بهینه سازی و برآورد پارامترهای مدل موج کینماتیک- انتشار برای شبیه سازی عددی جریان ترجیحی آب در خاک

مصطفی مرادزاده[1*]، هادی معاضد[2]، سعید برومند نسب[3] و محمد رضا خالدیان[4]

۱*- نویسنده مسئول، دکترای آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۷

چکیده

به طور کلی جریان های ترجیحی در خاک در خلل و فرج درشت خاک رخ می‌دهند. این جریان ها می توانند حجم زیادی از آب به همراه هر نوع آلاینده را در مدت زمان کوتاهی به منابع آب زیر زمینی منتقل کنند. این مساله خود باعث آلودگی منابع آب و خاک خواهد شد و از نظر زیست محیطی و بهداشتی بر زندگی جانداران تأثیر گذار خواهد بود. در این پژوهش نحوه حرکت آب در خلل و فرج درشت خاک با استفاده از یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه بررسی شد. همچنین این حرکت با استفاده از مدل موج کینماتیک- انتشار[1] که یک معادله دیفرانسیل غیر خطی درجه دو می باشد و بهینه کردن ضرایب آن ارزیابی شد. ابتدا ضرایب مدل با استفاده از روش بهینه سازی تراکم ذرات[2] به‌دست آمدند و سپس مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی مربوط به هیدروگراف حاصل از بارندگی و گذار آب از مسیر های ترجیحی مدل فیزیکی که از انتهای ستون خاک برداشت شده بود، مورد صحت سنجی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل عددی به کار رفته تطابق بسیار خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی دارد و این تطابق در شدت های کمتر بارندگی بیشتر است. از آنجایی که در این مدل، سازوکار انتشار لحاظ شده است و اثر انتشار با افزایش شدت های ورودی به تدریج از بین می رود، این اثر در سرعت های پایین تر بهتر می تواند در روند پیش بینی بهتر دخالت نماید. به طور کلی این مدل می تواند راهی باشد تا بتوان مقدار و روند پیشروی جریان‌های ترجیحی و آلاینده‌های همراه آن را پیش‌بینی نمود تا در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی محیط زیستی نسبت به اتخاذ تصمیم‌های مناسب اقدام کرد.

کلید واژه ها: مدل موج کینماتیک- انتشار، جریان ترجیحی آب، شبیه سازی عددی، بهینه سازی، مدل فیزیکی.

Optimization and Parameter Estimation of KDW Model for Numerical Simulating of Preferential Water Flow in Soil

M. Moradzadeh[1*], H. Moazed[2], S. Boroomandnasab[3] and M. Khaledian[4]

1*- Ph.D of Irrigation and Drainage, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

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

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

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

Received: 11 July 2015 Accepted: 29 September 2015

Abstract

Generally soil preferential flow occurs through soil macropores. These flows can transport a large amount of water and any type of pollutant to groundwater in a short time. This issue causes the water and soil pollution and in terms of environmental and health, affect the lives of animal

1 -Kinematic–dispersive wave

2 -Particle swarm optimization

and human. In this study the movement of water in preferential routes in the soil was investigated using a physical model. Also this movement was evaluated using Kinematic–Dispersive Wave (KDW) model which is a second degree non-linear partial differential equation and optimization of its coefficients. At first, the model coefficients were obtained using Particle Swarm Optimization (PSO) method. After that, the model was validated using experimental observation of rainfall hydrograph which was passed through the preferential routes of physical model and was recorded from the bottom of soil column. The results showed that the numerical model has very good agreement with experimental observations, and this prediction is better in lower rainfall intensity. Since dispersive mechanism was applied in this model and the effect of dispersive is disappeared graduatly with increase of input rainfall intensity, this effect in lower velocities causes the model to predict much better the observation. Consequently, this model can be a way to predict the preferential water flow and contaminant in soil to be eligible to make a reasonable decision in environmental management planning.

Keyword: KDW model, Preferential water flow, Numerical simulation, Optimization, Physical model.

مقدمه

جریان ترجیحی آب و املاح، یکی از فرآیند های معمولی در خاک های اشباع و غیراشباع می باشد (شنگ و همکاران[1] ، ۲۰۱۱) که به طور معمول سبب حرکت سریع آلاینده ها می گردد (جترمن و همکاران[2] ، ۱۹۹۷، ریچنبرگر و همکاران[3] ، ۲۰۰۲ و موریس[4] و مونی[5]، ۲۰۰۴). بنابراین جریان های ترجیحی به طرز معنی داری بر زندگی انسان ها، محصولات و امنیت اکولوژی تاثیر گذاشته اند (جیان ژی و همکاران[6] ، ۲۰۰۷). املاحی که به وسیله این عمل منتقل می گردند، باعث آلودگی آب های سطحی و زیرزمینی می گردند (فلوری[7]، ۱۹۹۶) و به طور غیر مستقیم بر میزان و غلظت املاح رواناب نیز تأثیر می گذارند. معمولا توزیع اندازه های دانه های خاک شامل گستره پیوسته ای از ریز دانه ها تا درشت دانه ها می شود. تعادل بین نیروهایی که جریان را به جلو می رانند (فشار و جاذبه) و نیروهای مقاومت (اصطکاک جداره های خارجی ذرات خاک و جریان آب) که خلاف نیرو های 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 نیرو ها در جریان آب، به اندازه ذرات و در نتیجه به رفتار هیدرولیکی که با اندازه های متفاوت ذرات خاک تغییر می کند، بستگی دارد. جریان های ترجیحی، یک پدیده فیزیکی انتقالی سریع می باشند که در منافذ بزرگ و عمدتا عمودی خاک رخ می دهند. جرمن[8]،۱۹۹۰، و چن[9] و واگنت[10]،۱۹۹۲، 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. مجموع این رابطه ها به همراه قانون پیوستگی به مدل موج کینماتیک[11] (KW) برای توصیف فرآیند جریان در منافذ قابل زهکشی منجر شده است (جرمن ،۱۹۸۵). اگرچه مدل موج کینماتیک معمولاً جریان های ترجیحی را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می زند، ولی تقریباً به خوبی جریان آب متحرک را در خاک های ساختمان دار نشان می دهد (جرمن و همکاران، ۱۹۹۷ و مگری الویی[12]، ۱۹۹۸). از طرفی مدل موج کینماتیک شدیداً توده ای[13] است و بنابراین قادر نیست اثر انتشار[14] را به حساب آورد. به این دلیل که فرضیه های اساسی این مدل، این بوده است که فلاکس جریان منحصرا تابعی از مقدار آب متحرک می باشد. از همین روی، در این پژوهش مدل موج کینماتیک- انتشار[15](KDW) که به وسیله دی پترو و همکاران[16] در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد شد مورد ارزیابی قرار گرفته است تا دقیق تر بتواند جریان های ترجیحی را از میان منافذ قابل زهکشی توصیف کند. در این مدل فرض می شود که فلاکس جریان یک تابع غیر خطی از مقدار آب متحرک و مشتق اول آن نسبت به زمان می باشد. سرانجام مدل به وسیله داده های به دست آمده از آزمایش های نفوذ در ستون های خاک صحت سنجی شد.

