

مقاله پژوهشی

## بررسی آزمایشگاهی تغییرات گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار درون مصالح زهکشی تحت فشار

رعنا نصیری<sup>۱</sup>، هادی نوروزی<sup>۲\*</sup>، جلال بازرگان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

### چکیده

تحلیل جریان غیرماندگار با استفاده از معادلات سنت ونانت انجام می‌شود. محاسبه شیب خط انرژی ( $S_f$ ) از اهمیت بالایی در تحلیل جریان غیرماندگار برخوردار است. از آنجاییکه در محیط متخلخل درشت‌دانه،  $S_f$  برابر با گرادیان هیدرولیکی ( $i$ ) است، محاسبه  $i$  اهمیت بالایی دارد. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در سیلندری فولادی به قطر ۱۶ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر که ۴۰ سانتی‌متر آن از سنگریز با سه دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت پر شده، به بررسی جریان غیرماندگار در محیط متخلخل تحت فشار پرداخته شده است. جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دوجمله‌ای فورشهایمر که در جریان ماندگار ( $a, b$ ) و رابطه سه‌جمله‌ای که در جریان غیرماندگار کاربرد دارند ( $a, b, c$ ) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که، مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) در حالت استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای جهت محاسبه گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار، در مصالح ریزدانه ۱۴/۵، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷ و در مصالح درشت‌دانه ۱۲/۲ درصد بهبود یافته است. مقدار جمله سوم رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی  $((cdv/dt)/i)$  در مصالح ریزدانه ۷/۲۳، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷۹ و در مصالح درشت‌دانه ۱۷/۰۱ درصد به‌دست آمده است. به‌عبارت دیگر، از آنجاییکه با افزایش قطر مصالح، کارایی رابطه غیر خطی (غیر داریسی) نسبت به رابطه خطی (داریسی) افزایش می‌یابد، جمله سوم رابطه سه‌جمله‌ای نیز تاثیر بیشتری در محاسبات گرادیان هیدرولیکی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، جریان غیر ماندگار، گرادیان هیدرولیکی، مصالح زهکشی تحت فشار، رابطه سه‌جمله‌ای

### مقدمه

از قانون داریسی (رابطه ۱) تبعیت می‌کند (McWhorter et al., 1977)، در حالی که در محیط درشت‌دانه به دلیل وجود منافذ، سرعت جریان بالا بوده و جریان تمایل به آشفستگی دارد (Hansen et al., 1995)، به همین دلیل رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت غیرخطی بوده و از قانون غیر داریسی نیز تبعیت می‌کند. روابط مربوط به محاسبه گرادیان هیدرولیکی در محیط غیرداریسی به دو گروه توانی و دو جمله‌ای مطابق روابط ۲ و ۳ طبقه‌بندی شده است (Forchheimer, 1901; Leps, 1973; Stephenson, 1979).

$$i = \left(\frac{1}{k}\right) V \quad (1)$$

$$i = mV^n \quad (2)$$

$$i = aV + bV^2 \quad (3)$$

رابطه دوجمله‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی توسط (Ward 1964) و با استفاده از معادلات ناویر استوکس توسط (Ahmed and

مصالح درشت‌دانه سنگریزه‌ای کاربردهای فراوانی در رشته‌های مهندسی دارد. از این نوع مصالح جهت فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش، آبگیرها و سد‌های پاره‌سنگی و کنترل سیل استفاده می‌شود.

در محیط ریزدانه جریان به صورت ورقه‌ای (آرام) بوده و در آن‌ها رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت خطی بوده و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان  
\* نویسنده مسئول: (Email: hadinorouzi72@gmail.com)

حسینی و جوی در پژوهشی به توسعه مدلی غیرماندگار برای جریان از میان محیط متخلخل درشت دانه همگن پرداختند. این مدل بر اساس روابط اساسی سنت ونانت و معادله فورشه‌ایمر شکل گرفته و در آن از روش حل عددی چهارنقطه‌ای تفاضلات محدود استفاده شده‌است (Hosseini and Joy, 2007).

صلاحی و همکاران (۱۳۹۳) با اجرای یک سری آزمایش در سیلندر افقی تحت فشار از محیط‌های سنگ‌دانه‌ای به بررسی روابط مختلف ارائه شده در زمینه‌ی گرادیان هیدرولیکی جریان‌های غیرداریسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی جریان رابطه‌ای غیرخطی برقرار می‌شود و رابطه‌ای تجربی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی ارائه دادند.

