادل کمی از آب بین میکروپورها و تخلخل قابل زهکشی وجود داشته باشد. حال با توزین این ستون خاک می‌توان مقدار آب موجود در میکروپورها را به دست آورد. همان‌طوری که در شکل 2 نشان داده شده است، یک قیف به ستون خاک متصل و آب‌بندی می‌شود.

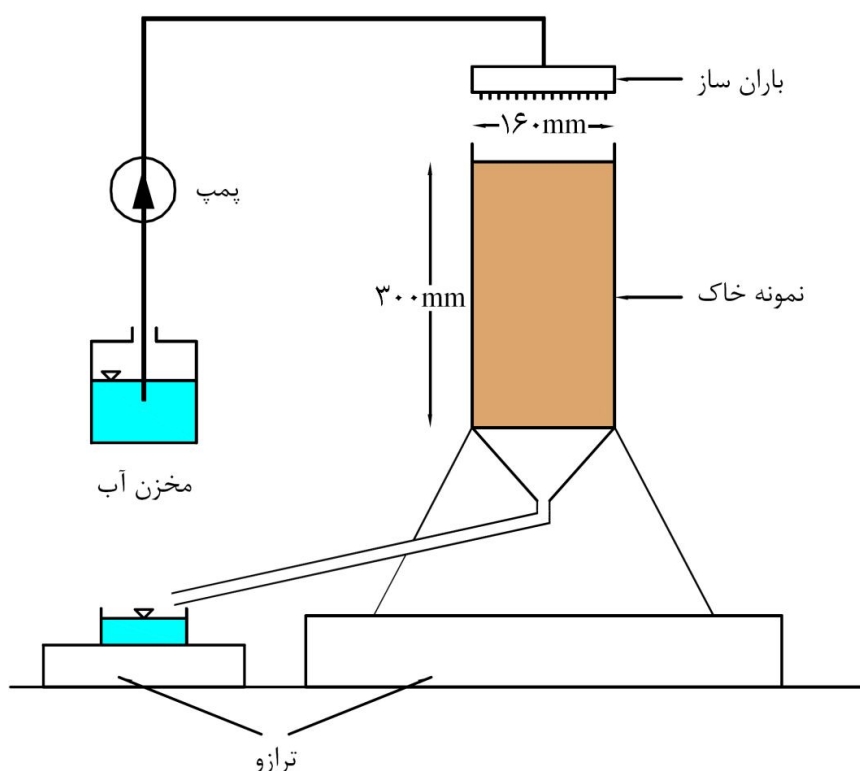
پس از آماده‌سازی نمونه خاک و مدل فیزیکی، مطابق شکل شماره 2، قطرات آب روی سطح ستون خاک و با یک دستگاه شبیه‌ساز باران که با فاصله حدود 10 سانتی‌متری سطح خاک قرار داشت ایجاد شد. مطابق شکل 2، دستگاه به یک پمپ که از مخزن آب تغذیه می‌شود متصل شد (Majdalani et al., 2008). می‌بایست توجه کرد که شرایط جریان غیراشباع می‌باشد و شدت‌های به کار رفته برای باران چیزی کم‌تر از مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک باشد. جریان زهکشی به طور پیوسته با یک ترازوی دقیق پایش می‌شود و با ترازوی بزرگ‌تر نیز وزن کل ستون خاک مرطوب در حین بارندگی، یعنی فرآیند نفوذ تا پایان آزمایش و زهکشی کامل ستون خاک، اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن این وزن‌ها و وزنی که در ابتدا یعنی هنگامی که رطوبت خاک فقط مربوط به میکروپورها بود و داشتن وزن خشک خاک که بعد از اجرای آزمایش و قرار دادن نمونه خاک در آن به دست خواهد آمد، رطوبت حجمی متحرک خاک در زمان‌های دل‌خواه به دست می‌آید.

در این پژوهش، آزمایش‌های نفوذ با شدت‌های باران شبیه‌سازی شده و چهار میزان 107/64، 56/97، 133/01 و 161/71 میلی‌متر بر ساعت انجام شد. در این‌جا از دو ترازو استفاده شد.

آن را با هدف یافتن پاسخ پهنه‌سراسری مورد کاوش قرار می‌دهند. به طور خلاصه، مهم‌ترین نقاط قوت الگوریتم PSO عبارت است از: عدم حساسیت به مقیاس متغیرهای مساله، پیاده‌سازی بسیار ساده و راحت، قابلیت پیاده‌سازی به طور موازی برای انجام پردازش هم‌زمان، عدم نیاز به مشتق تابع هدف، تعداد کم پارامترها و توانایی انجام جستجوی سراسری مؤثر است.