تئوری مدل موج کینماتیک- انتشار برای جریان های ترجیحی از میان منافذ قابل زهکشی

در به کار گیری مدل بایستی بعضی فرضیه ها به شرح زیر در نظر گرفته شود (جیان ژی و همکاران، ۲۰۰۷):

۱- منافذ ریز در خاک مورد بررسی، به آب غیر متحرک تعلق دارند و در تبادل جریان آب شرکت نمی کنند. مدل به طور کلی

1- Sheng *et al*.
2- Gjettermann *et al.*
3- Reichenberger *et al.*
4- Morris
5- Mooney
6- Jianzhi *et al.*
7- Flury
8- German
9- Chen
10-Wagenet
11- Kinematic Wave model
12- Mdaghri-Alaoui
13- Convective
14- Dispersive
15- Kinematic–Dispersive Wave
16- Di Pietro *et al.*

بر اساس مقدار آب متحرک پایه گذاری شده است. ۲- ظرفیت جریان آب منحصرا تابعی از مقدار آب متحرک می باشد.۳- از آنجایی که خلل و فرج متوسط[1] نقش زیادی را در فرآیند جریان بازی می کنند، عبارت "تخلخل قابل زهکشی" با توجه به اینکه در جریان های ترجیحی شرکت می کند، در فرآیند کار استفاده می شود. ۴- نیروی ثقل در مقایسه با نیروی مویینگی یک نیروی غالب است. ۵- افزایش و کاهش سایر نیرو ها در سیستم مورد توجه قرار نمی گیرد. ۶- جریان آب به طور کلی یک جریان عمودی است.

با توجه به فرضیه های در نظر گرفته شده، w، مقدار حجم آب متحرک در a مقدار حجم V از 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 اینجا فرض می شود که منافذ ریز کاملاً اشباع می باشند و بنابراین هیچ آب قابل تبادلی بین دو نوع منفذ وجود ندارد. قانون پیوستگی برای جریان w به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla . u = 0 \qquad (۱)$$

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

$$u = u(w, w_t) \qquad (۲)$$

سپس گرادیان فضایی فلاکس برابر می شود با:

$$\nabla . u = c \nabla w + \nu_w \nabla w_t \qquad (۳)$$

که در آن، $c = \frac{\partial u}{\partial w}\Big|_{w_t = cons\,tant}$ و $\nu_w = \frac{\partial u}{\partial w_t}\Big|_{w = cons\,tant}$

با فرض اینکه جریان آب فقط در جهت عمودی رو به پایین، z، انجام می شود، معادله های ۱ و ۳ به ترتیب برابر می شوند با:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \qquad (۴)$$

و

$$\frac{\partial u}{\partial z} = c \frac{\partial w}{\partial z} + \nu_w \frac{\partial^2 w}{\partial z\, \partial t} \qquad (۵)$$

با ترکیب معادله های ۴ و ۵ معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c \frac{\partial w}{\partial z} = -\nu_w \frac{\partial^2 w}{\partial z\, \partial t} \qquad (۶)$$

با استفاده از عبارت $\frac{\partial^2 w}{\partial z\, \partial t} = -\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ و ضرب عبارت $\frac{\partial u}{\partial w}$ در معادله ۶، این معادله به شکل زیر تبدیل می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial z} = \nu_u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۷)$$

که در آن، $\nu_u = c\nu_w$هر دو معادله ۶ و ۷ به ترتیب برای w و u، معادله های غیر خطی انتقال- انتشار می باشند. در نظر داشته باشید، شکل تابعی مقدار فلاکس آب متحرک بر ضرایب هیدرودینامیک c، ν_uو ν_w اثر می گذارد ولی شکل به دست آمده معادله های دیفرانسیل را تغییر نمی دهد.

در این پژوهش بر حل و مفهوم فیزیکی معادله ۷ (مدل موج کینماتیک- انتشار) برای جریان های ترجیحی تمرکز شده است. همچنین در اینجا فرض می شود که معادله ۲ به شکل زیر است:

$$u = f(w) + g(w_t) \qquad (۸)$$

با احتساب $f(w) = bw^a$، و $g(w_t) = \pm \nu_w \frac{\partial w}{\partial t}$، که در آن بعد a شاخص توزیع جریان در منافذ درشت[2] و b، ضریب رسانایی[3] و بعد آن برابر با $\left[LT^{-1}\right]$ و ν_w نیز انتشار پذیری آب[4] و بعد آن برابر است با $\left[L\right]$ و همه اعداد مثبتی هستند، معادله ۸ را به صورت زیر نیز می توان نمایش داد:

$$u(z,t) = bw(z,t)^a \pm \nu_w \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} \qquad (۹)$$

با این توضیح که علامت منفی برای حالتی است که در رطوبت های یکسان، هدایت هیدرولیکی زهکشی از مرحله نفوذ آب بیشتر باشد و مثبت برای حالتی که در رطوبت های یکسان هدایت هیدرولیکی مرحله نفوذ آب از زهکشی بیشتر است. از معادله ۹، سرعت سیگنالی c به صورت زیر می باشد:

$$c(w) = \frac{\partial u}{\partial w}\Big|_{w_t = cons\,tant} = abw^{a-1} \qquad (۱۰)$$

همچنین:

$$\nu_u = c(w)\nu_w \qquad (۱۱)$$

1- Mesopore

2- Macropore-flow distribution index

3- Conductance

4- Water dispersion coefficient

با توجه به فرض های بالا، c به شکل اولیه مدل کینماتیک[1] که توسط جرمن (۱۹۸۵ و ۱۹۹۰) ارائه شد، تغییر پیدا می کند. در جایی که او از $g(w_t)$ صرف نظر کرد.

با استفاده از $w=(\frac{u}{b})^{\frac{1}{a}}$ و با ترکیب با معادله های ۷، ۸ و ۱۱ معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial t}+ab^{\frac{1}{a}}u(z,t)^{\frac{a-1}{a}}\frac{\partial u(z,t)}{\partial z}= \quad (۱۲)$$
$$=\nu_w ab^{\frac{1}{a}}u(z,t)^{\frac{a-1}{a}}\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}$$

که در آن، $\nu_u=c\nu_w$بنابراین مدل به سه پارامتر a ، b و ν_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 منافذ درشت، b [mm h^{-1}] یک ضریب رسانایی (روسا و همکاران[2] ، ۲۰۰۴) و ν_w [mm] ضریب انتشار پذیری آب می باشد.