اورگان (۱۹۵۲) با عبور دادن گاز نیتروژن از میان استوانه‌ای به مساحت ۷/۲۴ سانتی‌متر مربع که با سنگ‌دانه پر شده، به بررسی ضرایب رابطه دوجمله‌ای گرادیان هیدرولیکی پرداخته و رابطه (۷) را جهت محاسبات ضرایب  $a$ ,  $b$  ارائه کرد:

$$a = 150 \frac{v(1-n)^2}{d^2 gn^3}, b = 1.75 \frac{(1-n)}{gdn^3} \quad (7)$$

وارد (۱۹۶۴) رابطه (۸) را که با استفاده از آنالیز ابعادی قابل اثبات است، جهت محاسبه ضرایب  $a$ ,  $b$  در محیط متخلخل سطح آزاد ارائه کرد.

$$a = \frac{v}{gk}, b = \frac{C'_w}{g\sqrt{k}} \quad (8)$$

مک کارکودال و همکاران (۱۹۷۸) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که بر روی سنگدانه‌های شکسته و رودخانه‌ای انجام شده، رابطه (۹) را ارائه کردند:

$$a = 70 \frac{v}{gnR_h^2}, b = \frac{0.81}{gn^{0.5}R_h} \quad (9)$$

احمد و سانادا (۱۹۶۹) رابطه (۱۰) را جهت محاسبه ضرایب  $a$ ,  $b$  و با استفاده از معادلات ناویر-استوکس اثبات کردند.

$$a = \frac{\mu}{\rho gk}, b = \frac{1}{g\sqrt{ck}} \quad (10)$$

کواکس (۱۹۸۰) مجموعه‌ای از داده‌ها با دامنه تغییرات عدد رینولدز ۱۰ تا ۱۰۰ (مطابق تعریف ایشان از عدد رینولدز) را بررسی و رابطه‌ای مشابه رابطه ارگان به صورت رابطه (۱۱) ارائه کرد:

$$a = \frac{144v(1-n)^2}{gn^3 d^2}, b = \frac{2.4(1-n)}{gn^3 d} \quad (11)$$

رابطه ارائه شده توسط Ergun-Reichert برای ضرایب  $a$ ,  $b$  به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد (Fand and Thinakaran, 1990):

Sunada, 1969) اثبات شده و نسبت به رابطه‌ی نمایشی دقت بالا و کارایی بهتری دارد (Stephenson, 1979; Leps, 1973).

معادله جامعی با در نظر گرفتن اثرات جریان غیرماندگار توسط Polubarinova-Kochino (1952) به صورت رابطه (۴) بیان شده است (Hannoura and McCorcoudale, 1985):

$$i = aV + bV^2 + c \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (4)$$

که ضریب جمله سوم ( $c$ ) به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$c = \frac{n + C_m(1-n)}{ng} \quad (5)$$

که در آن  $C_m$  تعیین کننده سهمی از سیال است که با ارتعاش دانه مرتعش می‌گردد. به عبارتی  $C_m$  بیانگر جرم اضافه شده می‌باشد.

هانورا و مک کورپودالا (۱۹۸۵) در پژوهش خود که با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته‌است، مقدار  $C_m$  را ناچیز و قابل صرف نظر بیان کردند. به عبارتی، با حذف مقدار  $C_m$  از رابطه (۵)، جمله سوم رابطه (۴) را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان کرد:

$$c \left( \frac{dV}{dt} \right) = \frac{1}{g} \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (6)$$

در روابط فوق،  $v$ : سرعت جریان (m/s)،  $k$ : قابلیت هدایت هیدرولیکی (s/m)،  $i$ : گرادیان هیدرولیکی،  $m$  و  $n$  مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل، سیال و جریان بوده در حالیکه  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که تابعی از خصوصیات محیط متخلخل و سیال هستند.

شکری و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی آزمایشگاهی جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه سطح آزاد پرداختند و نتایج آنها بیانگر آن است که جمله‌ی سوم  $c \left( \frac{dV}{dt} \right)$  تاثیر چندانی در دقت محاسبات ندارد.

علاوه بر تقسیم‌بندی مذکور، جریان در محیط درشت‌دانه را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد (صالحی و همکاران ۱۳۸۴):

الف: جریان آزاد از درون و روی لایه‌های درشت‌دانه مانند گابیون‌ها و سدهای سنگریزه‌ای که در این لایه‌ها جریان از یک طرف با محیط آزاد در تماس می‌باشد.

