



دانشگاه گیلان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و سوم، شماره سوم، ۱۳۹۵  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## بررسی حرکت آب از مسیرهای ترجیحی خاک با استفاده از مدل توسعه داده شده کینماتیک، انتشار – وان گنوختن: مطالعه با روش بهینه‌سازی سراسری

\*مصطفی مرادزاده<sup>۱</sup>، سعید برومندنسب<sup>۲</sup>، هادی معاضد<sup>۳</sup> و محمدرضا خالدیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، آستاند گروه مهندسی آبیاری و زهکشی،

دانشگاه شهید چمران اهواز، <sup>۲</sup>دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۳

### چکیده

**سابقه و هدف:** امروزه مشکل آلودگی آب و خاک یکی از عوامل تهدیدکننده پایداری تولیدات کشاورزی و حیات انسان و سایر موجودات زنده است. همچنین جریان ترجیحی آب و املاح، یکی از فرآیندهای معمولی در خاک‌های اشباع و غیراشباع می‌باشد که به‌طور معمول سبب حرکت سریع آلاینده‌ها و در نتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. از این رو مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده‌ای در فیزیک خاک و هیدرولوژی برای پیش‌بینی حرکت جریان‌های ترجیحی آب و آلاینده‌ها در نواحی غیراشباع خاک استفاده می‌شوند. جریان‌های ترجیحی حاصل حرکت آب از خلل و فرج درشت خاک، مانند سوراخ و کانال‌های زیرزمینی هستند که با فعالیت کرم‌ها و یا رشد ریشه گیاهان به وجود می‌آیند و سبب انتقال سریع آب و آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی و در نتیجه آلودگی آن‌ها می‌شوند. برای پیش‌بینی روند و توضیح این نوع جریان‌ها در خاک، در اینجا مدل ریاضی توسعه‌یافته موج کینماتیک، انتشار- وان گنوختن (KDW-VG) که حاصل نوآوری این پژوهش می‌باشد، معرفی می‌شود.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش آزمایش‌ها به‌صورت چهار بارندگی با شدت‌های ۵۶/۹۷، ۱۰۷/۶۴، ۱۳۳/۰۱ و ۱۶۱/۷۱ میلی‌متر بر ساعت که بر یک ستون خاک می‌بارید انجام شد و شدت آب خروجی از انتهای ستون خاک در مقابل رطوبت متحرک کل ستون ثبت می‌شد. ضرایب مدل با کمینه کردن تابع خطای بین مقادیر مشاهداتی آزمایش و معادله پیش‌بینی شدت جریان با روش بهینه‌سازی سراسری تراکم ذرات (PSO) تعیین شدند. برای رسیدن به بهترین نتایج و کمینه‌ترین مقادیر تابع خطا، راهکارهای زیادی آزمون شد و مقادیر مختلفی برای  $C_1$  و  $C_2$  که به ترتیب ضرایب فردی و اجتماعی الگوریتم بهینه‌سازی هستند و در ایجاد نسل‌های بعدی پاسخ‌های پیشنهادی الگوریتم دخالت دارند، انتخاب و امتحان شد و همچنین معادله‌های مختلفی به‌عنوان وزن اینرسی،  $w$  که برای کنترل سرعت حرکت ذرات یا پاسخ‌ها در فضای جستجو به کار می‌رود، امتحان شد.

**یافته‌ها:** پس از به‌کار بردن مقادیر مختلفی برای  $C_1$  و  $C_2$ ، سرانجام مقادیر  $1/2$  و  $2/4$  به ترتیب برای  $C_1$  و  $C_2$  منجر به بهترین پاسخ‌ها یعنی کم‌ترین مقدار تابع خطا شدند. همچنین برای بهینه‌سازی، پس از بررسی نتایج معادله‌های

\* مسئول مکاتبه: [moradzadeh.mostafa@gmail.com](mailto:moradzadeh.mostafa@gmail.com)

مختلف، سرانجام از رابطه وزن اینرسی کاهش یابنده خطی برای تعیین وزن اینرسی استفاده گردید. همچنین با توجه به نتایج، در همه شدت‌های بارندگی، الگوریتم بهینه‌سازی پس از حدود ۳۵۰۰ تلاش و ایجاد نسل‌های متوالی به بهترین پاسخ دست یافت.

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی نتایج نشان داد که الگوریتم به‌کار رفته توانسته است در مدت زمان کوتاه و با دقت قابل‌قبولی ضرایب مدل عددی کینماتیک، انتشار-وان‌گنوختن را تعیین نماید.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال آلاینده، بهینه‌سازی تراکم ذرات، محیط متخلخل، مدل عددی، مسیرهای ترجیحی مصنوعی

### مقدمه

که جریان را به جلو می‌رانند (فشار و جاذبه) و نیروهای مقاومت (اصطکاک جداره‌های خارجی ذرات خاک و جریان آب) که خلاف نیروهای قبلی عمل می‌کنند، تغییر اینرسی کل مومنتوم خطی مربوط به آب نفوذکننده را تعیین می‌کنند و در نتیجه میانگین سرعت آب در خلل و فرج خاک به‌دست می‌آید. وقوع هر کدام از این نیروها در جریان آب، به اندازه ذرات و در نتیجه به رفتار هیدرولیکی که با اندازه‌های متفاوت ذرات خاک تغییر می‌کند، بستگی دارد. جرمن (۱۹۸۵) و (۱۹۹۰) و چن و واگنت (۱۹۹۲)، رابطه‌ای بین متوسط فلاکس آب و ناحیه متحرک آب در منافذ قابل زهکشی استخراج کردند (۳، ۹، ۱۰). هر دو مدل به یک رابطه غیرخطی بین فلاکس و مقدار آب متحرک منجر شدند. مجموع این رابطه‌ها به همراه قانون پیوستگی به مدل موج کینماتیک<sup>۱</sup> (KW) برای توصیف فرآیند جریان در منافذ قابل زهکشی منجر می‌شود (۱۰). اگرچه مدل موج کینماتیک معمولاً جریان‌های ترجیحی را بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند ولی تقریباً به خوبی جریان آب متحرک را در خاک‌های ساختمان‌دار نشان می‌دهد (۱۱، ۱۹). از طرفی مدل موج کینماتیک به‌شدت توده‌ای<sup>۲</sup> است و بنابراین قادر نیست اثر انتشار<sup>۳</sup> را به حساب آورد. به این دلیل که فرضیات اساسی این مدل، این بوده است

مطالعه حرکت آب در خاک برای پیش‌بینی حرکت آلاینده‌ها امری ضروری است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که حرکت عمقی آب در خاک بیش‌تر به‌علت وجود مسیرهای ترجیحی جریان می‌باشد. در خاک‌های ناهمگن و ساختمان‌دار و خاک‌های درز و شکاف‌دار، جریان آب به‌طور معنی‌داری سریع‌تر از ماتریکس خاک حرکت می‌کند (۲۵). به‌طور مثال این نوع جریان‌های ثقلی آب از میان درز و شکاف‌های ایجاد شده در خاک که به‌وسیله ریشه گیاهان ایجاد می‌شود، رخ می‌دهد (۱۶). آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهند که جریان‌های ترجیحی سبب ایجاد انشعابات متعدد در پروفیل خاک و در نتیجه نگهداشت ناچیز آب می‌شوند (۲). به‌طور کلی جریان ترجیحی به طرز معنی‌داری حرکت آب و املاح را در محیط خاک سرعت می‌بخشد (۱۷). بنابراین جریان‌های ترجیحی بر محصولات و امنیت اکولوژی تأثیر گذاشته‌اند (۱۴). املاحی که به‌وسیله این عمل منتقل می‌گردند، باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند (۷) و به‌طور غیرمستقیم بر میزان و غلظت املاح رواناب نیز تأثیر می‌گذارند. همچنین کودهای شیمیایی به راحتی می‌توانند از طریق درز و شکاف‌های ایجاد شده در خاک به آب‌های زیرزمینی منتقل شوند (۳۳). از طرفی توزیع اندازه‌های دانه‌های خاک شامل گستره پیوسته‌ای از ریزدانه‌ها تا درشت‌دانه‌ها می‌شود. تعادل بین نیروهایی

1- Kinematic wave model  
2- Convective  
3- Dispersive

$$c = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_t = \text{const } t} \quad (4)$$

در رابطه‌های ۳ و ۴،  $w$ ، مقدار رطوبت حجمی متحرک آب در خاک،  $w_t$  مشتق اول این رطوبت نسبت به زمان و  $u$  فلاکس آب می‌باشد. همچنین در این جا فرض می‌شود که منافذ ریز کاملاً اشباع می‌باشند و بنابراین هیچ آب قابل تبدالی بین دو نوع منفذ (آب بین میکروپورها و تخلخل قابل زهکشی) وجود ندارد. همچنین فرض می‌شود که فلاکس آب،  $u$ ، تابعی غیرخطی از  $w$  و  $w_t$  باشد، مانند زیر:

$$u = u(w, w_t) = f(w) + g(w_t) \quad (5)$$

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 ماکروپور و  $b$ ، ضریب رسانایی و بعد آن برابر با  $[LT^{-1}]$  و  $v_w$  نیز انتشارپذیری آب و بعد آن برابر است با  $[L]$  و همه اعداد مثبتی هستند، رابطه ۵ را به صورت زیر نیز می‌توان نمایش داد:

$$u(z, t) = bw(z, t)^a \pm v_w \frac{\partial w(z, t)}{\partial t} \quad (6)$$

با این توضیح که علامت منفی برای حالتی است که در رطوبت‌های یکسان، هدایت هیدرولیکی زهکشی از مرحله نفوذ آب بیش‌تر باشد و مثبت برای حالتی که در رطوبت‌های یکسان هدایت هیدرولیکی مرحله نفوذ آب از زهکشی بیش‌تر است. از رابطه ۶، سرعت سیگنالی  $c$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$c(w) = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_t = \text{const } t} = abw^{a-1} \quad (7)$$