مواد و روش‌ها

برای پیدا کردن خاک مناسب برای انجام آزمایش‌ها، نخست نمونه خاک‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی آب و خاک گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال‌های 1392 تا 1393 هجری خورشیدی انجام شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در آون (در دمای 105 درجه سلسیوس و به مدت 24 ساعت) کوبیده و از الک شماره 10 (2 میلی‌متری) عبور داده شدند و هدایت هیدرولیکی اشباع آن‌ها نیز به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. پس از انتخاب خاک مناسب برای ساخت مدل، نمونه اصلی که دارای منافذی برای شبیه‌سازی حالت جریان ترجیحی آب در خاک بود (که توسط یک ماسه درشت بافت ایجاد شده بود) به شیوه زیر ساخته شد (Wang et al., 2013 a,b): ابتدا لوله PVC مورد نظر با قطر خارجی 160 و ارتفاع 300 میلی‌متر تهیه شد و انتهای آن با دولایه توری پلاستیکی با قطر منافذ 1 تا 2 میلی‌متر و به وسیله مفتول سیمی محکم گردید. به جدار داخلی لوله نیز ماسه لبه تیز چسبانده شد. این عمل باعث افزایش اصطکاک جدارها با خاک می‌شود و احتمال وقوع جریان‌های ترجیحی از جدارها را کاهش می‌دهد. سپس حدود 1 سانتی‌متر گراول (ماسه بین الک شماره 6 (3/35 میلی‌متر) و الک شماره 10 (2 میلی‌متر) برای زهکشی بهتر روی توری ریخته شد. پس از آن لوله خالی به همراه سه پایه درون سطل آب قرار گرفت و سطل آب تا یک سوم ارتفاع ستون خاک پر از آب شد. سپس یک لوله در بسته به طول حدود 60 سانتی‌متر و قطر خارجی 1/4 سانتی‌متر در مرکز لوله PVC به طور موقت قرار داده شد. پس از آن خاک اصلی آزمایش، به آرامی از اطراف این لوله داخلی که قطر آن 1/4 سانتی‌متر بود، داخل لوله PVC ریخته شد. به این ترتیب که در هر مرحله پس از ریخته شدن خاک اطراف لوله میانی، آب سطل خالی شد و اجازه داده شد که خاک به طور کامل خشک شود. بعد از آن لوله به آرامی خارج شد تا به خاک اطراف خود آسیبی وارد نسازد و بی‌درنگ با یک ماسه سبک‌تر پر شد. برای اینکه از ریزش جداره‌های حفره ایجاد شده به وسیله لوله جلوگیری شود، کل ستون در سه مرحله و در هر مرحله به طول 10 سانتی‌متر به روش تر¹ (Wang et al., 2013 a,b) پر شد. در پایان هر مرحله، حفره با یک ماسه سبک به دقت پر شد. این کار



شکل 2- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های نفوذ - زهکشی

میانگین کل ستون به دست آمده است، تخمین زده شدند. در اینجا u به صورت تابعی از W در دوره‌های نفوذ و زهکشی در هر چهار شدت بارندگی ترسیم شد. با توجه به نوع بافت خاک به کار رفته در آزمایش، در رطوبت‌های یکسان، هدایت هیدرولیکی مرحله نفوذ آب از زهکشی بیش‌تر است. بنابراین معادله دیفرانسیل به کار رفته در رابطه 17، علامت مثبت خواهد داشت. البته در مطالعه پیشین (Di Pietro et al., 2003)، در یک رطوبت ثابت، مقدار شدت رواناب خروجی در حالت زهکشی بیش‌تر از حالت نفوذ بوده است که این امر در مشاهدات پژوهش حاضر بر عکس می‌باشد که البته علت جابجایی این حالت پس‌ماند به دلیل تفاوت نوع بافت و ساختمان خاک‌های به کار برده شده می‌باشد، جایی که ایشان از خاکی با بافت لومی و با دانه بندی به هم چسبیده 2 تا 4 میلی‌متری استفاده کردند و مسیرهای ترجیحی جریان در ستون خاک توسط کرم‌های خاکی به مدت سه ماه ایجاد شدند. هم‌چنین وان گنوختن، گالاج و همکاران، نیلسون و بیگر، پولوواسیلیس و یانگز، با به کار بردن بافت‌های متفاوت در پژوهش‌های خود به نتایج مشابه و متفاوتی درباره جابجایی چرخه پس‌ماند رطوبت در برابر هدایت هیدرولیکی رسیدند. نتایج ضرایب بهینه‌سازی شده مدل KDW-VG برای مقادیر مختلف شدت بارندگی در جدول شماره 1 ارائه شده است (Nielson and