ب: جریان تحت فشار از درون لایه‌های درشت‌دانه مانند فیلترهای درشت‌دانه‌ی سدهای خاکی و لایه‌های درشت‌دانه‌ی محصور بین قسمت‌های بتنی و ریزدانه‌ی سازه‌های هیدرولیکی، در این لایه‌ها جریان از همه طرف با یک لایه‌ی غیر قابل نفوذ یا لایه‌ی با نفوذپذیری بسیار کم نسبت به مصالح سنگریزه‌ای در تماس می‌باشد.

سه جمله‌ای (رابطه ۴) در تحلیل جریان غیر ماندگار درون محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بررسی شده‌است.

### مواد و روش‌ها

#### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه زنجان استفاده شده‌است. آزمایش‌ها درون سیلندری فولادی به قطر ۱۶ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر که ۴۰ سانتی‌متر آن از سنگدانه پر شده، انجام شده و جهت ایجاد جریان غیرماندگار با استفاده از روش ثقیلی، مخزنی در ارتفاع ۱۳ متری از ورودی سیلندر و بر روی پشت بام قرار داده شده‌است. مخازن مورد استفاده و سیلندر فولادی مذکور در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مشخصات مصالح استفاده شده در سه اندازه ریز، متوسط و درشت در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی در شکل ۲ آورده شده‌است. همچنین مقادیر مربوط به گرادیان هیدرولیکی (i) بر حسب سرعت جریان (V) برای سه‌دانه‌بندی مذکور در شکل ۳ ارائه شده‌است. شایان ذکر است، جهت اندازه‌گیری دبی در زمان‌های مختلف که توسط دوربین‌های فیلمبرداری صورت گرفته، از روش حجمی و برای اندازه‌گیری عمق آب، از پیزومترهایی که در ابتدا و انتهای سیلندر نصب گردیده، استفاده شده‌است. به‌عبارت دیگر، ابتدا با استفاده از پمپ قرار گرفته در آزمایشگاه، آب به مخزن روی پشت بام منتقل شده و سپس با استفاده از روش ثقیلی، جریان غیرماندگار از درون سیلندر فولادی عبور داده شده و تغییرات دبی و عمق آب (پیزومترهای ورودی و خروجی) در زمان‌های مختلف با استفاده از فیلمبرداری توسط دوربین ثبت شده و سپس دبی با استفاده از روش حجمی محاسبه گردید.

$$a = 214 \frac{M^2(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} \quad b = 1.57 \frac{M(1-n)}{gn^3 d}$$

$$M = 1 + \frac{2}{3} \frac{d}{D(1-n)} \quad (12)$$

روابطه (۷ الی ۱۲) و روابط متعددی از جمله روابط ارائه شده توسط (Stephenson, 1979; Sidiropoulou et al., 2007; Sedghi and Rahimi, 2011)، جهت محاسبه ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) و در شرایط جریان ماندگار ارائه شده‌است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است و در حال حاضر در مسائل بهینه‌سازی مهندسی عمران و مهندسی منابع آب مانند عملکرد مخزن (Nagesh Kumar and Janga Reddy, 2007)، مدیریت کنترل سیل (Meraji, 2004)، مدیریت کیفیت آب (Afshar et al. 2011; Lu et al., 2002; Chau, 2005) و بهینه‌یابی ضرایب روش ماسکینگام (Chu and Chang, 2009; Moghaddam et al., 2016; Bazargan and Norouzi, 2018; Norouzi and Bazargan, 2020) کاربرد دارد.

به‌همین دلیل در پژوهش حاضر، جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دو جمله‌ای فورشه‌ایمر (رابطه ۳) و ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای Polubarinova-Kochino (رابطه ۴) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده‌است.

گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل درشت‌دانه برابر با شیب خط انرژی ( $S_f$ ) است (Stephenson, 1979; Bari and Hansen, 2002; Bazargan and Shoaie, 2006). محاسبه گرادیان هیدرولیکی در تحلیل جریان ماندگار (استفاده از دو روش تئوری جریان‌های متغیر تدریجی که جریان را به‌صورت یک بعدی تحلیل می‌کند و حل معادله پارکین که جریان را به‌صورت دو بعدی تحلیل می‌نماید) و جریان غیر ماندگار (حل معادلات سنت ونانت) اهمیت بالایی دارد. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر، تاثیر جمله‌ی سوم رابطه

جدول ۱- مشخصات مصالح آزمایشگاهی

مصالح	$d_0$ (mm)	$d_{10}$ (mm)	$d_{30}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)	$d_{100}$ (mm)	ضریب یکنواختی (-)	ضریب انحنا (-)	تخلخل (-)
ریزدانه	۴	۷	۱۰	۱۲/۵	۱۴/۵	۲۲	۱/۶۹	۰/۶۹	۰/۳۵۸
اندازه متوسط	۴/۷۵	۱۴/۵	۱۸/۵	۱۹	۲۱/۳	۳۲	۱/۱۶	۰/۹۵	۰/۴۱۰
درشت‌دانه	۱۲/۷	۲۲/۷	۲۳/۹	۲۲	۲۵/۰۵	۳۲	۱/۱۱	۰/۹۹	۰/۴۴۸

در جدول ۱، ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) برابر با  $\frac{D_{60}}{D_{10}}$  و ضریب انحنا ( $C_c$ ) برابر با  $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$  است.



الف- مخزن و سیلندر قرار گرفته در آزمایشگاه

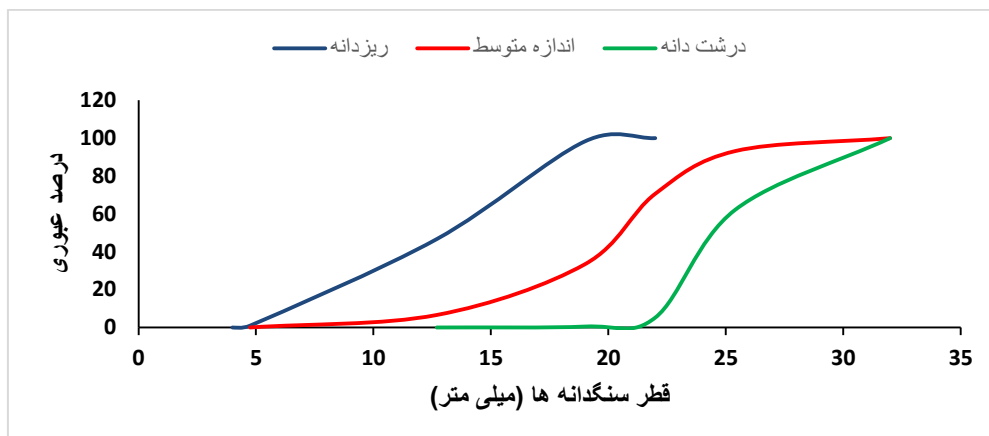


ب- مخزن قرار گرفته در پشت بام



ج- سیلندر فولادی

شکل ۱- نمای کلی دستگاه‌های آزمایشگاهی



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح مختلف

هزینه‌ای کمتر (یا تابع سودی بیشتر) از  $x_j^{gBest}$  باشد جایگزین این ذره خواهد شد و مقدار هزینه و موقعیت این ذره به‌روزرسانی خواهد شد.

معادله به‌روزرسانی سرعت دارای سه مؤلفه می‌باشد. مؤلفه اول این معادله هم‌راستا با سرعت ذره در مرحله قبلی می‌باشد و به همین دلیل این مؤلفه به مؤلفه اینرسی موسوم است. مؤلفه مذکور نمایان‌گر تمایل ذرات گروه برای حفظ جهت حرکت خود در فضای جست و جو می‌باشد.

همان‌طور که در معادله (۱۳) مشاهده می‌شود، عملکرد الگوریتم تحت تأثیر بهترین موقعیت هر ذره (بهترین تجربه انفرادی ذره) و همچنین موقعیت بهترین ذره در همسایگی (بهترین تجربه جمعی) همان ذره می‌باشد. به عبارتی هر ذره با نسبت خاصی، به سمت بهترین مقدار خود و به سمت بهترین ذره همسایگی خود جذب می‌شود. به همین جهت مؤلفه‌های این معادله به مؤلفه شناختی<sup>۱</sup> و مؤلفه اجتماعی<sup>۲</sup> موسوم می‌باشد (Shi and Eberhart, 1998; Di Cesare et al., 2015).