همچنین:

$$v_u = c(w) v_w \quad (8)$$

که شدت جریان منحصرأ تابعی از مقدار آب متحرک می‌باشد. از همین روی، مدل موج کینماتیک-انتشار<sup>۱</sup> (KDW) به وسیله دی‌پترو و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد شد تا دقیق‌تر بتواند جریان‌های ترجیحی را از میان منافذ قابل زهکشی توصیف کند (۵). در این مدل، عبارت انتشار به مدل موج کینماتیک اضافه و در آن فرض شد که شدت جریان یک تابع غیرخطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان می‌باشد. بخش اول این فرض یک تابع توانی است که در آن شدت جریان به رطوبت متحرک وابسته است و بخش دوم آن یک معادله دیفرانسیل است که پدیده پسماند رطوبتی در مقابل هدایت هیدرولیکی آب در خاک را مدل می‌کند. به نظر می‌رسد که معادله توانی به کار رفته شده توسط دی‌پترو و همکاران (۲۰۰۳)، صرفاً یک معادله ریاضی است و از معنی و مفهوم فیزیکی چندانی برخوردار نیست (۵). در این پژوهش این معادله توانی با صورت ظاهری معادله وان‌گنوختن که معنی فیزیکی قابل‌قبولی دارد جایگزین شد و مدل ریاضی موج کینماتیک، انتشار-وان‌گنوختن<sup>۲</sup> (KDW-VG) برای اولین بار معرفی شد. در ادامه به معرفی کامل این مدل توسعه‌یافته پرداخته می‌شود.

**تئوری مدل موج کینماتیک-انتشار (KDW):** مدل موج انتشار-کینماتیک که توسط دی‌پترو در سال ۲۰۰۳ ارائه شد به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial z} = v_u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

که در آن،

$$v_u = c v_w \quad (2)$$

$$v_w = \left. \frac{\partial u}{\partial w_t} \right|_{w = \text{const } t} \quad (3)$$

1- Kinematic dispersive wave

2- Kinematic dispersive wave- van Genuchten

بنابراین مدل به سه پارامتر  $a$ ،  $b$  و  $v_w$  بستگی دارد. در اینجا،  $u(z, t)$  [mm h<sup>-1</sup>] فلاکس آب در زمان  $t$  و عمق  $z$  می‌باشد و  $a$  شاخص توزیع جریان در ماکروپور،  $b$  [mm h<sup>-1</sup>] یک ضریب رسانایی و  $v_w$  [mm] ضریب انتشارپذیری آب می‌باشد.

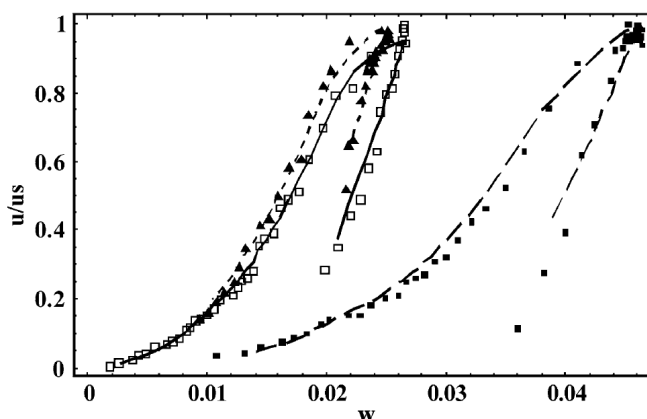
توسعه مدل KDW در ترکیب با مدل وان‌گنوختن و معرفی مدل توسعه‌یافته KDW-VG: همان‌طور که اشاره شد دی‌پترو در سال ۲۰۰۳ از رابطه ۶ برای مدل کردن فلاکس  $u$  استفاده نمود که در آن  $\pm v_w \frac{\partial w(z, t)}{\partial t}$  عبارت اصلاح‌کننده مدل کردن  $u$  در حالت پسماند و  $bw(z, t)^a$  یک معادله توانی است که به نظر می‌رسد از روی شکل توانی تغییرات فلاکس  $u$  نسبت به مقدار آب متحرک،  $w$ ، انتخاب شد (شکل ۱).

با توجه به فرض‌های بالا،  $c$  به شکل اولیه مدل کینماتیک که توسط جرمن (۱۹۸۵، ۱۹۹۰) ارائه شد و در جایی که او از  $g(w_i)$  صرف‌نظر کرد، تغییر پیدا می‌کند (۹، ۱۰). با استفاده از  $w = \left(\frac{u}{b}\right)^{\frac{1}{a}}$  و با ترکیب با رابطه‌های ۱، ۶ و ۸ معادله موج کینماتیک-انتشار به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} + ab^{\frac{1}{a}} u(z, t)^{\frac{a-1}{a}} \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = \dots \quad (9)$$

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

که در آن،  $v_u = cv_w$



شکل ۱- فلاکس نسبی ( $\frac{u}{u_s}$ ) در مقابل مقدار آب متحرک برای سه شدت ورودی ( $u_s$ ). علامت‌ها مربوط به فلاکس‌های اندازه‌گیری شده هستند و خطوط به مقادیر برازش داده شده با رابطه ۶، (۵) مربوط می‌شوند.

Figure 1. Relative flux ( $\frac{u}{u_s}$ ) vs. mobile water content for the three input intensities ( $u_s$ ). Symbols are for measured fluxes and lines for fitted values to equation 6, (5).

این عبارت با شکل ظاهری مدل وان‌گنوختن جایگزین شد تا بر معنی فیزیکی رابطه ۶ افزوده شود.

تا آن‌جا که از شکل ۱ نیز پیدا است، منحنی‌ها از صورت یک معادله توانی پیروی می‌کنند و عبارت توانی رابطه ۶ یعنی  $bw(z, t)^a$  بیش‌تر یک مفهوم ریاضی است و کم‌تر معنی فیزیکی می‌دهد. در اینجا

مدل وان گنوختن: رابطه وان گنوختن معروفترین رابطه هدایت هیدرولیکی غیراشباع است (۱، ۴، ۱۲، ۲۷). این رابطه پایه فیزیکی دارد و بر توزیع اندازه منافذ خاک استوار می باشد و به صورت زیر ارایه می شود:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left( 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (10)$$

که در آن،  $n > 1$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (11)$$

$$S_e = \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \quad (12)$$

در رابطه های بالا،  $S_e$  اشباع نسبی یا درجه اشباع،  $K(S_e)$  و  $K_s$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اشباع  $[L.T^{-1}]$ ، پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک و  $m$  و  $n$  پارامترهای برازش منحنی هستند. همچنین  $w$  رطوبت،  $w_r$  رطوبت باقی مانده و  $w_s$  رطوبت اشباع خاک می باشند. از آنجایی که فلاکس  $u$  از نظر معنی فیزیکی و ابعادی همانند 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 رابطه ۶ یعنی  $bw(z,t)^a$  استفاده می شود و با توجه به شرایط آزمایش ها، برخی تغییرات جزئی در تعاریف پارامترهای ورودی مدل وان گنوختن لحاظ می شود. در رابطه ۱۰ 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 این که  $S_e$  مقداری نرمال شده و بی بعد است، در این پژوهش نیز با بازتعریف پارامترهای کسر  $S_e$

به صورت زیر این موضوع رعایت شده است و در اینجا نیز مقدار  $S_e$  همواره بین صفر و یک تغییر می کند. در اینجا به جای  $w_r$ ، مقدار کمینه رطوبت های مشاهده شده در آزمایش ( $w_{min}$ ) و به جای  $w_s$  و از آنجایی که آزمایش ها در شرایط غیراشباع انجام می شد مقدار بیشینه رطوبت های مشاهده شده در هر آزمایش ( $w_{max}$ ) تعریف می شود. 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 بیش تری دارد و صرفاً یک تابع توانی ریاضی نیست. بنابراین فرم کلی معادله وان گنوختن برای مدل کردن فلاکس  $u$  و با در نظر گرفتن بخش پسماند (افزودن عبارت دوم رابطه ۶ یعنی  $\pm v_w \frac{\partial w(z,t)}{\partial t}$ ) به صورت زیر تعریف می شود:

$$u(z,t) = u_{in} \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^l \times \dots \quad (13)$$

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

همان طور که پیش تر اشاره گردید، مقدار  $c$

در مدل KDW برابر است با:  $\left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_r = \text{constant}}$ . بنابراین با مشتق گیری از رابطه ۱۳، مقدار  $c$  در مدل KDW-VG به صورت زیر محاسبه می شود:

$$(14)$$

$$c(w) = \left. \frac{\partial u}{\partial w} \right|_{w_r = \text{constant}} = \frac{l \times u_m (w(z,t) - w_{min})^{l-1}}{(w_{max} - w_{min})^l} \times \left( 1 - \left[ 1 - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right)^2 + \frac{2u_m}{w_{max} - w_{min}} \left( 1 - \left[ 1 - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right) \times \left( 1 - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^{m-1} \times \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m} + l-1}$$