در این پژوهش معادله ۱۲ با روش عددی تفاضلات محدود[3] برای شرایط مرزی و اولیه ارایه شده در رابطه ۱۳ که به وسیله جرمن در سال ۱۹۸۵ به کار برده شد، در محیط نرم افزار متلب[4] حل شد:

$$\begin{cases} u(z,t)=u_{in}(t), z=0, t>0 \\ u(z,t)=u_0, z>0, t=0 \end{cases} \quad (۱۳)$$

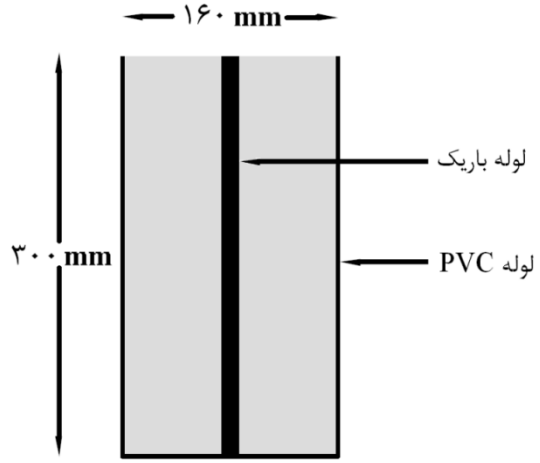
که در آن $u_{in}(t)$، فلاکس آب ورودی می باشد.

به طور کلی در این پژوهش فرض شده است که مدل موج کینماتیک- انتشار با احتساب عبارت انتشار و اثر پسماند رطوبتی، هیدروگراف زهکشی را نسبت به مدل موج کینماتیک بهتر مدل می کند و همچنین اهداف زیر نیز مورد بررسی قرار گرفته اند: ۱- بررسی کارایی مدل موج کینماتیک- انتشار در برآورد جریان ترجیحی آب. ۲- تخمین پارامترهای جریان ترجیحی آب با هدف رسیدن به نقطه کمینه سراسری.

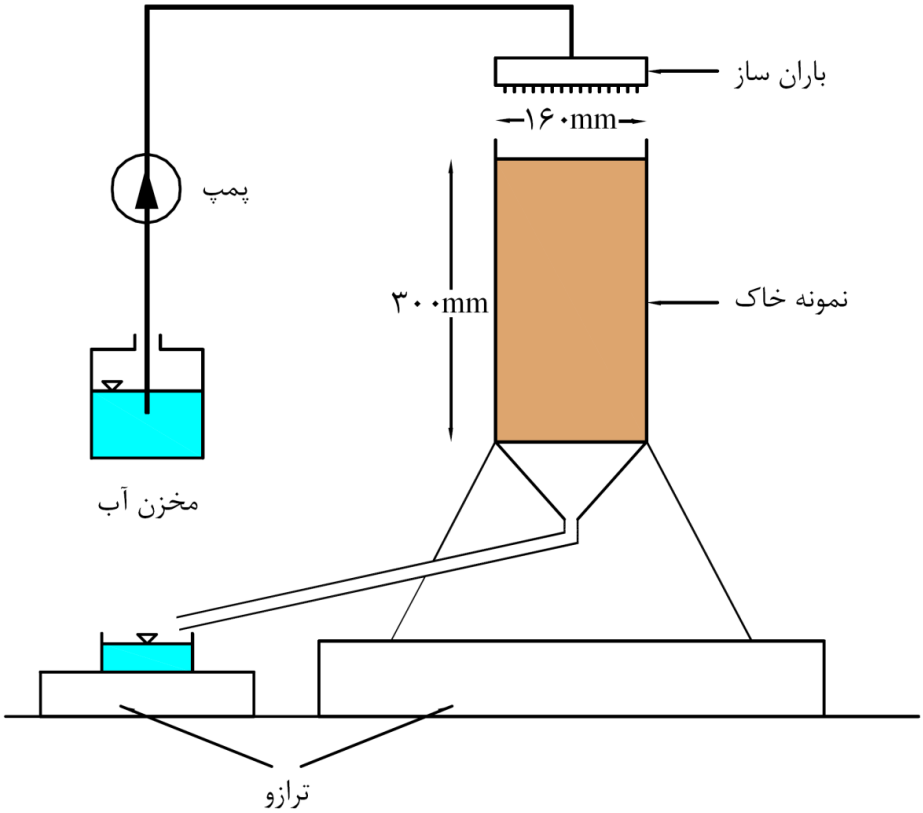
مواد و روش ها

برای انتخاب خاک مناسب برای انجام آزمایش ها، نخست نمونه خاک های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه ها پس از خشک شدن در آون (در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت) کوبیده و از الک شماره ۱۰ (۲ میلی متری) عبور داده شدند و هدایت هیدرولیکی اشباع آنها نیز به روش بار ثابت اندازه گیری شد. پس از انتخاب خاک مناسب برای ساخت مدل، نمونه اصلی که در آن منافذی برای شبیه سازی حالت جریان ترجیحی آب در خاک، با استفاده از یک ماسه درشت ایجاد شده بود، به شیوه زیر ساخته شد (وانگ و همکاران[5]، a وb ۲۰۱۳): ابتدا لوله پی وی سی مورد نظر با قطر خارجی ۱۶۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر تهیه شد و انتهای آن با دولایه توری پلاستیکی با قطر منافذ ۱ تا ۲ میلی متر و به وسیله مفتول سیمی کاملاً محکم گردید. به جدار داخلی لوله نیز ماسه لبه تیز چسبانده شد. این عمل باعث افزایش اصطکاک جداره ها با خاک می شود و احتمال وقوع جریان های ترجیحی از جداره ها را کاهش می دهد. سپس حدود ۱ سانتی متر شن (بین الک شماره ۶ (۳/۳۵ میلی متر) و الک شماره ۱۰ (۲ میلی متر) 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 با توجه به شکل ۱، یک لوله در بسته به طول حدود ۶۰ سانتی متر و قطر خارجی ۱/۴ سانتی متر در مرکز لوله پی وی سی به طور موقت قرار داده شد. پس از آن خاک اصلی آزمایش، به آرامی از اطراف این لوله داخلی که قطر آن ۱/۴ سانتی متر بود، درون لوله پی وی سی ریخته شد. به این ترتیب که در هر مرحله پس از ریخته شدن خاک اطراف لوله میانی (شکل ۱)، آب سطل خالی می شد و اجازه داده می شد که خاک تقریباً خشک شود. بعد از آن لوله به آرامی خارج می شد تا به خاک اطراف خود آسیبی وارد نسازد و بی درنگ با یک ماسه سبک تر پر می شد. برای اینکه از ریزش جداره های حفره ایجاد شده به وسیله لوله جلوگیری شود، کل ستون در سه مرحله و در هر مرحله به طول ۱۰ سانتی متر به روش تر[6]، (وانگ و همکاران، a وb ۲۰۱۳) پر شد. در پایان هر مرحله حفره با یک ماسه سبک به دقت پر می شد. این کار 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 ۱/۶۴۵، ضریب دانه بندی (Cc) برابر ۱/۱۸۳ و D_{50} برابر ۰/۱۴۶ میلی متر 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 ۲۰ و ۱۸ (۰/۸۵ و ۱ میلی متر) بود. پس از ساخت این نمونه خاک، از آنجایی که آزمایش ها برای حالت غیر اشباع طراحی شده بودند لازم بود که هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک اندازه گیری شود تا شدت های بارندگی که بعداً اعمال خواهد شد، چیزی کمتر از این مقدار باشد. پس از انجام آزمایش بارثابت، مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک، ۱۷۲/۶ میلی متر بر ساعت به دست آمد.