به طور کلی مراحل شبیه‌سازی الگوریتم مورد نظر به شرح زیر می‌باشد:

- ۱) ایجاد جمعیت اولیه به‌طور تصادفی.
- ۲) تخصیص شایستگی بر مبنای رتبه جبهه مغلوب نشده و فاصله ازدحامی آنها
- ۳) انتخاب بهترین ذره براساس فاصله ازدحامی
- ۴) به‌روزرسانی  $c_1$ ،  $c_2$  و  $w_i$ .
- ۵) به‌روزرسانی سرعت، موقعیت ذره و آرشیو الگوریتم
- ۶) تکرار مراحل قبل تا رسیدن به شرط توقف

### الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup>

این الگوریتم برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابره‌ه‌ارت و کندی معرفی شد (Eberhart and Kennedy, 1995). الگوریتم ازدحام ذرات یک الگوریتم جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت است که همانند الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه‌ها، زنبور عسل و ... الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که بر پایه هوش جمعی و رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها طرح‌ریزی شده است. از مزایای الگوریتم ازدحام ذرات می‌توان به ساختار و پیاده‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی بالا و همچنین بازده محاسباتی بالا اشاره کرد.

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله  $t+1$  ام از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر منظور از  $z$  مولفه نام بردار  $z$  باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از (Eberhart and Kennedy, 1995):

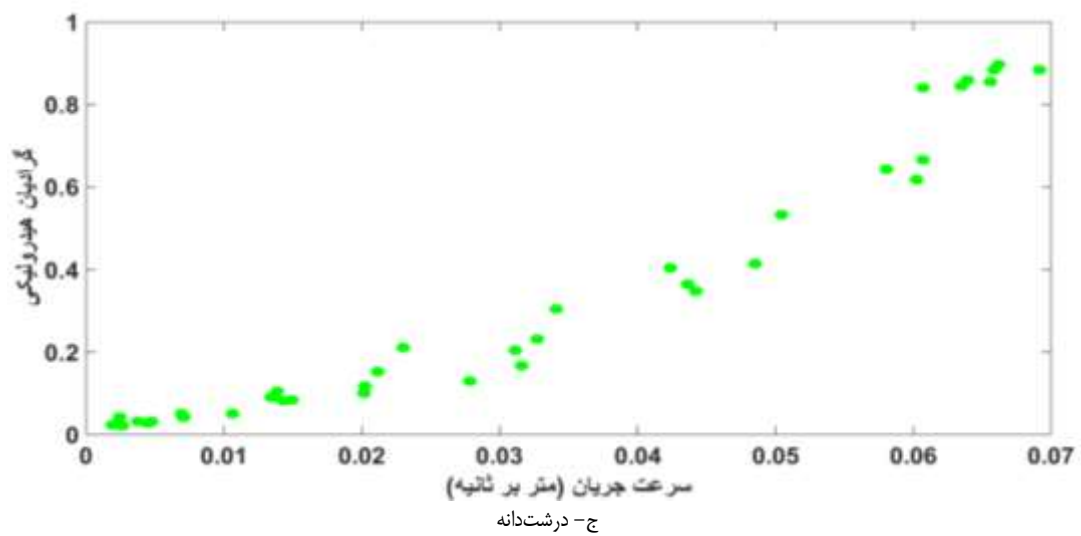
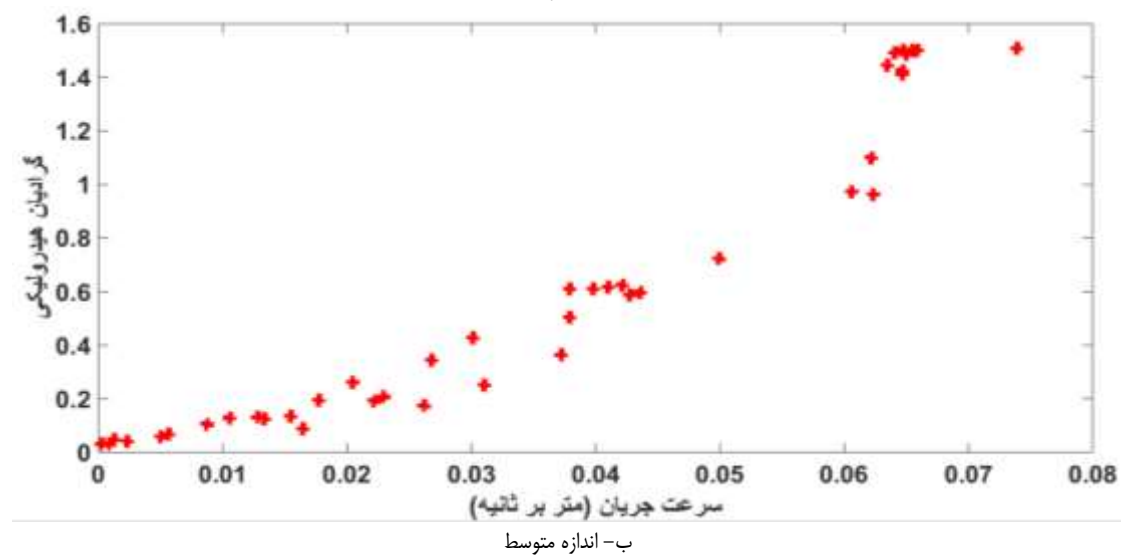
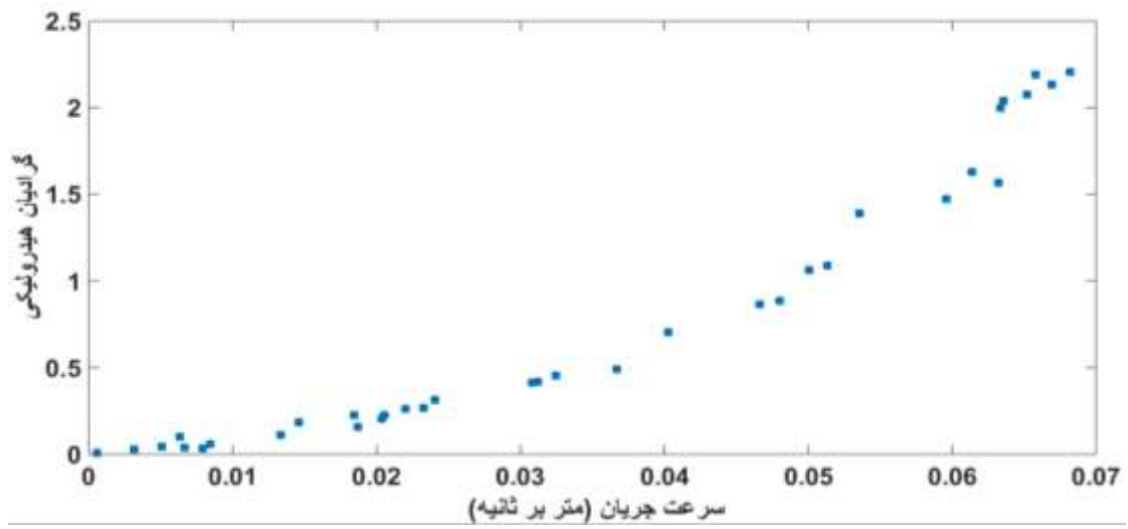
$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{iBest}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{gBest}[t] - x_j^i[t]) \quad (13)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (14)$$