یکی پایین کیف و برای تعیین مقدار شدت آب خروجی و دیگری برای کل نمونه خاک. به این ترتیب به محض اینکه ترازوی دوم که وزن کل نمونه خاک را نشان می‌دهد عدد ثابتی را نشان داد، می‌توان باران ساز را خاموش نمود و از این لحظه ترازویی که زیر کیف قرار دارد، جریان زهکشی یا فرود هیدروگراف زهکشی را ثبت می‌کند. بدیهی است ترازویی که زیر نمونه خاک قرار دارد در هر لحظه مقدار آب متحرک نمونه‌های خاک و ترازوی دیگر مقدار شدت خروجی از انتهای ستون خاک را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل KDW-VG و تعیین ضرایب مجهول مدل

همان‌طور که اشاره شد برای تعیین ضرایب مجهول مدل مورد استفاده، لازم بود که تابع هدف با استفاده از روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO) کمینه شود. به این ترتیب که پارامترهای l و m و v_w با توجه به رابطه 17 و از طریق کمینه شدن اختلاف بین رابطه

$$u_m \left(\frac{w(z,t) - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \right)^l \left(1 - \left[1 - \left(\frac{w(z,t) - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^m \right)^2 \pm \frac{\partial w(z,t)}{\partial t}$$

با u اندازه‌گیری شده از انتهای ستون خاک و W ای که از

جدول 1- مقدار ضرایب بهینه سازی شده مدل KDW-VG برای مقادیر مختلف شدت بارندگی

l	m	V_w (میلی متر)	RMSE (میلی متر بر ساعت)	مقدار شدت بارندگی (میلی متر بر ساعت)
-1/045840	0/985628	90/135481	0/428490	56/97
-1/034512	0/984676	89/808310	0/682140	107/64
-1/049413	0/988851	89/204788	1/564275	133/01
-1/033427	0/986309	90/900846	1/695637	161/71

مقایسه پیش بینی های مدل با مقادیر آزمایشگاهی (نتایج صحت سنجی مدل)

پس از واسنجی مدل با داده های مربوط به شدت رواناب خروجی در برابر رطوبت حاصل از بارندگی ستون خاک، ضرایب مجهول معادله KDW-VG به دست آمد. با داشتن این ضرایب، اقدام به حل عددی معادله مذکور و مقایسه نتایج آن با مقادیر مشاهداتی مقدار شدت رواناب خروجی از ستون خاک در برابر زمان یا هم آن هیدروگراف خروجی از انتهای ستون خاک شد. شکل شماره 3، داده های آزمایش های بارندگی با شدت های مختلف را در برابر زمان نشان می دهد.

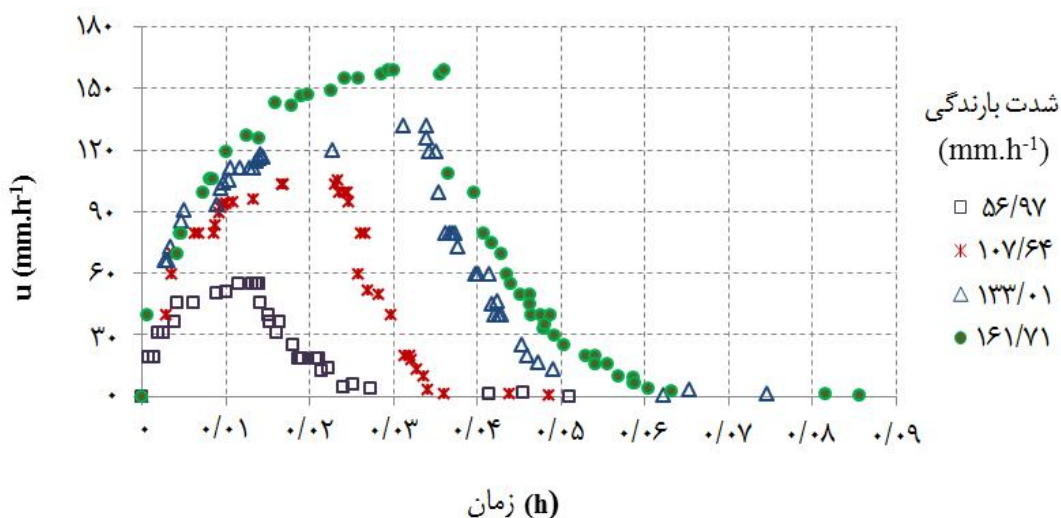
همان طور که از شکل پیداست، برای همه آزمایش های مربوط به نفوذ و بدون در نظر گرفتن شدت بارندگی، هیدروگراف زهکشی همواره یک شکل خاصی دارد: در ابتدا، تغییرات صعودی سریعی به سمت یک بازه بدون شیب دارد و وقتی جریان ورودی متوقف می شود، روند نزولی سریعی خواهد داشت. مرحله نزولی با یک افت ناگهانی اولیه در سرعت خروجی جریان شناخته می شود که با یک مرحله زهکشی با شیب ملایم تر دنبال می شود. نتایج این صحت سنجی، یعنی RMSE بین پاسخ های عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، برای تیمارها و تکرارهای مختلف شدت بارندگی در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2- مقادیر RMSE بین پاسخ های عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، برای تیمارها و تکرارهای مختلف شدت بارندگی