1- First order kinematic approximation
2- Rousseau *et al.*
3- Finite difference
4- MATLAB
5 - Wang *et al.*
6- Wet pack



شکل۱- شکل شماتیک شیوه ایجاد منافذ درشت در ستون خاک



شکل۲- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی مربوط به آزمایش های نفوذ- زهکشی

ستون خاک ساخته شده پس از آماده شدن و قبل از انجام آزمایش های 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 ها با نیروی ثقل زهکشی شوند و به یک وزن ثابت برسند. پس از اطمینان از خالی شدن منافذی از خاک که در جریان ترجیحی دخالت دارند، یعنی عمدتا منافذ درشت، ستون خاک به احتمال زیاد دارای رطوبتی خواهد شد که سبب وجود آن، آب باقی مانده در منافذ ریز و به واسطه نیروی مویینگی است. در اینجا انتظار می رود یک تبادل کمی از آب بین منافذ ریز و تخلخل قابل زهکشی وجود داشته باشد. حال با توزین این ستون خاک می توان مقدار آب موجود در منافذ ریز را به دست آورد. سپس همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک قیف کاملاً به ستون خاک متصل و آب بندی شده است.

پس از آماده سازی نمونه خاک و مدل فیزیکی، مطابق شکل (۲)، قطرات آب روی سطح ستون خاک و با یک دستگاه شبیه ساز

باران[1] که با فاصله حدود ۱۰ سانتی متری سطح خاک قرار داشت ایجاد شد. طبق شکل ۲، دستگاه به یک پمپ که از یک مخزن آب تغذیه می شد متصل گردید (ماجدلانی و همکاران[2] ، ۲۰۰۸). در اینجا بایستی توجه کرد که شرایط غیراشباع می باشد و شدت های به کار رفته برای باران باید مقادیری کمتر از مقدار هدایت هیدرولیکی کل نمونه خاک باشد. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می شود، جریان زهکشی به طور پیوسته با یک ترازوی دقیق پایش می شود و ترازوی بزرگ تر نیز وزن کل ستون خاک مرطوب را در حین بارندگی یعنی فرآیند نفوذ تا پایان آزمایش و زهکشی کامل ستون خاک اندازه گیری می کند. با داشتن این وزن ها و وزنی که در ابتدا یعنی هنگامی که رطوبت خاک فقط مربوط به منافذ ریز بود و داشتن وزن خشک خاک که بعد از اجرای آزمایش و قرار دادن نمونه خاک در آون به دست خواهد آمد، رطوبت حجمی متحرک خاک در زمان های دلخواه به صورت زیر محاسبه شد:

$$w = \frac{M_{W\text{-}Total} - M_{W\text{-}Micropore}}{M_s} \times \rho_b \qquad (۱۴)$$

که در آن، w، رطوبت حجمی متحرک خاک، $M_{W-Total}$، جرم کل آب ستون خاک، $M_{W-Micropore}$، جرم آب ستون خاک در منافذ ریز، M_s، جرم خاک خشک و ρ_b، جرم مخصوص ظاهری خاک خشک می باشد که با رابطه زیر به‌دست می آید.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \qquad (۱۵)$$

که در آن V_t، حجم کل ستون خاک می باشد.

در این پژوهش آزمایش های نفوذ با شدت های باران شبیه سازی شده و با چهار شدت ۵۶/۹۷، ۱۰۷/۶۴، ۱۳۳/۰۱ و ۱۶۱/۷۱ میلی متر بر ساعت انجام شد. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه شد، در اینجا از دو ترازو استفاده شده است. 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 می دهد عدد ثابتی را نمایش داد، می توان باران ساز را خاموش نمود و از این لحظه ترازویی که زیر قیف قرار دارد، جریان زهکشی یا نزول هیدروگراف زهکشی را ثبت می کند. بدیهی است ترازویی که زیر نمونه خاک قرار داشت در هر لحظه مقدار آب متحرک نمونه های خاک و ترازوی دیگر مقدار شدت خروجی از انتهای ستون خاک را نشان می داد.

1- Rainfall simulator
2- Majdalani *et al.*

تخمین پارامتر های مدل

در این مرحله ابتدا بایستی پارامتر های مجهول مدل (معادله ۱۲)، به دست آید تا بتوان بعد از آن با حل عددی به شبیه سازی و پیش بینی حرکت ترجیحی آب پرداخت. برای این کار، خطای جذر میانگین مربعات[3] (RMSE) بین داده های آزمایشگاهی و فلاکس پیش بینی شده (معادله ۹)، با استفاده از معادله ۱۶ مطابق زیر و با روش بهینه سازی تراکم ذرات[4] (PSO) (مریخ بیات، ۱۳۹۱، جمالیان و همکاران، ۱۳۸۸، صلاحی و همکاران[5]، ۲۰۱۲) کمینه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(u_i - \left(bw_i^a \pm v_w \frac{\partial w}{\partial t}\Big|_i\right)\right)^2} \qquad (۱۶)$$

که در آن N، u_i و w_i به ترتیب برابرند با تعداد مشاهدات آزمایشگاهی، فلاکس های مشاهداتی در انتهای ستون خاک در زمان i و میانگین اندازه گیری شده آب متحرک در زمان i.

تا آنجایی که مروری بر منابع نشان می دهد، تاکنون پارامتر های مدل موج کینماتیک- انتشار به ندرت از طریق روش های معکوس تخمین زده شده اند (چه محلی و چه سراسری[6]). بنابراین دامنه تغییرات پارامتر ها هنوز کاملاً مشخص نیست و این موضوع می تواند به علت رخ دادن مشکل بهینه سازی محلی باشد. این پژوهش از اولین تلاش ها برای بهینه سازی پارامتر های مدل موج کینماتیک- انتشار می باشد. در اینجا تلاش ما معطوف به این نکته است که کمینه سراسری تابع خطا تعیین شود. روش های سراسری دارای این مزیت هستند که از بهینه سازی های محلی بگریزند. اگر چه، این مزیت از طریق تعداد بسیار زیادی از ارزیابی های تابع هدف به دست می آید (رائوچ و هارموئس[7] ، ۱۹۹۹). پس از بهینه سازی و کمینه شدن تابع هدف (معادله ۱۶)، پارامتر های مجهول معادله ۱۲ یعنی a، b و v_w به دست آمدند.