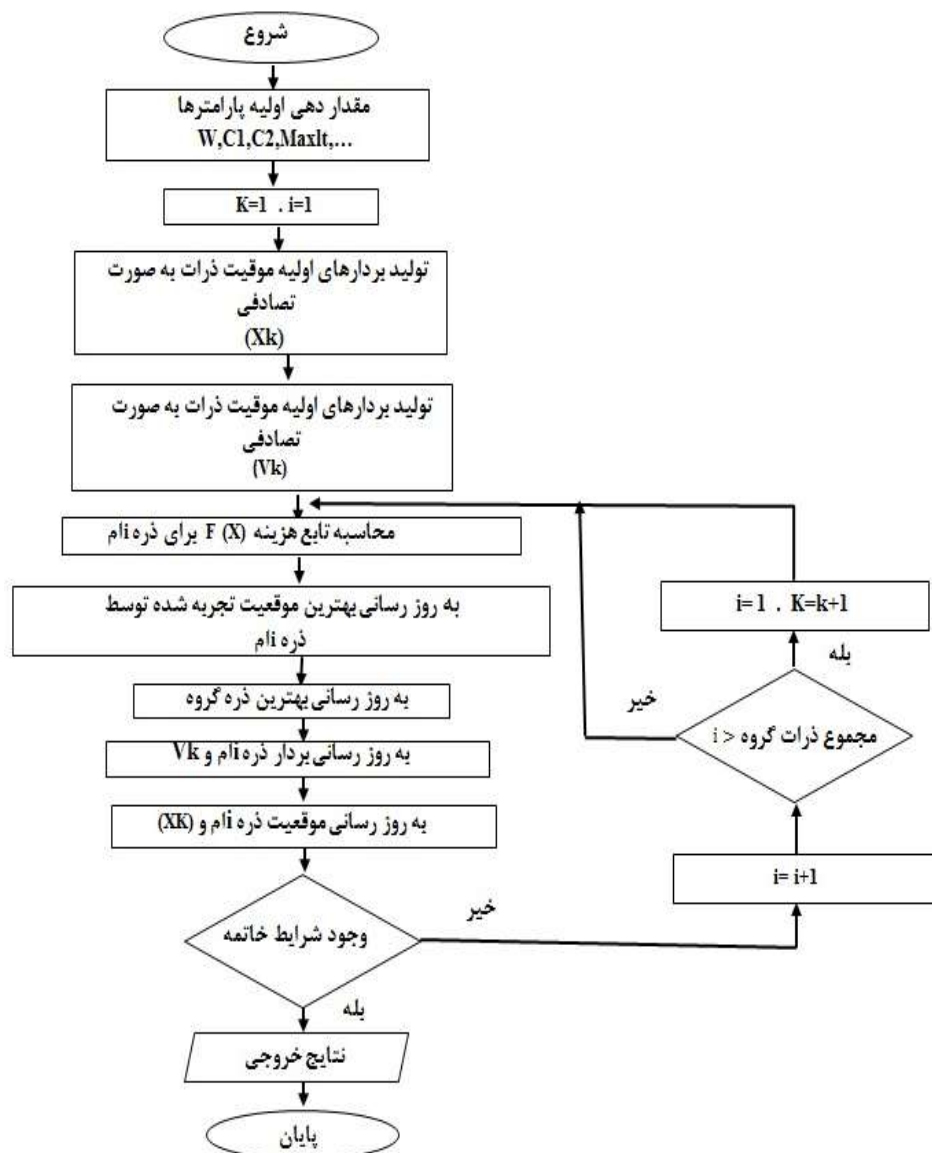
که  $w$  ضریب اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه‌ی  $(0,1)$  با توزیع یکنواخت و همچنین  $c_1$  و  $c_2$  پارامترهای یادگیری هستند که باعث می‌شوند نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و در این صورت جست‌جوی کامل‌تری روی فضای مربوطه انجام پذیرد، مقدار این پارامترها در بازه  $(0,2)$  انتخاب می‌شوند.  $c_1$  (پارامتر شناختی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل  $c_2$  (پارامتر اجتماعی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. در معادله فوق با گذشت زمان اگر ذره‌ای دارای تابع