تیمار بارندگی (میلی متر بر ساعت)	RMSE (میلی متر بر ساعت)
56/97	4/2879
107/64	7/5747
133/01	7/5264
161/71	7/0947

در این روش ابتدا برای تیمارها و تکرارهای مختلف مقدار شدت بارندگی ورودی، مدل واسنجی شد. به این ترتیب که این نتایج همگی حاصل 5000 بار تکرار و تلاش¹ الگوریتم بهینه سازی بوده است. هر چند قبل از این تکرار، الگوریتم به پایداری رسیده بود، ولی برای کسب اطمینان از بهترین پاسخ ها این مقدار تکرار انتخاب شد. به عبارت دیگر این پاسخ ها بهترین تلاش الگوریتم بهینه سازی بوده است و نتایج بهتری وجود ندارد و مقادیر RMSE برای داده های ورودی هر تیمار و تکرار، کمینه ترین مقدار هستند. دامنه این مقادیر در مقایسه با مطالعه پیشین (دی پترو و همکاران، 2003) خیلی کمتر بوده است که این نشان دهنده کارایی بهتر مدل توسعه داده شده این پژوهش و هم چنین الگوریتم بهینه سازی به کار رفته در یافتن دقیق تر نقطه کمینه تابع هدف است. هم چنین مدل KDW به روی داده های آزمایشگاهی این پژوهش نیز برازش داده شد که مقادیر RMSE آن برای بهترین پاسخ ها و 5000 بار تکرار و تلاش الگوریتم بهینه سازی و برای شدت های بارندگی 56/97، 107/64، 133/01 و 161/71 میلی متر بر ساعت به ترتیب برابر بودند با: 0/7042، 0/4645، 1/6047 و 1/7057 که با توجه به جدول 1 این مقادیر مورد به مورد بیش تر می باشد که نشان دهنده دقت بیش تر مدل توسعه داده شده این پژوهش یعنی مدل KDW-VG در برازش مشاهدات مربوط به شدت آب خروجی اندازه گیری شده از انتهای ستون خاک در مقابل رطوبت متحرکی که از میانگین کل ستون به دست آمده است، می باشد. در این جا تمام ضرایب الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات و تعداد تکرار و تلاش الگوریتم برای هر دو مدل، برابر در نظر گرفته شد تا نتایج دو مدل قابل مقایسه باشد.

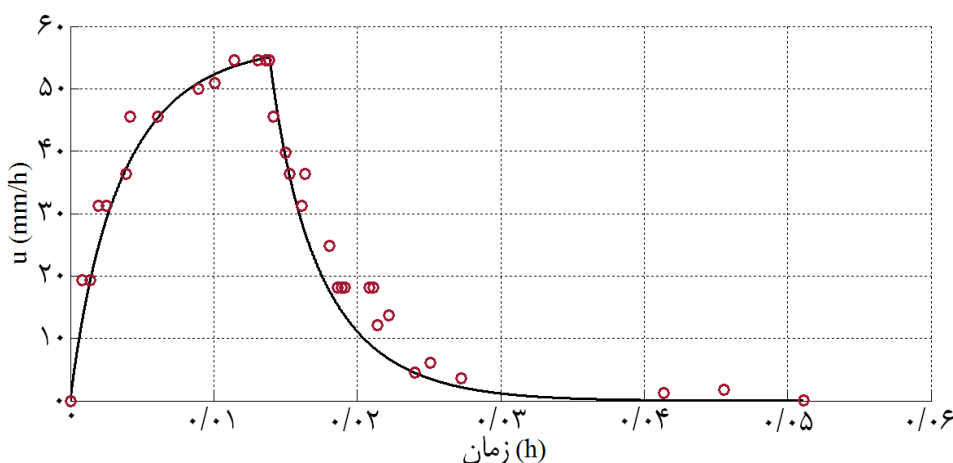
همان طور که از جدول شماره 1 پیداست، در این آزمایش ها، با افزایش شدت بارندگی، مقادیر پارامترهای l و m و V_w ، تغییر معنی داری نداشته است. این موضوع نشان می دهد که پارامترهای مدل توسعه یافته این پژوهش، نسبت به تغییرات شدت بارندگی ورودی حساس نیستند.