روش بهینه سازی تراکم ذرات (PSO)

بهینه سازی تراکم ذرات یکی از روش های بهینه سازی است که از طبیعت الهام گرفته است و برای حل مسائل بهینه سازی عددی با فضای جستجوی بسیار بزرگ و بدون نیاز به اطلاع از گرادیان تابع هدف ابداع شده است. در بعضی از متون فارسی این روش بهینه سازی را گاهی الگوریتم پرندگان نیز نامیده اند. این

3- Root Mean Squared Error
4- Prticle Swarm Optimization
5 - Salahi *et al.*
6- Global
7- Rauch and Harremoes

روش اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط دو نفر به نام های کندی و ابرهارت معرفی شد. 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 (ابرهارت و کندی[1]، ۱۹۹۵). این روش، شیوه ای مناسب برای یافتن محل بهینه سراسری تابع می باشد (تسولوس و استاوراکودیس[2]، ۲۰۱۰).

در این الگوریتم که با الهام گیری از زندگی گروهی جانوران، از جمله حشرات نظیر مورچه ها، موریانه ها، زنبورها ، پرندگان و ماهی ها ابداع شده است، برای حل یک مساله بهینه سازی، جمعیتی از جواب های نامزد با استفاده از یک فرمول ساده به طور تصادفی در دامنه مساله به حرکت در می آیند و آن را با هدف یافتن جواب بهینه سراسری مورد کاوش قرار می دهند (در الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات هر یک از این جواب ها را اصطلاحا یک ذره می نامند و هر ذره به عنوان مثال متناظر با یکی از پرندگان موجود در یک دسته پرنده در حال پرواز است). هرچند که امروزه تلاش هایی در جهت حل مسایل بهینه سازی ترکیبی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات در جریان است ولی تاکنون کاربرد آن بیشتر به حل مسایل بهینه سازی پیوسته محدود بوده است (مریخ بیات، ۱۳۹۱). از آنجایی که متغیرهایی که در معادله ۱۶ برای کمینه کردن آن به کار می روند یعنی مقادیر a و b و v_w، مقادیری پیوسته هستند، به نظر می آید که این الگوریتم برای این کار مناسب باشد.

قوانین حاکم بر دسته های جانوری

برخی از جانوران از جمله پرندگان و ماهی ها در موقع حرکت دسته جمعی خود از قوانین خاص و بسیار مشابهی پیروی می کنند که این قوانین منجر به بروز نظم خاص و زیبایی در حرکت این گونه جانداران می شود. با توجه به بحث فوق، حرکت دسته جمعی هر دسته جانوری را با استفاده از سه قانون ساده زیر می توان مدل کرد: ۱- جدایی[3] (یعنی عدم نزدیکی بیش از اندازه به هم)، ۲- صف بندی[4] (یعنی حرکت در جهت میانگین سایر اعضای گروه)، ۳- همبستگی[5] (یعنی ماندن در کنار هم). در طبیعت، تقریبا هر دسته جانوری در موقع حرکت دسته جمعی از قوانین ذکر شده در بالا به منظور رسیدن به یک هدف معین پیروی می کند. به عنوان مثال پرندگان در موقع کوچ کردن یا ماهی ها در موقع گریز از دست دشمن مهاجم با استفاده از این سه قانون در محیط پیرامونشان به حرکت در می آیند. توجه داشته باشید که لازمه انجام این کار به اشتراک گذاشتن اطلاعات به دست آمده توسط هر یک از اعضای گروه با سایر اعضا می باشد (مریخ بیات، ۱۳۹۱). در الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات نیز از ترکیب سه قانون فوق برای به حرکت در آوردن مجموعه ای از ذرات (یا همان جواب های نامزد)، به طور موثر در دامنه مساله استفاده می شود. برای این منظور در الگوریتم بهینه سازی تراکم ذرات، ذرات با پیروی از قوانین زیر در دامنه مساله به حرکت در می آیند:

۱- هر ذره به محض پیدا کردن موقعیت هدف (که از نظر ریاضی همان موقعیت نقطه بهینه یک تابع هدف است) آن را به نحو مناسبی به اطلاع سایر ذرات گروه می رساند،

۲- سایر ذرات به طور غیر مستقیم و تا حدی تصادفی به سوی این هدف (یا همان نقطه بهینه تابع مورد نظر) کشیده می شوند. این کشش جمعی به سوی موقعیت نقطه بهینه به گونه ای است که ذرات بیش از حد به یکدیگر نزدیک نمی شوند و همچنین ارتباطشان را با یکدیگر حفظ می کنند.

۳- سرعت حرکت هر یک از ذرات (چه از نظر اندازه و چه از نظر جهت) متأثر از بهترین موقعیت یافت شده برای تابع هدف توسط خود آن ذره و نیز سایر ذرات گروه از آغاز اجرای الگوریتم تا تکرار فعلی است.

به سادگی می توان دید که نتیجه طبیعی استفاده از مدل فوق برای به حرکت درآوردن ذرات در دامنه مساله این است که جواب های نامزد به طور مؤثری به سمت نقاط بهینه کشف شده توسط خود و یا سایر ذرات جذب می شوند (مریخ بیات، ۱۳۹۱).

نتایج و بحث

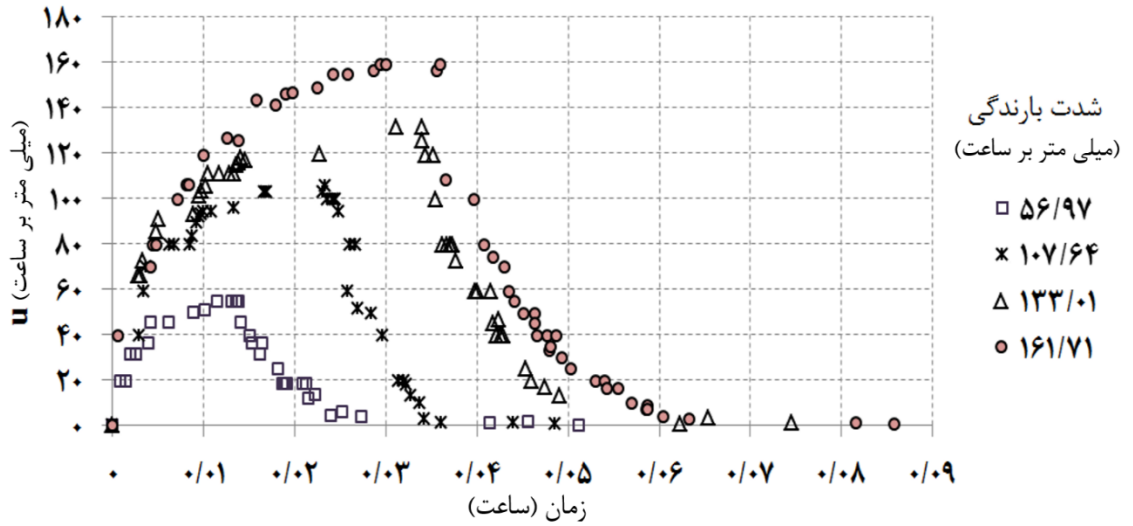
نتایج واسنجی مدل موج کینماتیک- انتشار و تعیین ضرایب مجهول مدل