بنابراین این پژوهش اولین تلاش برای بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای مدل مذکور، با هدف پیدا کردن کمینه سراسری تابع خطا می‌باشد. روش‌های سراسری دارای این مزیت هستند که از بهینه‌سازی‌های محلی بگریزند. اگرچه، این مزیت از طریق تعداد بسیار زیادی از ارزیابی‌های تابع هدف به دست می‌آید (۲۴). پارامترهای مجهول مدل، یعنی ضرایب  $m$  و  $l$  و پارامتر  $v_w$ ، از طریق کمینه شدن اختلاف بین پاسخ‌های رابطه ۱۳ و  $u$  اندازه‌گیری شده از انتهای ستون خاک و رطوبت متحرکی که از میانگین کل ستون اندازه‌گیری شده است، تعیین می‌شود. در اینجا  $u$  به صورت تابعی از  $w$  در دوره‌های نفوذ و زهکشی ترسیم می‌شود. بنابراین برای تخمین پارامترهای رابطه ۱۵، خطای جذر میانگین مربعات<sup>۳</sup> (RMSE) بین داده‌های آزمایشگاهی و فلاکس پیش‌بینی شده با رابطه ۱۳ مطابق زیر با استفاده از روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO) کمینه می‌شود.

$$RMSE = \dots \quad (18)$$

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

که در آن،  $N$ ،  $u_i$  و  $w_i$  به ترتیب برابر هستند با تعداد مشاهدات آزمایشگاهی، فلاکس‌های مشاهداتی در انتهای ستون خاک در زمان  $i$  و میانگین اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در زمان  $i$ .

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

در اینجا نیز مقدار  $v_u$  به صورت قبل در نظر گرفته می‌شود، یعنی برابر است با:  $v_u = cv_w$ . بنابراین تمام پارامترهای مدل KDW-VG مشخص شدند. بنابراین مدل مذکور به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial t} + c(w) \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = v_u \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} \quad (15)$$

که در آن،

$$(16)$$

$$c(w) = \frac{\partial u}{\partial w} \Big|_{v_i = \text{constant}} = \frac{l \times u_m (w(z,t) - w_{min})^{l-1}}{(w_{max} - w_{min})^l} \\ \times \left( l - \left[ l - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right]^2 \right) + \frac{2u_m}{w_{max} - w_{min}} \left( l - \left[ l - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right] \right) \\ \times \left( l - \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m}} \right)^{m-1} \times \left( \frac{w(z,t) - w_{min}}{w_{max} - w_{min}} \right)^{\frac{l}{m} - l-1}$$

و

$$v_u = c(w) \cdot v_w \quad (17)$$

در این پژوهش با استفاده از روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO)<sup>۱</sup> پارامترهای رابطه ۱۵ و حدود آن برای شرایط مسأله و خاک مورد آزمایش به دست آمد. همه مراحل برنامه‌نویسی و بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> انجام شد. بنابراین مهم‌ترین هدف این پژوهش، تخمین پارامترهای جریان ترجیحی آب مدل KDW-VG با هدف رسیدن به نقطه کمینه سراسری تابع خطا می‌باشد. از آنجایی مدل به کار رفته در این پژوهش حاصل نوآوری این پژوهش است، بنابراین دامنه تغییرات پارامترهای مدل مشخص نیست.

1- Particle Swarm Optimization

2- MATLAB

3- Root mean squared error

$$y_i(t) = \begin{cases} x_i(t) & F(x_i(t)) < F(y_i(t-1)) \\ y_i(t-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

که در رابطه بالا تابع  $F$  مقدار شایستگی هر ذره بر اساس تابع هدف است. بعد از مشخص شدن  $y_i(t)$ ها، می توان مجموعه  $P(t)$  را به صورت زیر تعریف کرد:

$$P(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)\} \quad (20)$$

پس از آن برای حالت کمینه سازی،  $\hat{y}(t)$  یعنی بهترین موقعیت سراسری پیدا شده بین تمام ذرات گروه تا تکرار  $t$  ام، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{y}(t) = y_g(t) = \arg \min_{i=1, \dots, m} F(y_i(t)) \quad (21)$$

برای توضیح بیشتر، عملگر  $\arg \min$  برای تابع فرضی  $f(x)$  به صورت زیر می باشد:

$$\arg \min f(x) = \{x \mid \forall y : f(x) \leq f(y)\} \quad (22)$$

سپس می توان موقعیت هر ذره را بر اساس رابطه های زیر به روزرسانی کرد:

$$v_i^{t+1} = v_i^t + r_1 c_1 (y_i^t - x_i^t) + r_2 c_2 (\hat{y}_t - x_i^t) \quad (23)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (24)$$

که در آن،  $r_1, r_2 \sim U(0, 1)$  به منظور حفظ پراکندگی ذرات، القای خاصیت تصادفی حرکت ذرات و جلوگیری از جهش ناگهانی ذرات PSO به کار برده می شود.  $c_1, c_2$  ضرایب شتاب فردی و اجتماعی

اطلاع از گرادیان تابع هدف ابداع شده است. این روش اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط دو نفر به نام های کندی و ابرهارت معرفی شد (۱۵). این الگوریتم در ابتدا برای شبیه سازی پرواز دسته جمعی پرندگان مورد استفاده قرار می گرفت ولی پس از ساده سازی الگوریتم اولیه مشاهده شد که این الگوریتم در واقع یک نوع عمل بهینه سازی را انجام می دهد و به همین علت می تواند برای حل سایر مسایل بهینه سازی نیز استفاده شود (۶). در این الگوریتم برای حل یک مسأله بهینه سازی، جمعیتی از پاسخ های نامزد با استفاده از یک رابطه ساده به طور تصادفی در دامنه مسأله به حرکت در می آیند و آن را با هدف یافتن پاسخ بهینه سراسری مورد کاوش قرار می دهند (۲۰).

نحوه عمل الگوریتم: فرض کنیم که  $X$  فضای جستجوی الگوریتم PSO، یک فضای جستجوی  $n$ -بعدی و پیوسته باشد. هر ذره در تکرار  $t$  ام الگوریتم PSO دارای سه ویژگی می باشد:  $x(t)$ : موقعیت فعلی ذره در تکرار  $t$  ام،  $v(t)$ : سرعت فعلی ذره در تکرار  $t$  ام،  $y(t)$ : بهترین موقعیت فردی ذره تا تکرار  $t$  ام. میزان شایستگی هر ذره برابر با مقدار تابع هدف به ازای آن تعریف می شود و سپس هر ذره با سرعت  $v$  که مبتنی بر شایستگی ذره و سایر ذرات گروه می باشد، در فضای جستجو حرکت می کند. بهترین موقعیت فردی ذره تا تکرار  $t$  ام،  $y(t)$  بهترین موقعیت فردی ذره تا ابتدا تا تکرار  $t$  ام مشاهده کرده است. حال به راحتی می توان بهترین موقعیت فردی ذره  $i$  ام تا تکرار  $t$  ام، یعنی  $y_i(t)$  را بر اساس رابطه زیر مشخص کرد:

الگوریتم ذکر شده، به جای رابطه ۲۳ از رابطه ۲۵ برای به روز کردن سرعت ذره  $i$  ام استفاده می‌شود:

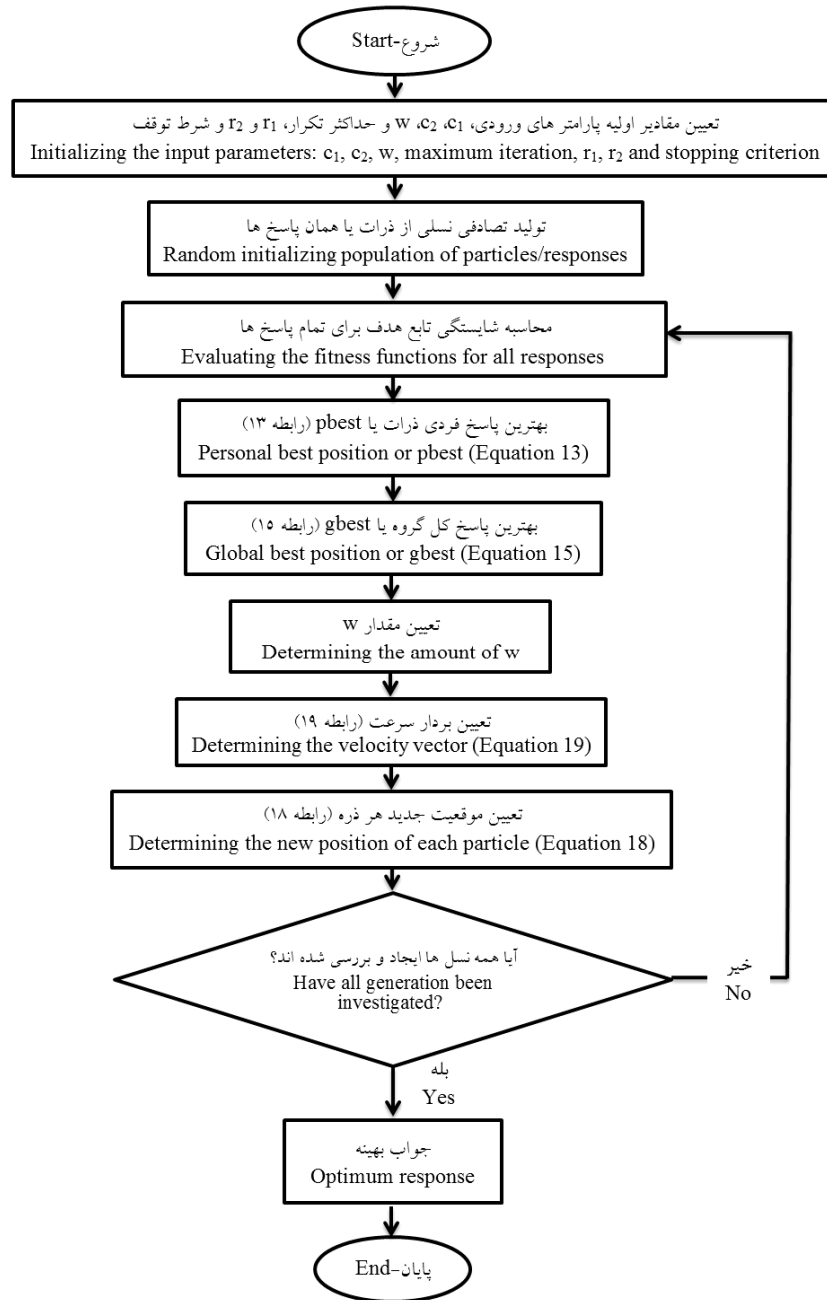
$$v_i^{t+1} = wv_i^t + r_1c_1(y_i^t - x_i^t) + r_2c_2(\bar{y}_i - x_i^t) \quad (25)$$

رابطه ۲۵ در واقع یک رابطه‌ای برای سرعت ذرات ارائه می‌کند که امکان جستجوی مؤثرتر در فضای مسأله را فراهم می‌آورد. با توجه به رابطه ۲۵ بدیهی است که مقادیر بزرگ  $w$  منجر به یک جستجوی سراسری (یعنی جستجویی با گام‌های بزرگ) و مقادیر کوچک  $w$  منجر به یک جستجوی محلی (یعنی جستجویی با گام‌های کوچک) می‌شود. بنابراین در صورت استفاده از مقادیر بزرگ  $w$ ، الگوریتم، به‌طور مرتب فضاهای جدیدی را جستجو خواهد کرد بدون آن‌که تمرکز چندانی بر جستجوی دقیق محلی داشته باشد (۲۰). در حالی‌که با کاهش مقدار  $w$  جستجو بیش‌تر به‌صورت محلی و در اطراف پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده در تکرارهای قبلی انجام خواهد شد. همچنین در ادامه فلوچارت برنامه بهینه‌سازی که در نرم‌افزار متلب نوشته شده است، نشان داده می‌شود:

می‌باشند که مقادیر آن‌ها بر اساس نتایج تجربی، از راه آزمون و خطا تعیین می‌شود. برای شروع کار معمولاً این اعداد حدود ۲ در نظر گرفته می‌شوند (۱۳). به‌عبارت دیگر  $r_1c_1(y_i^t - x_i^t)$  مؤلفه فردی می‌باشد که میزان بازدهی ذره  $i$  ام را نسبت به مراحل قبل تعیین می‌کند و  $r_2c_2(\bar{y}_i - x_i^t)$  مؤلفه اجتماعی می‌باشد که میزان بازدهی ذره  $i$  ام را نسبت به مراحل کل گروه تعیین می‌کند.

**نسخه بهبود یافته الگوریتم PSO:** الگوریتمی که در بخش قبل ارائه شد از اولین نسخه‌های الگوریتم PSO می‌باشد. در صورت استفاده از این الگوریتم مشاهده می‌شود که در بیش‌تر مواقع حین اجرای برنامه سرعت ذرات به سرعت افزایش می‌یابد و در نتیجه الگوریتم نمی‌تواند موقعیت بهینه را به‌طور مؤثر و دقیق به‌دست آورد. برای رفع این مشکل از پارامتری به‌نام وزن اینرسی  $w$ ، استفاده می‌شود روش‌های زیادی برای تخمین آن پیشنهاد شده است که در بیش‌تر مواقع مقدار آن در حین اجرای برنامه کاهش داده می‌شود. بنابراین تنها تفاوت نسخه بهبود یافته الگوریتم PSO با نسخه اولیه آن در این است که با لحاظ کردن تأثیر جمله اینرسی در





شکل ۲- فلوجارت برنامه روش بهینه‌سازی سازی تراکم ذرات.

Figure 2. Program flow chart of Particle Swarm Optimization method.

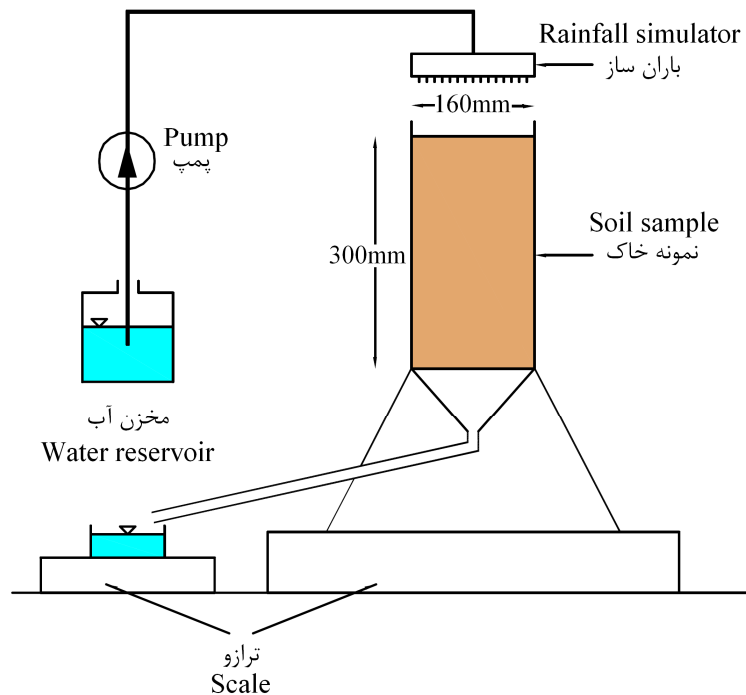
ساعت (۲۲ و ۲۸) کوبیده و از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متری) عبور داده شدند و هدایت هیدرولیکی اشباع آن‌ها نیز به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد (۲۶). پس از انتخاب خاک مناسب برای ساخت مدل، نمونه اصلی که دارای منافذی برای شبیه‌سازی حالت

### مواد و روش‌ها

برای پیدا کردن خاک مناسب برای انجام آزمایش‌ها، نخست نمونه خاک‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها پس از خشک شدن در آون (در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴

سانتی‌متر به روش تر<sup>۱</sup>، (۲۹، ۳۰) پر شد. در پایان هر مرحله، حفره با یک ماسه سبک به دقت پر می‌شد. این کار سه بار تکرار شد تا در نهایت کل نمونه خاک ساخته شد. خاک اصلی به کار رفته در مدل فیزیکی بافتی شنی داشت و دارای ضریب یکنواختی (Cu) برابر ۱/۶۴۵، ضریب دانه‌بندی (Cc) برابر ۱/۱۸۳ و D<sub>۵۰</sub> برابر ۰/۱۴۶ میلی‌متر بود. همچنین ماسه سبکی که برای پر کردن حفره داخلی ایجاد شده در این مدل فیزیکی و نمونه خاک انتخاب شد، قطری بین دو الک ۲۰ و ۱۸ (۰/۸۵ و ۱ میلی‌متر) داشت. پس از ساخت این نمونه خاک، از آن جایی که آزمایش‌ها برای حالت غیراشباع طراحی شده بودند لازم بود که هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک اندازه‌گیری شود تا شدت‌های بارندگی که بعداً اعمال خواهد شد، چیزی کم‌تر از این مقدار باشد. پس از انجام آزمایش بار ثابت، مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک، ۱۷۲/۶ میلی‌متر بر ساعت به دست آمد. ستون خاک ساخته شده پس از آماده شدن و قبل از انجام آزمایش‌های نفوذ، از پایین به مدت ۴۸ 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 میکروپورها، ستون خاک به احتمال زیاد دارای رطوبتی خواهد شد که سبب وجود آن، آب باقی‌مانده در میکروپورها و به واسطه نیروی موینگی 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. سپس همان‌طوری که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک قیف کاملاً به ستون خاک متصل و آب‌بندی شد.