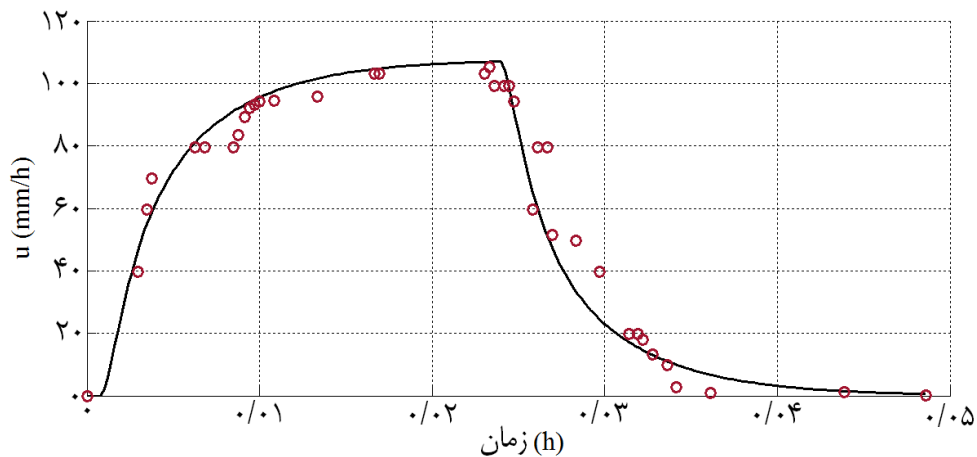
شکل 3- هیدروگراف‌های خروجی از انتهای ستون خاک برای شدت‌های مختلف بارندگی

روند پیش‌بینی دخالت نماید. چون در این پژوهش و در مدل KDW-VG، ترم انتشار به مدل موج سینماتیک اضافه شده است و اثرگذاری این ترم در مدل، در سرعت‌های بیش‌تر کمتر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، هنگامی که سرعت ورودی افزایش می‌یابد، انتشار جبهه خیس شدن کاهش می‌یابد. زیرا در شدت‌های بالاتر، بعضی اثرهای انتشار در مقیاس کوچک، مانند ایستایی محلی آب یا اثر مویبگی در منافذ با اندازه بینابینی ممکن است رخ ندهد و منافذ درشت‌تر در بیش‌تر مواقع در جریان‌های ترجیحی با سرعت بیش‌تر شرکت می‌کنند.

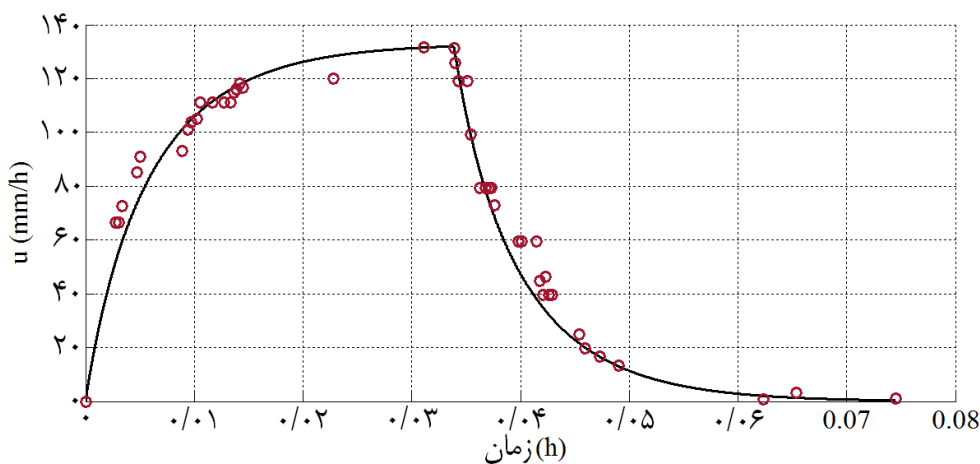
هم‌چنین نتایج مربوط به این مدل سازی عددی در شکل‌های 4 تا 7 نشان داده شده است. در شکل‌های زیر خط ممتد مقادیر پیش‌بینی مدل و دایره‌ها نمایانگر مقادیر مشاهداتی می‌باشند. همان‌طور که از جدول شماره 2 و شکل‌های 4 تا 7 پیداست، نتایج عددی انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. مطابق جدول شماره 2 پیش‌بینی مدل در شدت‌های کم بارندگی ورودی، یعنی شدت 56/97 میلی‌متر بر ساعت بهتر شد. این موضوع این تئوری را ثابت می‌کند که اثر انتشار با افزایش شدت‌های ورودی به تدریج از بین می‌رود و این اثر در سرعت‌های پایین‌تر بهتر می‌تواند در