همان طور که اشاره شد برای تعیین ضرایب مجهول مدل مورد استفاده، لازم بود که تابع هدف با استفاده از روش بهینه سازی تراکم ذرات کمینه شود. به این ترتیب که پارامتر های a و b و v_w از طریق رابطه $bw^a \pm v_w \frac{\partial w}{\partial t}$ با u اندازه گیری 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 دورهای نفوذ و زهکشی در هر چهار شدت بارندگی ترسیم شد. با توجه به نوع بافت خاک به کار رفته در آزمایش، در رطوبت های یکسان، هدایت هیدرولیکی مرحله نفوذ آب از زهکشی بیشتر است. بنابراین معادله دیفرانسیل به کار رفته در رابطه تجربی مذکور علامت مثبت خواهد داشت (طبق معادله ۱۶). نتایج این بهینه سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

1- Eberhat and Kennedy
2- Tsoulos and Stavrakoudis
3- Separation
4- Alignment
5- Cohesion

جدول۱- مقدار بهینه سازی و واسنجی شده ضرایب مدل موج کینماتیک- انتشار برای مقادیر مختلف شدت بارندگی

مقدار شدت بارندگی (میلی متر بر ساعت)	v_w (میلی متر)	b(میلی متر بر ساعت)	a	RMSE (میلی متر بر ساعت)
۵۶/۹۷	۹۰/۵۵۳	۱۰۰۰۷۵/۷۶	۱/۰۳۷۲	۰/۴۶۴۵
۱۰۷/۶۴	۸۹/۲۶۳	۷۲۰۹۴/۶۶	۱/۰۲۴۶	۰/۷۰۴۲
۱۳۳/۰۱	۸۹/۴۱۰	۵۷۰۵۸/۲۸	۱/۰۳۵۰	۱/۶۰۴۷
۱۶۱/۷۱	۹۰/۶۳۹	۴۲۰۶۱/۷۸	۱/۰۲۰۰	۱/۷۰۵۷



شکل۳- هیدروگراف های خروجی از انتهای ستون خاک برای شدت های مختلف بارندگی

در این روش ابتدا برای تیمارها و تکرار های مختلف مقدار شدت بارندگی ورودی، مدل واسنجی شد. به این ترتیب که این نتایج همگی حاصل ۵۰۰۰ بار تکرار و تلاش[1] الگوریتم بهینه سازی بوده است. هر چند زودتر از این تکرار، الگوریتم به پایداری رسیده بود، ولی برای کسب اطمینان از بهترین پاسخ 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.

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، در این آزمایش ها، با افزایش شدت بارندگی، مقدار پارامتر b کاهش یافته است. البته در تحقیقات پیشین (دی پترو و همکاران، ۲۰۰۳) این مقدار روندی افزایشی داشت. تفاوت کار در اینجا بود که در تحقیق ایشان، 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 می باشد که البته علت جابجایی این حالت پسماند[2] به دلیل تفاوت نوع بافت خاک های به کار برده می باشد (ون گنوختن[3]، ۱۹۸۰، گالاج و همکاران[4] ، ۲۰۱۳، نیلسون و بیگر[5]، ۱۹۶۱، پولوواسیلیس[6]، ۱۹۶۹، یانگز[7]، ۱۹۶۴). این در حالی است که v_w تقریبا مقدار ثابتی دارد. از این گذشته، مقادیر پارامتر های a مقداری حدود ۱، به وسیله تئوری کینماتیک (جرمن، ۱۹۸۵) پیش بینی شد. با این وجود آزمایش های بیشتری برای اثبات این روند بایستی انجام بشود.

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 مدل موج کینماتیک- انتشار به دست آمدند. حال 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 همان هیدروگراف خروجی از انتهای ستون خاک، شده است. شکل ۳، داده های آزمایش های بارندگی با شدت های متفاوت را در برابر زمان نشان می دهد. همان طور که

1- Iteration
2- Hysteresis
3- van Genuchten
4- Gallage *et al.*
5- Nielson and Bigger
6- Poulovassilis
7- Youngs

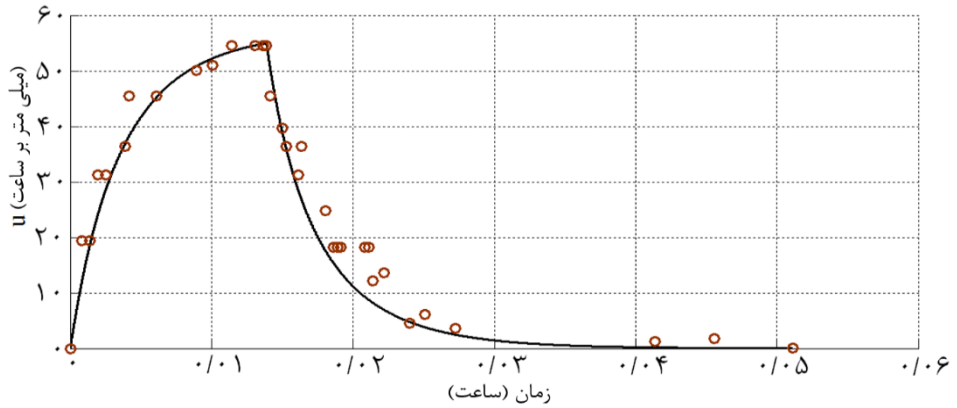
از شکل ۳ پیداست، برای همه آزمایش های مربوط به نفوذ و بدون در نظر گرفتن شدت بارندگی، هیدروگراف زهکشی همواره دارای شکل خاصی به صورت زیر می باشد: در ابتدا، تغییرات صعودی سریعی به سمت یک بازه بدون شیب دارد و وقتی جریان ورودی متوقف می شود، روند نزولی سریعی خواهد داشت. مرحله نزولی با یک افت ناگهانی اولیه در سرعت خروجی جریان شناخته می شود که با یک مرحله زهکشی با شیب ملایم تر دنبال می شود.

نتایج صحت سنجی، یعنی RMSE بین پاسخ های عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، برای تیمارها و تکرار های مختلف شدت بارندگی در جدول ۲ ارائه شده است.