جریان ترجیحی آب در خاک بود و با استفاده از یک ماسه درشت بافت در آن ایجاد شده بود به شیوه زیر ساخته شد (۲۹، ۳۰): ابتدا لوله PVC مورد نظر با قطر خارجی ۱۶۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شد و انتهای آن با دولایه توری پلاستیکی با قطر منافذ ۱ تا ۲ میلی‌متر و به‌وسیله مفتول سیمی کاملاً محکم گردید. به جدار داخلی لوله نیز ماسه لبه تیز چسبانده شد. این عمل باعث افزایش اصطکاک جداره‌ها با خاک می‌شود و احتمال وقوع جریان‌های ترجیحی از جداره‌ها را کاهش می‌دهد. سپس حدود ۱ سانتی‌متر گراول (ماسه بین الک شماره ۶ (۳/۳۵ میلی‌متر) و الک شماره ۱۰ (۲ 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 ۶۰ سانتی‌متر و قطر خارجی ۱/۴ سانتی‌متر در مرکز لوله PVC به‌طور موقت قرار داده شد. پس از آن خاک اصلی آزمایش، به آرامی از اطراف این لوله داخلی که قطر آن ۱/۴ سانتی‌متر بود، داخل لوله PVC ریخته شد. این لوله داخلی بعد از پر شدن لوله اصلی به آرامی از محیط خاک بیرون می‌آید و یک حفره توخالی در خاک ایجاد می‌نماید که بعداً این حفره توخالی با یک ماسه سبک‌تر پر می‌شود تا سبب ایجاد جریان ترجیحی آب در محیط خاک گردد. به این ترتیب که در هر مرحله پس از ریخته شدن خاک اطراف لوله میانی، آب سطل خالی می‌شد و اجازه داده می‌شد که خاک تقریباً خشک شود. بعد از آن لوله به آرامی خارج می‌شد تا به خاک اطراف خود آسیبی وارد نسازد و بلافاصله با یک ماسه سبک‌تر پر می‌شد. برای این‌که از ریزش جداره‌های حفره ایجاد شده به‌وسیله لوله جلوگیری شود، کل ستون در سه مرحله و در هر مرحله به طول ۱۰



شکل ۳- شماتیک مدل آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های نفوذ-زهکشی.

Figure 3. Experimental scheme of the infiltration-drainage experiments.

به‌دست خواهد آمد، رطوبت حجمی متحرک خاک در زمان‌های دلخواه به‌دست می‌آید. در این پژوهش آزمایش‌های نفوذ با شدت‌های باران شبیه‌سازی شده و با چهار میزان ۵۶/۹۷، ۱۰۷/۶۴، ۱۳۳/۰۱ و ۱۶۱/۷۱ میلی‌متر بر ساعت انجام شد. در این‌جا از دو ترازو استفاده شد. یکی پایین قیف 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 باران‌ساز را خاموش نمود و از این لحظه ترازویی که زیر قیف 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.

پس از آماده‌سازی نمونه خاک و مدل فیزیکی، مطابق شکل ۳، قطرات آب روی سطح ستون خاک و با یک دستگاه شبیه‌ساز باران که با فاصله حدود ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک قرار داشت ایجاد شد. مطابق شکل ۳، دستگاه به یک پمپ که از یک مخزن آب تغذیه می‌شد متصل گردید (۵، ۱۸). در این‌جا بایستی توجه کرد که شرایط جریان غیراشباع می‌باشد و شدت‌های به‌کار رفته برای باران باید چیزی کم‌تر از مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک باشد. در اینجا، جریان زهکشی به‌طور پیوسته با یک ترازوی دقیق پایش می‌شد و ترازوی بزرگ‌تر نیز وزن کل ستون خاک مرطوب را در حین بارندگی، یعنی فرآیند نفوذ تا پایان آزمایش و زهکشی کامل ستون خاک، اندازه‌گیری می‌کرد. 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

## نتایج و بحث

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  $V_w$  از طریق رابطه

$$u_n \left( \frac{w(z,t) - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \right)^l \left( l - \left[ l - \left( \frac{w(z,t) - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \right)^m \right]^2 \right) \pm \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} \quad (26)$$

با  $u$  اندازه‌گیری شده از انتهای ستون خاک و  $w$  ای که از میانگین کل ستون تخمین زده شده 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 تجربی مذکور علامت مثبت خواهد داشت (مطابق با رابطه ۱۸). البته در مطالعه پیشین (۵)، 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<sup>۱</sup> به دلیل تفاوت نوع بافت و ساختمان خاک‌های به کار برده شده می‌باشد، جایی که او از خاکی با بافت لومی و با دانه‌بندی به هم چسبیده ۲ تا ۴ میلی‌متری استفاده کرد و مسیرهای ترجیحی جریان در ستون خاک توسط کرم‌های خاکی به مدت سه ماه ایجاد شدند. همچنین وان‌گنوختن، (۱۹۸۰)، گالاج و همکاران (۲۰۱۳)، نیلسون و بیگر (۱۹۶۱)، پولوواسیلیس (۱۹۶۹) و یانگز (۱۹۶۴)، با

به کار بردن بافت‌های متفاوت در پژوهش‌های خود به نتایج مشابه و متفاوتی در این باره رسیدند (۸، ۲۱، ۲۳، ۲۷، ۳۲). در این پژوهش برای بهینه‌سازی، پس از بررسی همه رابطه‌هایی که منابع اشاره شد و همچنین سایر روابطی که در این مجال نمی‌گنجد و بررسی نتایج آن‌ها، سرانجام از رابطه زیر یعنی رابطه وزن اینرسی کاهش یابنده خطی<sup>۲</sup> برای تعیین وزن اینرسی که توسط زین و همکاران در سال ۲۰۰۹ ارائه شد، استفاده گردید (۳۱):

$$W_k = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{iter_{\max}} \times k \quad (27)$$

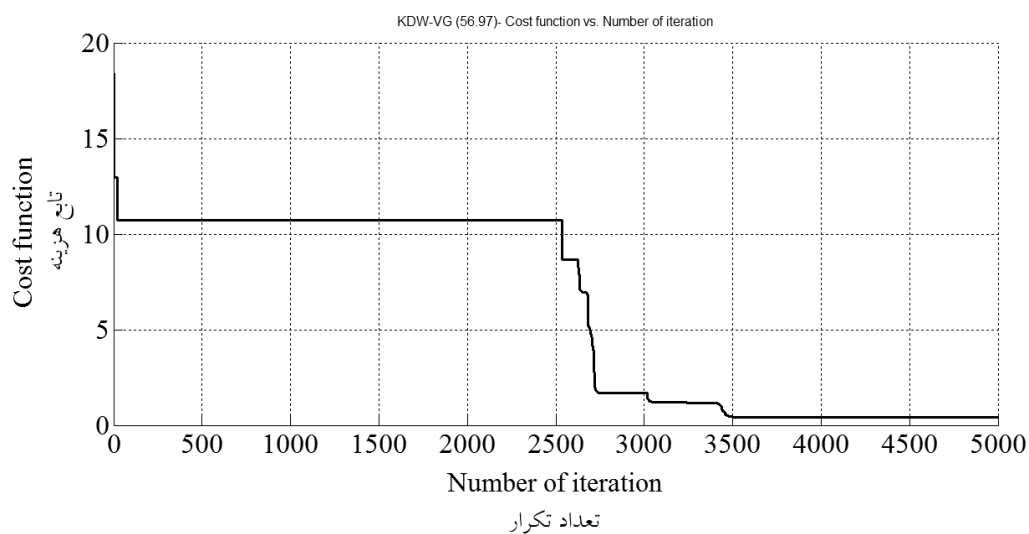
که در آن،  $W_k$  مقدار وزن اینرسی در تکرار  $k$  ام و  $W_{\max}$  و  $W_{\min}$  مقدار وزن اینرسی است که به طور پیش‌فرض در این رابطه و به‌ازای یک مقدار اولیه بیشینه و کمینه در نظر گرفته می‌شود. در اینجا مقادیر ۱/۲ و ۰/۲ به ترتیب به‌ازای  $W_{\max}$  و  $W_{\min}$  انتخاب و منجر به بهترین نتایج شدند. همان‌طور که از رابطه بر می‌آید در تکرار نخست و با توجه به این که حداکثر تکرار در بهینه‌سازی پژوهش حاضر ۵۰۰۰ بوده است مقدار  $W_k$ ، تقریباً همان مقدار بیشینه وزن اینرسی است و در تکرارهای آخر و نزدیک ۵۰۰۰، مقدار وزن اینرسی، همان مقدار کمینه وزن اینرسی می‌شود. با توجه به رابطه ۲۵، این طور نتیجه‌گیری می‌شود که در تکرارهای اول که  $W_k$  بیش‌تر است، الگوریتم شروع به جستجو در فضاها دورتر و گسترده‌تری از پاسخ‌ها می‌کند و در انتها و رفته رفته که به تکرارهای نهایی نزدیک می‌شود، با توجه به این که  $W_k$  به‌طور خطی کاهش یافته و به کمینه‌ترین مقدار خود رسیده است، این بار الگوریتم به‌طور دقیق‌تر و فقط حول و