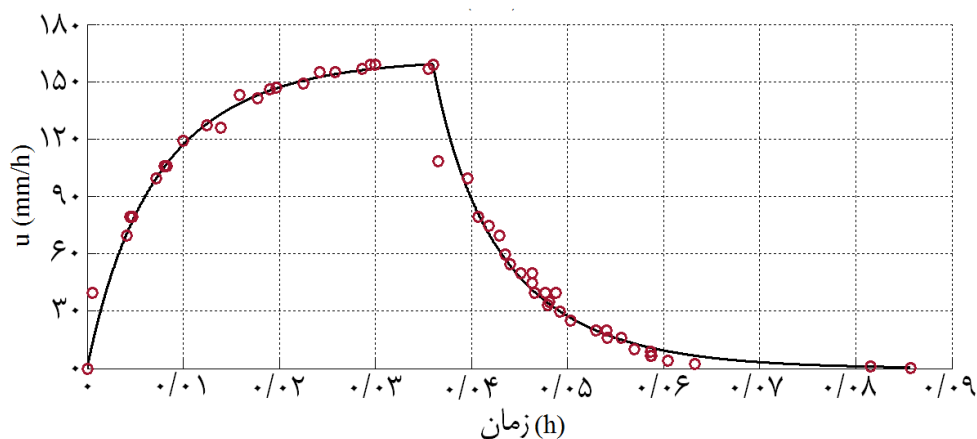
شکل 4- پاسخ عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش‌ها، تیمار شدت بارندگی 56/97 میلی‌متر بر ساعت



شکل 5- پاسخ عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش‌ها، تیمار شدت بارندگی 107/64 میلی‌متر بر ساعت



شکل 6- پاسخ عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش‌ها، تیمار شدت بارندگی 133/01 میلی‌متر بر ساعت



شکل 7- پاسخ عددی مدل KDW-VG و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش‌ها، تیمار شدت بارندگی 161/71 میلی‌متر بر ساعت

انتهای ستون خاک در مقابل زمان را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی نماید. جایی که برای مدل KDW مقادیر RMSE به ترتیب برای شدت‌های بارندگی 161/71 و 133/01، 107/64، 56/97 میلی‌متر بر

هم‌چنین داده‌های پژوهش حاضر با مدل قبلی، یعنی مدل KDW نیز اجرا شد و نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده این پژوهش، یعنی مدل KDW-VG توانسته‌است هیدروگراف خروجی از

می‌شود که برای مطالعات آتی مدل بوردین یا بروکز و کوری (عباسی، 1386) نیز جایگزین مدل وان گنوختن شود تا کارایی این مدل‌ها نیز در ترکیب با مدل موج سینماتیک، انتشار بررسی شود.

منابع

عباسی، ف. 1386. فیزیک خاک پیشرفته. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. چاپ اول.

- Abbasi, F., Javaux, M., Vanclouster, M., Feyen, J. 2012. Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma* 189-190, 480-490.
- Alaoui, A. 2015. Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow. *Journal of Hydrology*. 525: 536-546.
- Chen, C., Wagenet, R.J. 1992. Simulation of water and chemicals in macropore soils: representation of the macropore influence and its effect on soil water flow. *Journal of Hydrology* 130: 105-126.
- Clothier, B.E., Green, S.R., Deurer, M. 2008. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science*. 59: 2-13.
- Coppola, A., Dragonetti, G., Comegna, A., Lamaddalena, N., Caushi, B., Haikal, M.A and Basile, A. 2013. Measuring and modeling water content in stony soils. *Soil and Tillage Research*. 128: 9-22.
- Di Pietro, L., Ruy, S., Capowiez, Y. 2003. Predicting water flow in soils by traveling-dispersive waves. *Journal of Hydrology*. 278.1-4: 64-75.
- Eberhart, R.C., Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory, In *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan. 39-43.
- Flury, M. 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils - a review. *Journal of Environmental Quality*. 25: 25-45.
- Gallage, C., Kodikara, J., Uchimura, T. 2013. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. *Soils and Foundations*. 53.3: 417-430.
- Gerke, H.H. 2006. Preferential flow descriptions for structured soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169.3: 382-400.
- Germann, P.F. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions ASAE* 28: 745-749.
- Germann, P.F., Beven, K. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing

ساعت برابر بودند (4/3441، 7/6765، 7/7237 و 7/1955) که با توجه به جدول 2 این مقادیر مورد به مورد بیش‌تر می‌باشند. دلیل این پیش‌بینی بهتر مدل KDW-VG را می‌توان در این نکته جستجو کرد که در مدل پژوهش حاضر، مدل وان گنوختن که معنی و مفهوم فیزیکی بیش‌تری دارد، جایگزین معادله توانی به کار برده شده در مدل KDW شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل KDW-VG که روند حرکت آب از مسیرهای ترجیحی را توضیح می‌دهد و در واقع حالت توسعه یافته مدل KDW می‌باشد، استفاده شد. در مدل KDW فلاکس جریان یک تابع غیر خطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان تعریف شد. بخش اول این فرض، یک تابع توانی است که در آن فلاکس جریان به رطوبت متحرک وابسته است. در مدل KDW-VG، این معادله توانی با صورت ظاهری معادله وان گنوختن که معنی فیزیکی بیش‌تری دارد، جایگزین شد و مدل ریاضی موج سینماتیک، انتشار - وان گنوختن (KDW-VG) برای اولین بار معرفی شد. در این جا آزمایش‌های نفوذ-زهکشی، با اعمال جریان ترجیحی در یک ستون خاک، انجام شد. این آزمایش‌ها برای تخمین ارتباط بین فلاکس حجمی آب و مقدار آب متحرک انجام شدند. پس از واسنجی مدل و تعیین ضرایب مجهول آن با روش بهینه‌سازی تراکم ذرات، داده‌های هیدروگراف خروجی از انتهای ستون خاک برای صحت سنجی مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل KDW-VG به خوبی می‌تواند هیدروگراف زهکشی و حرکت آب از مسیرهای ترجیحی را پیش‌بینی نماید که این پیش‌بینی برای شدت‌های کم‌تر بارندگی بهتر بوده است. زیرا اثر انتشار با افزایش شدت‌های ورودی به تدریج از بین می‌رود و این اثر در سرعت‌های پایین‌تر بهتر می‌تواند در روند پیش‌بینی دخالت نماید. هم‌چنین داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش برای حالت واسنجی و صحت‌سنجی، روی مدل قبلی، یعنی مدل KDW اجرا شد که نتایج مدل توسعه داده شده این پژوهش (مدل KDW-VG) برای هر دو حالت پاسخ‌های بهتری داشته است. به طور کلی پیشنهاد می‌شود که از معادله توسعه داده شده در این پژوهش در مدل‌های انتقال آب و املاح و به خصوص برای مدل سازی جریان‌های ترجیحی در خاک استفاده شود. این نوع جریان‌ها به ویژه در آبیاری‌های سنگین در خاک‌های درز و شکاف دار که باعث حرکت سریع آب و آلاینده به اعماق پایین‌تر می‌شود، بسیار معمول است. بنابراین به نظر می‌رسد مدل مذکور می‌تواند راهی باشد تا بتوان مقدار و روند پیش‌روی جریان‌های ترجیحی و آلاینده‌های همراه آن را پیش‌بینی نمود و از نتایج این پیش‌بینی‌ها می‌توان در برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی مرتبط با حفظ محیط زیست استفاده کرد. پیشنهاد