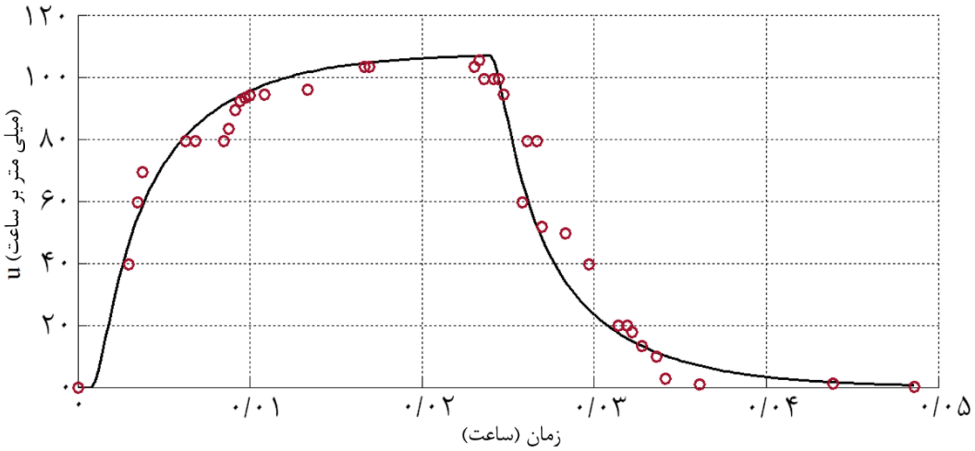
همچنین نتایج مربوط به این مدل سازی عددی در شکل های ۴ تا ۷ ارائه شده است. در این شکل ها، خط ممتد مقادیر پیش بینی مدل و دایره ها نمایانگر مقادیر مشاهداتی می باشند.

جدول۲- مقادیر RMSE بین پاسخ های عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، برای تیمارها و تکرار های مختلف شدت بارندگی

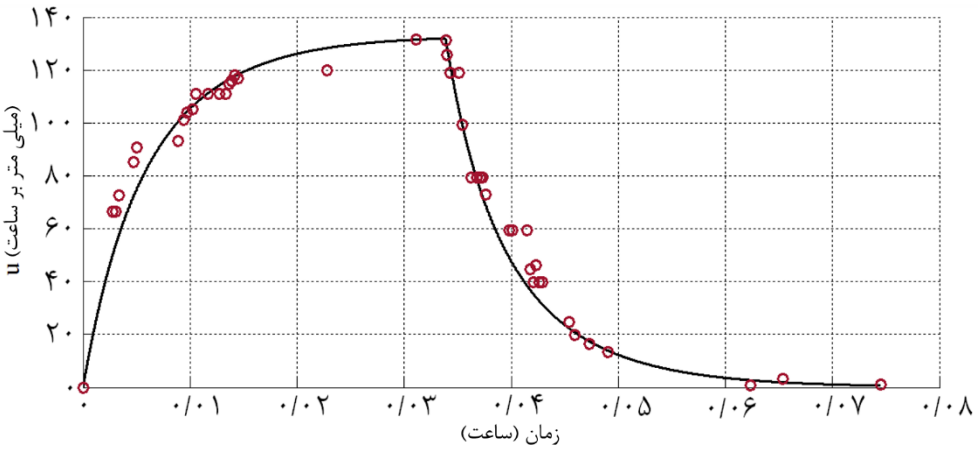
تیمار بارندگی (میلی متر بر ساعت)	RMSE (میلی متر بر ساعت)
۵۶/۹۷	۴/۳۴۴۱
۱۰۷/۶۴	۷/۶۷۶۵
۱۳۳/۰۱	۷/۷۲۳۷
۱۶۱/۷۱	۷/۱۹۵۵



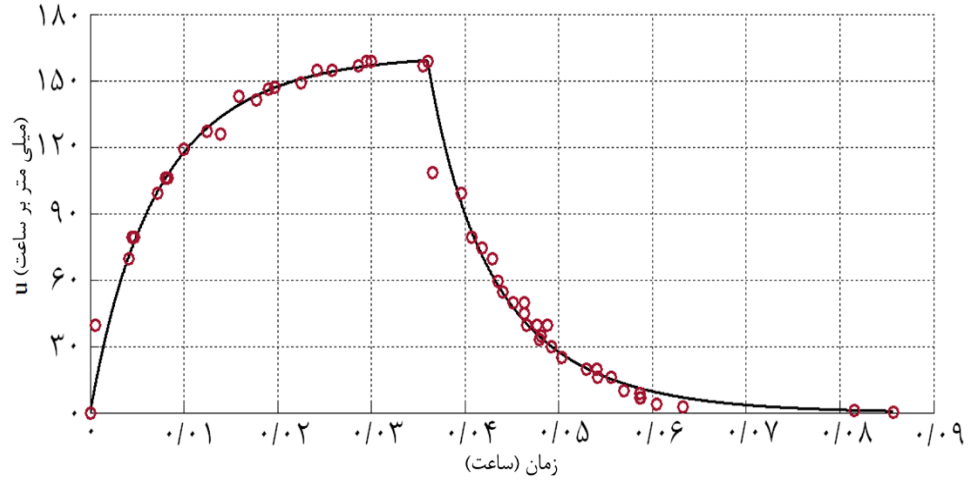
شکل ٤- پاسخ عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، تیمار شدت بارندگی ٥٦/٩٧ میلی متر بر ساعت



شکل ٥- پاسخ عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، تیمار شدت بارندگی ١٠٧/٦٤ میلی متر بر ساعت



شکل ٦- پاسخ عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، تیمار شدت بارندگی ۱۳۳/۰۱ میلی متر بر ساعت



شکل ۷- پاسخ عددی مدل موج کینماتیک- انتشار و مقادیر مشاهداتی حاصل از آزمایش ها، تیمار شدت بارندگی ۱٦۱/۷۱ میلی متر بر ساعت

همان طور که از جدول ۲ و شکل های ۴ تا ۷ پیداست، حل های عددی انطباق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارند. مطابق جدول ۲، پیش بینی مدل در شدت های پایین بارندگی ورودی یعنی شدت ۵۶/۹۷ میلی متر بر ساعت بهتر می باشد. این موضوع این تئوری را ثابت می کند که اثر انتشار با افزایش شدت های ورودی به تدریج از بین می رود و این اثر در سرعت های پایین تر بهتر می تواند در روند پیش بینی بهتر دخالت نماید. چون در این پژوهش و در مدل موج کینماتیک- انتشار، بخش انتشار به مدل موج کینماتیک اضافه شده است و اثرگذاری این بخش در مدل، در سرعت های بالاتر کمتر می باشد. نتایج نشان می دهد، هنگامی که سرعت ورودی افزایش می یابد انتشار جبهه خیس شدن کاهش می یابد. زیرا در شدت های بالاتر، بعضی اثرهای انتشار در مقیاس کوچک، مانند ایستایی محلی آب یا اثر مویینگی در منافذ با اندازه بینابینی ممکن است رخ ندهد و منافذ درشت تر در بیشتر مواقع در جریان های ترجیحی با سرعت بیشتر شرکت می کنند.