1- Hysteresis

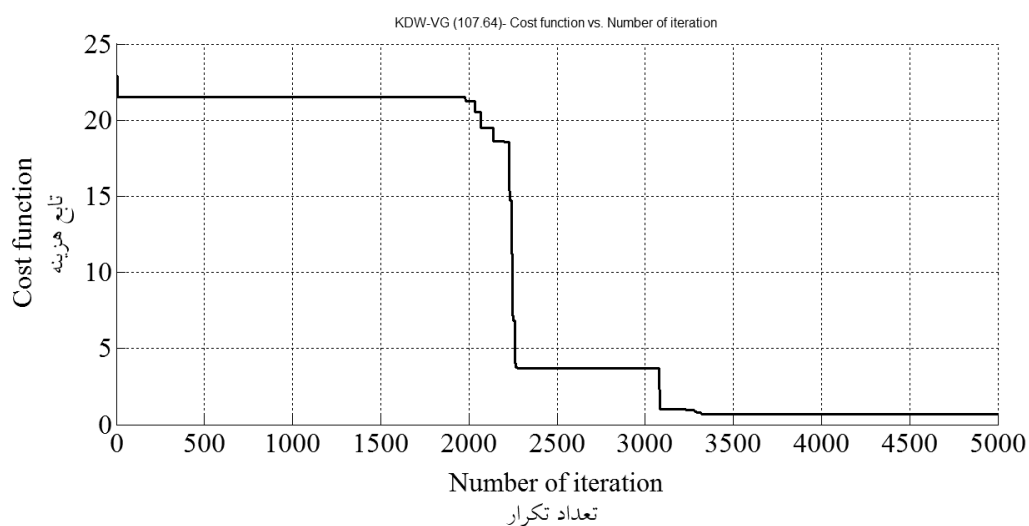
2- Linear Decreasing Inertia Weight

نتایج این بهینه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۱ پیداست، در این آزمایش‌ها، با افزایش شدت بارندگی، مقادیر پارامترهای  $l$  و  $m$  و  $v_w$ ، تغییر معنی‌داری نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که پارامترهای مدل توسعه‌یافته پژوهش نسبت به شدت بارندگی ورودی حساس نیستند. نتایج برازش مدل بر مشاهدات آزمایشگاهی در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ارائه شده است. در این شکل‌ها خط ممتد میزان برازش مدل و مربع‌های تو خالی نیز مشاهدات را نشان می‌دهند. در اینجا محور افقی میزان رطوبت متحرک آب در خاک و محور عمودی میزان شدت بارندگی است.

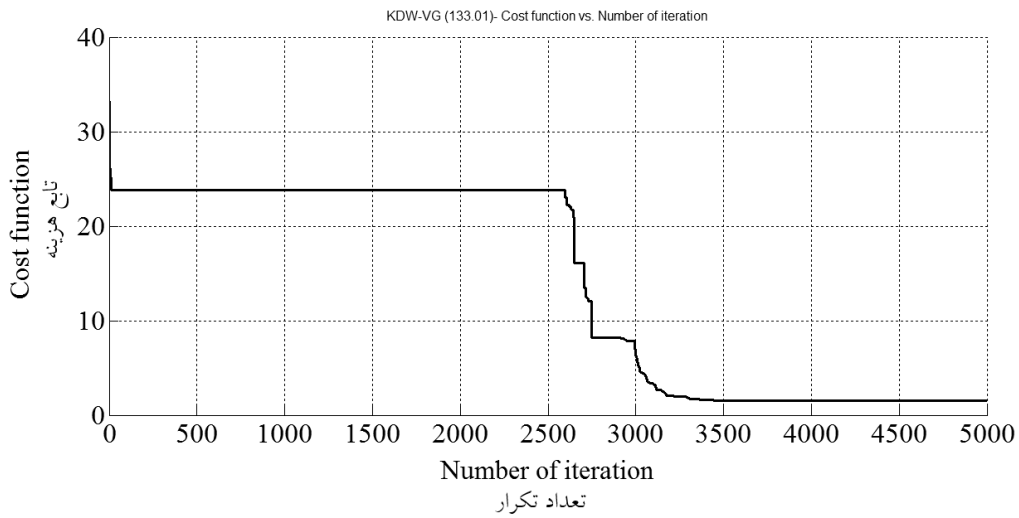
حوش پاسخ بهینه نهایی دنبال کم‌ترین جواب تابع خطا می‌گردد. همچنین با توجه به رابطه ۲۵، مقادیر مختلفی برای  $C_1$  و  $C_2$  که به ترتیب ضرایب فردی و اجتماعی هستند و در ایجاد نسل‌های بعدی پاسخ‌های پیشنهادی الگوریتم دخالت دارند، انتخاب و امتحان شد. و سرانجام مقادیر  $1/2$  و  $2/4$  به ترتیب برای  $C_1$  و  $C_2$  منجر به بهترین پاسخ‌ها شدند. به‌طور کلی در این روش بهینه‌سازی ابتدا برای تیمارها و تکرارهای مختلف مقدار شدت بارندگی ورودی، مدل واسنجی شد. به این ترتیب که این نتایج همگی حاصل ۵۰۰۰ بار تکرار و تلاش<sup>۱</sup> الگوریتم بهینه‌سازی بوده است. هر چند زودتر از این تکرار، الگوریتم به پایداری رسیده بود، ولی برای کسب اطمینان از بهترین پاسخ‌ها این مقدار تکرار انتخاب شد. روند چگونگی رسیدن به بهترین پاسخ‌ها در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل‌ها معلوم است، در همه شدت‌های بارندگی بعد از حدود تکرار ۳۵۰۰، الگوریتم بهترین پاسخ را پیدا کرده است و خط مربوط کاملاً افقی شده است. به عبارت دیگر این پاسخ‌های بهترین تلاش الگوریتم بهینه‌سازی بوده است و نتایج بهتری وجود ندارد و مقادیر RMSE برای داده‌های ورودی هر تیمار و تکرار، کمینه‌ترین مقدار هستند. شکل‌های ۴ تا ۷ مسیر پیدا کردن نقطه بهینه تابع هدف با استفاده از روش PSO برای مقدار شدت‌های مختلف بارندگی را نشان می‌دهند. همان‌طور که پیداست در این شکل‌ها محور افقی نمایانگر تعداد تلاش‌های الگوریتم بهینه‌سازی است و محور عمودی هم میزان تابع خطا، که در اینجا مقدار RMSE به کار برده شده در رابطه ۱۸ می‌باشد و از طریق الگوریتم بهینه‌سازی در هر تلاش محاسبه شده است را نشان می‌دهد.



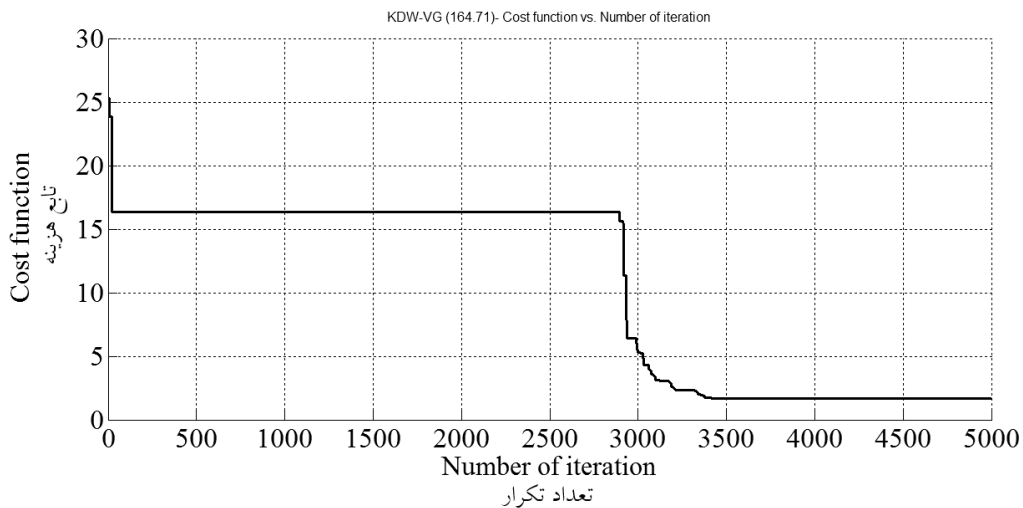
شکل ۴- مسیر پیدا کردن نقطه بهینه تابع هدف با استفاده از روش PSO برای مقدار شدت بارندگی ۵۶/۹۷ میلی‌متر بر ساعت.  
Figure 4. Route finding of objective function using PSO method for rainfall intensity of 56.97 mm h<sup>-1</sup>.



شکل ۵- مسیر پیدا کردن نقطه بهینه تابع هدف با استفاده از روش PSO برای مقدار شدت بارندگی ۱۰۷/۶۴ میلی‌متر بر ساعت.  
Figure 5. Route finding of objective function using PSO method for rainfall intensity of 107.64 mm h<sup>-1</sup>.