- Environmental Modelling & Software, 23 950-956.
- Mdaghri-Alaoui, A. 1998. Transferts d'eau et de substances dans des milieux non saturés à porosité bimodale: expérimentation et modélisation, Thesis, Université Bern, Bern. 143.
- Nielsen, D.R. and Biggar, Y.W. 1961. Measuring capillary conductivity. *Soil Science*. 92:192-193.
- Poulovassilis, A. 1969. The effect of hysteresis of pore-water on the hydraulic conductivity. (Department of Agricultural Chemistry, School of Agriculture, Athens). *Journal of Soil Science*. 20.1: 52-56.
- Rousseau, M., Ruy, S., Di Pietro, L., Angulo-Jaramillo, R. 2004. Unsaturated hydraulic conductivity of structured soils from a kinematic wave approach. *Journal of Hydraulic Research*. 42: 83-91.
- Tsoulos, I.G., Stavrakoudis, A. 2010. Enhancing PSO methods for global optimization. *Applied Mathematics and Computation*. 216.10: 2988-3001.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal*. 44.5: 892-898.
- Wang, Y., Bradford, S.A., Šimůnek, J. 2013 a. Transport and fate of microorganisms in soils with preferential flow under different solution chemistry conditions. *Water Resources Research*. 49.5: 2424-2436.
- Wang, Y., Bradford, S.A., Šimůnek, J. 2013 b. Physical and Chemical Factors Influencing the Transport and Fate of *E. coli* D21g in Soils with Preferential Flow. Doctor of Philosophy Dissertation in Environmental Sciences, Chapter 3, University of California, Riverside, USA.
- Youngs, E.G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Soil Science*. 97. 5: 307-311.
- macropores. *Water Resources Research*. 21: 990-996.
- Germann, P.F. 1990. Preferential flow and the generation of runoff: boundary layer flow theory. *Water Resources Research*. 26.12: 3055-3063.
- Germann, P.F., Di Pietro, L., Singh, V. 1997. Momentum of flow in soils assessed with TDR-moisture readings. *Geoderma* 80: 153-168.
- Hardie, M.A., Lisson, S., Doyle, R.B., Cotching, W.E. 2013b. Evaluation of rapid approaches for determining the soil water retention function and saturated hydraulic conductivity in a hydrologically complex soil. *Soil and Tillage Research*. 130:99-108.
- Jarvis, N.J. 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*. 58.3: 523-546.
- Jianzhi, N., Xinxiao, Y., Zhiqiang, Z. 2007. Soil preferential flow in the dark coniferous forest of Gongga Mountain based on the kinetic wave model with dispersion wave (KDW preferential flow model). *Acta Ecologica Sinica*. 27.9: 3541-3555.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C. 1995. Particle Swarm Optimization. In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ. 6: 1942-1948.
- Koestel, J. and Jorda, H. 2014. What determines the strength of preferential flow in undisturbed soil under steady-state flow? *Geoderma* 217-218, 144-160.
- Majdalani, M., Angulo-Jaramillo, R., Di Pietro, L. 2008. Estimating preferential water flow parameters using a binary genetic algorithm inverse method.

Introducing Developed KDW-VG Model and Its Performance Investigation to Numerical Simulation of Preferential Water Flow in Soil

M. Moradzadeh^{1*}, H. Moazed², S. Boroomandnasab³ and M.R. Khaledian⁴

Received: Nov.03, 2015

Accepted: Feb.24, 2016

Abstract

Rapid preferential water flow occurs in soil macropores such as underground channels formed by worm activity and root plants growth. For process predicting and describing of these types of water flow in soil, Di Pietro et al., (2003) developed and proposed kinematic–dispersive wave (KDW) model. They proposed this model by adding dispersive term to kinematic wave model which is strictly convective and was presented by German (1985). The fundamental assumption of this model is that the flux is exclusively a function of the mobile water content but in kinematic–dispersive wave model with its additional dispersive term, it is assumed that the flux is some non-linear function of the mobile water content and its first time derivative. The first term of this assumption is a power function where the flux is depended to mobile water content. This equation is just a mathematic equation and has not the strong physical meaning. In this research, this power function is substituted by the shape of van Genuchten equation which has an acceptable physical meaning and the kinematic dispersive wave- van Genuchten (KDW-VG) is introduced for the first time. At first the model coefficients were optimized using particle swarm optimization (PSO) method and after that the model was validated by experimental observation of hydrograph of rainfall which was passed through the preferential routes of physical model and was recorded from the bottem of soil column. For creating the preferential pathways in the soil profile, a soil column of coarse sand with diameter of 1.4 cm was embedded in the center of a soil column with diameter of 160 mm and height of 300 mm. The results showed that the numerical model has very good agreement with the experimental observations and the RMSE amount between observations and the model prediction was lesser compared with last researches.

Keywords: Physical model, Porous media, Mathematical modeling, Optimization, Rainfall hydrograph

1- PhD student of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran

2,3- Professor at Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran

4- Faculty of Agricultural Sciences, Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

(* - Corresponding Author Email: Moradzadeh.Mostafa@gmail.com