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پژوهش از مدل موج کینماتیک- انتشار که روند حرکت آب از مسیر های ترجیحی را توضیح می دهد استفاده شد. در واقع این مدل حالت توسعه یافته مدل موج کینماتیک می باشد که در آن بخش انتشار نیز لحاظ شده است. در اینجا آزمایش های نفوذ-زهکشی، در یک ستون خاک که در آن به شیوه ای که گفته شد مسیر های ترجیحی آب در آن تعبیه شده بود، انجام شد. این آزمایش ها برای تخمین ارتباط بین فلاکس حجمی آب و مقدار آب متحرک انجام گردید. رابطه بین فلاکس حجمی آب و مقدار آب متحرک حالتی پسماند دارد و می تواند با یک تابع غیر خطی از مقدار آب و مشتق اولش نسبت به زمان مدل بشود، که این عبارت مشتق، پسماند را مدل می کند. همچنین پس از واسنجی

مدل و تعیین ضرایب مجهول آن با روش بهینه سازی تراکم ذرات، داده های هیدروگراف خروجی از انتهای ستون خاک برای صحت سنجی مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل موج کینماتیک- انتشار به خوبی می تواند هیدروگراف زهکشی و حرکت آب از مسیر های ترجیحی را پیش بینی نماید که این پیش بینی برای شدت های کمتر بارندگی بهتر بوده است. زیرا اثر انتشار با افزایش شدت های ورودی به تدریج از بین می رود و این اثر در سرعت های پایین تر بهتر می تواند در روند پیش بینی بهتر دخالت نماید. پیشنهاد می شود که از معادله استفاده شده در این پژوهش در مدل های انتقال آب و املاح و خصوصا برای مدل سازی جریان های ترجیحی در خاک استفاده شود. همچنین این پژوهش برای بافت های دیگر خاک تکرار شود تا روند صعودی یا نزولی بودن پارامتر b با افزایش شدت بارندگی بیشتر مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین به نظر می رسد مدل مذکور می تواند راهی باشد تا بتوان مقدار و روند پیشروی جریان‌های ترجیحی و آلاینده‌های همراه آن را پیش‌بینی نمود و از نتایج این پیش بینی ها می توان در برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی مرتبط با حفظ محیط زیست استفاده کرد.

منابع

۱- جمالیان، ع. ۱۳۸۸. مساله مکان یابی با جاذبه و دافعه. پایان نامه کارشناسی ارشد ریاضی، دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه ریاضی.

۲- مریخ بیات، ف. ۱۳۹۱. الگوریتم های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت، چاپ اول، انتشارات نص.

3- Chen, C. and R.J. Wagenet. 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.

4- Di Pietro, L., Ruy, S. and Y. Capowiez. 2003. Predicting water flow in soils by traveling-dispersive waves. Journal of Hydrology, 278 (1-4): 64-75.

5- Eberhart, R. C. and J. Kennedy. 1995. A new optimizer using particle swarm theory, In Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science , Nagoya, Japan, 39-43

6- Flury, M. 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils – A review. Journal of Environmental Quality, 25: 25-45.

7- Gallage, C., Kodikara, J. and T. Uchimura. 2013. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. Soils and Foundations, 53(3):417–430.

8- Germann, P. F. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration and drainage in to and from soil macropores. Transactions, ASAE, 28: 745–749.

9- Germann, P. F. 1990. Preferential flow and the generation of runoff: Boundary layer flow theory. Water Resources Research, 26 (12): 3055–3063.

10- Germann, P. F., Di Pietro, L. and V. Singh. 1997. Momentum of flow in soils assessed with TDR-moisture readings. Geoderma, : 153–168.

11- Gjettermann, B., Nielsen, K. L., Petersen, C. T., Jensen, H. E. and S. Hansen. 1997. Preferential flow in sandy loam soils as affected by irrigation intensity. Soil Technology, 11: 139–152.

12- Jianzhi, N., Xinxiao, Y. and Z. Zhiqiang. 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.

13- Majdalani, M., Angulo-Jaramillo, R. and L. Di Pietro. 2008. Estimating preferential water flow parameters using a binary genetic algorithm inverse method. Environmental Modelling and Software, 23: 950-956.

14- Mdaghri-Alaoui, A. 1998. Transfers of water and solute in unsaturated bimodal porous media: experiments and modeling. Dissertation, Bern University, pp. 143.

15- Morris, C. and Mooney, S.J. 2004. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. Geoderma, 118: 133–143.

16- Nielsen, D. R. and Y. W. Biggar. 1961. Measuringcapillaryconductivity.Soil Science, 92: 192–193.

17- Poulovassilis, A. 1969. The effect of hysteresis of pore-water on the hydraulic conductivity. Journal of Soil Science, 20(1): 52-56.

18- Rauch, W and P. Harremoes. 1999. On the potential of genetic algorithms in urban drainage modeling. Urban Water, 1 (1): 79-89.

19- Reichenberger, S., Amelung, W., Laabs, V., Pinto, A., Totsche, K. U. and W. Zech. 2002. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol. Geoderma, 110: 63–86.

20- Rousseau, M., Ruy, S., Di Pietro, L. and R. Angulo-Jaramillo. 2004. Unsaturated hydraulic conductivity of structured soils from a kinematic wave approach. Journal of Hydraulic Research 42: 83-91.

21- Salahi, M., Jamalian, A. and T. Taati. 2012. Global minimization of multi-funnel functions using particle swarm optimization. Neural Computing and Applications, ,23 (7-8): 2101-2106.

22- Sheng, F. Wang, K. Zhang, R. H. Liu. 2011. Modeling preferential water flow and solute transport in unsaturated soil using the active region model. Environ Earth Sci, 62:1491–1501. DOI 0.1007/s12665-010-0633-0

23- Tsoulos, I. G and A. Stavrakoudis. 2010. Enhancing PSO methods for global optimization. Applied Mathematics and Computation, 216: 2988–3001.

24- 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.

25- Wang, Y., Bradford, S. A. and J. Simunek. 2013 a. Transport and fate of microorganisms in soils with preferential flow under different solution chemistry conditions. Water Resources Research, 49 (5): 2424–2436.

26- Wang, Y., Bradford, S. A. and J. Simunek. 2013 b. Physicochemical factors influencing the preferential transport of in soils. Vadose Zone Journal.

27- Youngs, E. G. 1964. An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. Soil Science, 97 (5): 307-311.