شکل ۶- مسیر پیدا کردن نقطه بهینه تابع هدف با استفاده از روش PSO برای مقدار شدت بارندگی ۱۳۳/۰۱ میلی متر بر ساعت.  
**Figure 6. Route finding of objective function using PSO method for rainfall intensity of 133.01 mm h<sup>-1</sup>.**

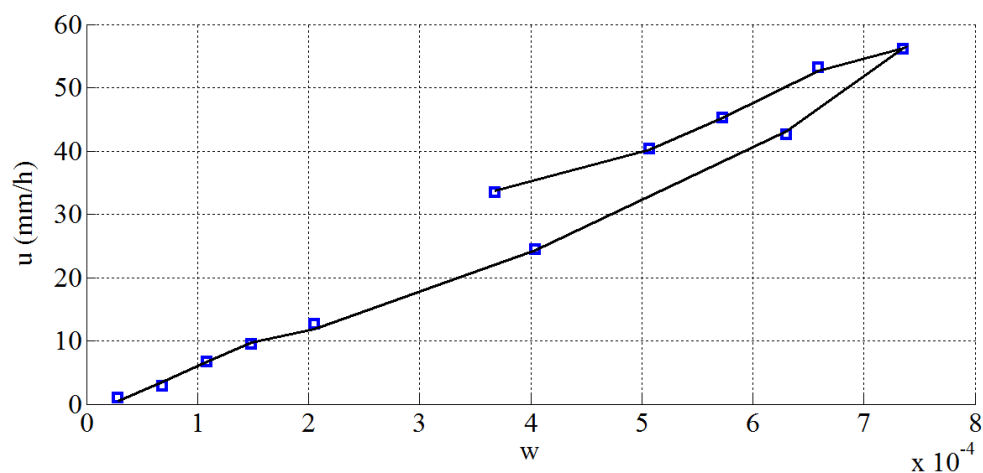


شکل ۷- مسیر پیدا کردن نقطه بهینه تابع هدف با استفاده از روش PSO برای مقدار شدت بارندگی ۱۶۱/۷۱ میلی متر بر ساعت.  
**Figure 7. Route finding of objective function using PSO method for rainfall intensity of 161.71 mm h<sup>-1</sup>.**

جدول ۱- مقادیر بهینه سازی و واسنجی شده مدل KDW-VG برای مقادیر مختلف شدت بارندگی.

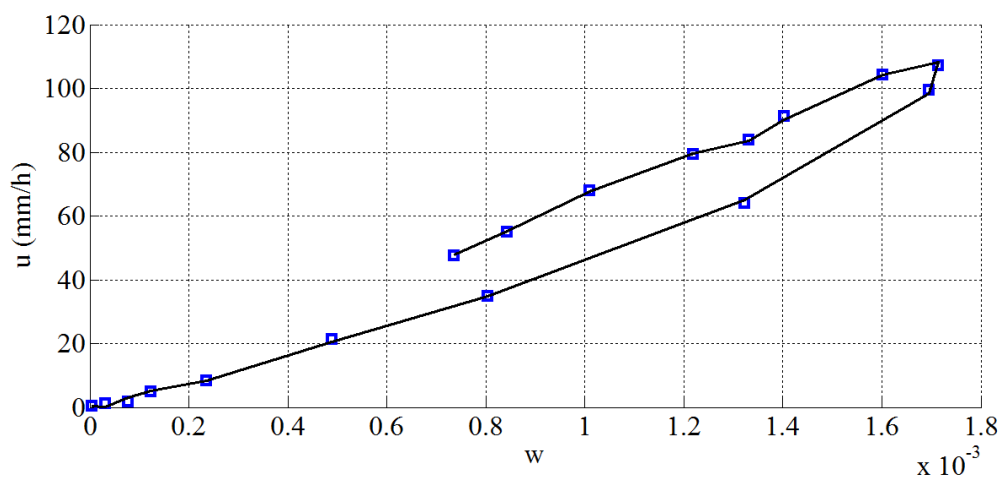
**Table 1. Optimized values of KDW-VG model for different amount of rainfall intensity.**

$l$	$m$	$V_w$ (mm)	RMSE (mm h <sup>-1</sup> ) (میلی متر بر ساعت)	مقدار شدت بارندگی (میلی متر بر ساعت) Rainfall intensity (mm.h <sup>-1</sup> )
-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



شکل ۸- مقدار شدت بارندگی در مقابل مقدار رطوبت حاصل از بارندگی در خاک برای تیمار شدت بارندگی ۵۶/۹۷ میلی‌متر بر ساعت - مدل KDW-VG.

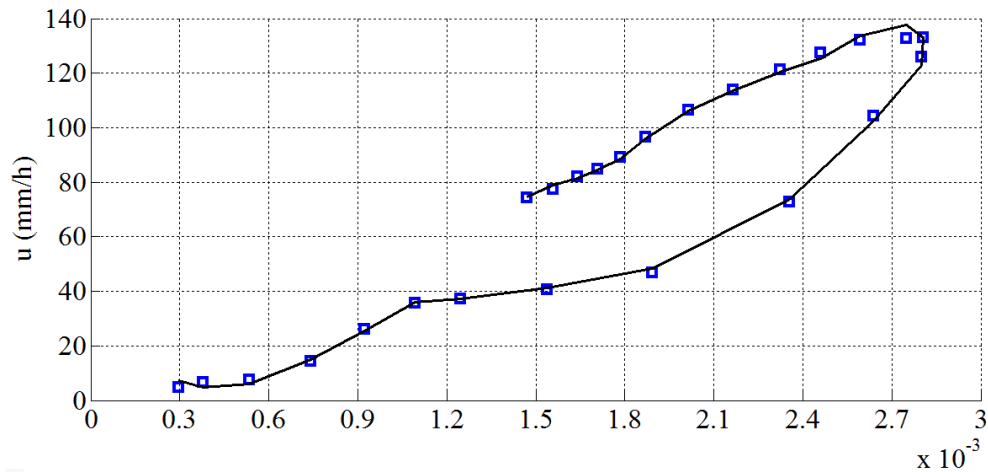
Figure 8. Rainfall intensity vs. water content because of rainfall in soil for treatment of 56.97 mm.h<sup>-1</sup>, KDW-VG model.



شکل ۹- مقدار شدت بارندگی در مقابل مقدار رطوبت حاصل از بارندگی در خاک برای تیمار شدت بارندگی ۱۰۷/۶۴ میلی‌متر بر ساعت - مدل KDW-VG.

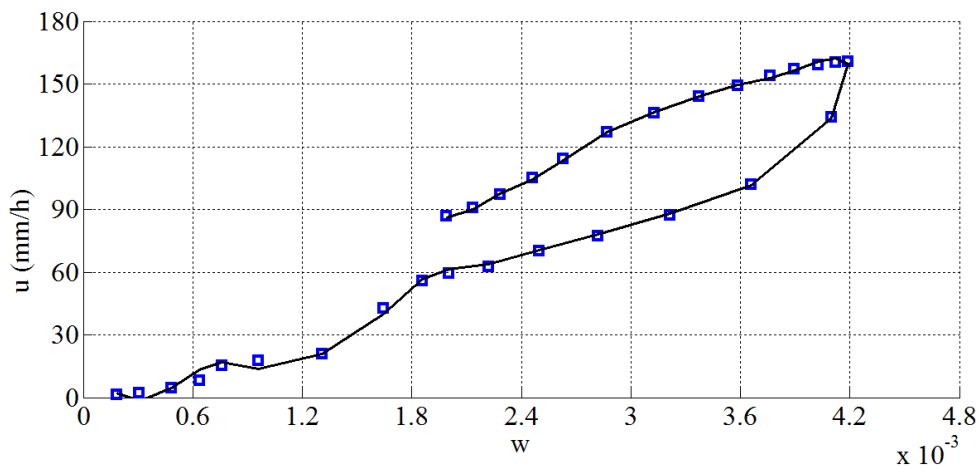
Figure 9. Rainfall intensity vs. water content because of rainfall in soil for treatment of 107.64 mm.h<sup>-1</sup>, DW-VG model.





شکل ۱۰- مقدار شدت بارندگی در مقابل مقدار رطوبت حاصل از بارندگی در خاک برای تیمار شدت بارندگی ۱۳۳/۰۱ میلی متر بر ساعت- مدل KDW-VG.

Figure 10. Rainfall intensity vs. water content because of rainfall in soil for treatment of 133.01 mm.h<sup>-1</sup>, KDW-VG model.



شکل ۱۱- مقدار شدت بارندگی در مقابل مقدار رطوبت حاصل از بارندگی در خاک برای تیمار شدت بارندگی ۱۶۱/۷۱ میلی متر بر ساعت- مدل KDW-VG.

Figure 11. Rainfall intensity vs. water content because of rainfall in soil for treatment of 161.71 mm.h<sup>-1</sup>, KDW-VG model.

### نتیجه گیری

در این پژوهش از مدل KDW-VG که روند حرکت آب از مسیرهای ترجیحی را توضیح می دهد استفاده شد. در واقع این مدل حالت توسعه یافته مدل KDW می باشد. در مدل KDW شدت جریان یک

همان طوری که از شکل های ۸ تا ۱۱ پیداست، برازش رابطه ۱۳ بر داده های آزمایشگاهی بسیار خوب انجام شده است و مدل به خوبی روی مشاهدات برازش داده شده است.

مقادیر مشاهداتی آزمایش و معادله پیش‌بینی شدت جریان کمینه شد. برای این کار مقادیر مختلفی برای  $C_1$  و  $C_2$  که به ترتیب ضرایب فردی و اجتماعی الگوریتم بهینه‌سازی هستند و در ایجاد نسل‌های بعدی پاسخ‌های پیشنهادی الگوریتم دخالت دارند، انتخاب و امتحان شدند و به ترتیب مقادیر  $1/2$  و  $2/4$  برای  $C_1$  و  $C_2$  منجر به بهترین پاسخ‌ها شدند. همچنین سرانجام پس از آزمون چند معادله مختلف، معادله وزن اینرسی کاهش یابنده خطی منجر به بهترین پاسخ‌ها و کمینه‌ترین مقادیر تابع هدف شد. همچنین نتایج نشان داد که در همه شدت‌های بارندگی، الگوریتم بهینه‌سازی پس از حدود ۳۵۰۰ تلاش و ایجاد نسل‌های متوالی به بهترین پاسخ و کمینه‌ترین نتایج بهینه‌سازی دست یافته است. به‌طورکلی نتایج بهینه‌سازی این پژوهش نشان داد که روش بهینه‌سازی تراکم ذرات به خوبی تابع هدف را کمینه کرده است.

تابع غیرخطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان تعریف شد. بخش اول این فرض یک تابع توانی است که در آن شدت جریان به رطوبت متحرک وابسته است. در مدل KDW-VG، این معادله توانی با صورت ظاهری معادله وان‌گنوختن که معنی فیزیکی بیش‌تری دارد، جایگزین شد و مدل ریاضی موج کینماتیک، انتشار-وان‌گنوختن (KDW-VG) برای اولین بار معرفی شد. در اینجا آزمایش‌های نفوذ-زهکشی، در یک ستون خاک که در آن به شیوه‌ای که گفته شد مسیرهای ترجیحی آب در ستون خاک تعبیه شده بود، انجام شد. این آزمایش‌ها برای تخمین ارتباط بین فلاکس آب و مقدار آب متحرک انجام شدند. در این پژوهش از روش بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی و برآورد ضرایب مدل مذکور استفاده شد. در اینجا تابع خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین

### منابع

1. Abbasi, F., Javaux, M., Vanclooster, M., and Feyen, J. 2012. Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*. 189-190: 480-490.
2. Alaoui, A. 2015. Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow. *J. Hydrol.* 525: 536-546.
3. Chen, C., and Wagenet, R.J. 1992. Simulation of water and chemicals in macropore soils: representation of the macropore influence and its effect on soil water flow. *J. Hydrol.* 130: 105-126.
4. 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 & Tillage Research*. 128: 9-22.
5. Di Pietro, L., Ruy, S., and Capowiez, Y. 2003. Predicting water flow in soils by traveling-dispersive waves. *J. Hydrol.* 278: 1-4. 64-75.
6. Eberhart, R.C., and Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. 6th Int. Symp. Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, Pp: 39-43.
7. Flury, M. 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils – a review. *J. Environ. Qual.* 25: 25-45.
8. Gallage, C., Kodikara, J., and 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.
9. Germann, P.F. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions ASAE*. 28: 745-749.
10. Germann, P.F. 1990. Preferential flow and the generation of runoff: boundary layer flow theory. *Water Resources Research*. 26: 12. 3055-3063.

11. Germann, P.F., Di Pietro, L., and Singh, V. 1997. Momentum of flow in soils assessed with TDR-moisture readings. *Geoderma*. 80: 153-168.
12. Hardie, M.A., Lisson, S., Doyle, R.B., and Cotching, W.E. 2013 b. Evaluation of rapid approaches for determining the soil water retention function and saturated hydraulic conductivity in a hydrologically complex soil. *Soil & Tillage Research*. 130: 99-108.
13. Jamalian, A., Fathali, J., and Nezakati, A. 2010. Location problems with Push-Pull objectives. M.Sc. thesis, applied mathematic. Shahrood University of technology, faculty of mathematics. (In Persian)
14. Jianzhi, N., Xinxiao, Y., and 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.
15. Kennedy, J., and Eberhart, R.C. 1995. Particle Swarm Optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ. IV: 1942-1948.
16. Khitrov, N.B., Zeiliger, A.M., Goryutkina, N.V., Omel'chenko, N.P., Nikitina, N.S., and Utkaeva, V.F. 2005. Preferential Water Flows in an Ordinary Chernozem of the Azov Plain. *Eurasian Soil Science*. 42: 7. 757-768.
17. Koestel, J., and Jorda, H. 2014. What determines the strength of preferential flow in undisturbed soil under steady-state conditions? *Geoderma*. 217-218: 144-160.
18. Majdalani, M., Angulo-Jaramillo, R., and Di Pietro, L. 2008. Estimating preferential water flow parameters using a binary genetic algorithm inverse method. *Environmental Modelling & Software*. 23: 950-956.
19. Mdaghri-Alaoui, A. 1998. Transferts d'eau et de substances (bromures, chlorures et bactériophages) dans des milieux non saturés à porosité bimodale: expérimentation et modélisation. PhD Thesis, Soil Science Section, Institute of Geography, University of Berne, Switzerland.
20. Merrikh Bayat, F. 2012. Optimization algorithms inspired by nature. Nas Press. (In Persian)
21. Nielsen, D.R., and Biggar, Y.W. 1961. Measuring capillary conductivity. *Soil Science*. 92: 192-193.
22. O'Kelly, B.C., and Sivakumar, V. 2014. Water content determinations for peat and other organic soils using the oven-drying method. *Drying Technology*. 32: 6. 631-643.
23. Poulouvalis, A. 1969. The effect of hysteresis of pore-water on the hydraulic conductivity. (Department of Agricultural Chemistry, School of Agriculture, Athens). *J. Soil Sci.* 20: 1. 52-56.
24. Rauch, W., and Harremoes, P. 1999. On the potential of genetic algorithms in urban drainage modeling. *Urban Water*. 1: 1. 79-89.
25. Snehota, M., Jelinkova, V., Sacha, J., Frycova, M., Cislerova, M., Vontobel, P., and Hovind, J. 2015. Experimental Investigation of Preferential Flow in a Near-saturated Intact Soil Sample. *Physics Procedia*. 69: 496-502.
26. Tahouni, S. 2007. Principle of geotechnical engineering. Vol. 1, Soil mechanics, Pars Aeen Publications, 11<sup>th</sup> edition.
27. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 5. 892-898.
28. Venkatramaiah, C. 2006. Geotechnical engineering. New age international publisher. Third edition.
29. Wang, Y., Bradford, S.A., and Šimůnek, J. 2013a. Transport and fate of microorganisms in soils with preferential flow under different solution chemistry conditions. *Water Resources Research*. 49: 5. 2424-2436.
30. Wang, Y., Bradford, S.A., and Simunek, J. 2013 b. Physical and Chemical Factors Influencing the Transport and Fate of *E. coli* D21g in Soils with Preferential Flow. *Vadose Zone Journal* Accepted paper. doi:10.2136/vzj2013.07.0120.

31. Xin, J., Chen, G., and Hai, Y. 2009. A Particle Swarm Optimizer with Multistage Linearly-Decreasing Inertia Weight. In Computational Sciences and Optimization CSO. International Joint Conference, 1: 505-508. IEEE.
32. Youngs, E.G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. Soil Science. 97: 5. 307-311.
33. Zhang, Z.B., Peng, X., Zhou, H., Lin, H., and Sun, H. 2015. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve. Soil and Tillage Research. 146: 53-65.



## **Investigation of preferential water flow in soil using developed kinematic dispersive wave- van Genuchten model: Study with global optimization analysis**

**\*M. Moradzadeh<sup>1</sup>, S. Boroomandnasab<sup>2</sup>, H. Moazed<sup>2</sup> and M.R. Khaledian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz,

<sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, University of Guilan

Received: 08/31/2015; Accepted: 01/03/2016

### **Abstract**

**Background and Objectives:** These days the problem of water and soil pollution is one of the factors threatening the sustainability of agricultural production and human's life and other living things. Also, preferential flow of water and solute is a common phenomenon in the natural saturated and unsaturated soil which generally results in fast contaminant transport and thus greatly increases the risk of groundwater contamination. So mathematical models are widely used in soil physics and hydrology for predicting preferential water flow and contaminants transport through the unsaturated zone. Preferential flow which is the cause of water transport in soil macropores such as underground channels formed by worm activity and root plants growth, is the reason of rapid water and contaminants transport to ground water and its contamination. For process predicting and describing of these types of water flow in soil, in this research the kinematic dispersive wave- van Genuchten model is introduced which is the innovation of this research.

**Materials and Methods:** In this research, the experiments were conducted with four different rainfall intensities of 56.97, 107.64, 133.01 and 161.71 mm h<sup>-1</sup>, which were applied on the surface of a soil column and output water fluxes from the bottom of soil column and mobile water content of whole soil column were recorded. Model coefficients were calculated by minimizing the error function between the observed values and something modeled by equation using particle swarm optimization (PSO) method. To achieve the best results and the minimum amount of error function, several solutions were tried and different values for  $c_1$  and  $c_2$  which are the learning factors (weights) or acceleration coefficients of optimization algorithm which interfere to make the next algorithm results and control the personal and global best respectively, were tried and chosen and also several equations as the inertia weight,  $w$  which used to control the particles/results velocities in the search spaces, were tried.

**Results:** After applying several amounts for  $c_1$  and  $c_2$ , finally the amount of 1.2 and 2.4 for  $c_1$  and  $c_2$  respectively, leads to best results and lowest error function. Also for the optimization, after reviewing the results of several different equations, the linear decreasing inertia weight equation was chosen. Based on results, in all rainfall intensities, optimization algorithm could find the best results after 3500 iterations and making frequent generation.

**Conclusion:** Generally, the results have shown that the used algorithm could define the coefficients of kinematic dispersive wave- van Genuchten model in a short time and with reasonable accuracy.

**Keywords:** Artificial preferential pathways, Contaminant transport, Numerical model, Particle swarm optimization, Porous media

---

\* Corresponding Author; Email: moradzadeh.mostafa@gmail.com