1- Cognitive component  
2- Social component

1- Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm



شکل ۳- گرادینان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان ثبت شده در آزمایشگاه



شکل ۲- روندنما الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

SAD در شکل ۲ ارائه شده است.

### نتایج و بحث

مصالح سنگریزه‌ای کاربرد فراوانی در مهندسی و به‌خصوص در طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارد. از جمله جریان تحت فشار عبوری از محیط سنگریزه‌ای، می‌توان فیلترهای درشت‌دانه‌ی سدهای خاکی و لایه‌های درشت‌دانه‌ی محصور بین قسمت‌های بتنی و ریزدانه‌ی سازه‌های هیدرولیکی را نام برد. سازه‌های مذکور، بایستی در شرایط جریان غیرماندگار نیز کارایی خود را حفظ نمایند. جهت تحلیل جریان غیرماندگار، از معادلات سنت و نانت استفاده می‌شود و محاسبه شیب

برای ارزیابی مقادیر بهینه ضرایب رابطه دوجمله‌ای (a, b) و سه‌جمله‌ای (a, b, c)، از کمینه کردن مقدار مجموع انحراف مطلق (SAD) که به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود، به عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده‌است:

$$SAD = \sum_{i=1}^n |I_i - I_i| \quad (15)$$

که در آن  $I_i$ ،  $I_i$  به‌ترتیب گرادیان هیدرولیکی مشاهداتی و گرادیان هیدرولیکی به‌دست آمده با استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای (محاسباتی) هستند.

روندنما استفاده شده در پژوهش حاضر جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای (a, b, c) با استفاده از الگوریتم PSO و تابع هدف

ماندگار (Hosseini and Joy, 2007) استفاده شده است. در حالیکه نتایج پژوهش حاضر که در محیط تحت فشار (سیلندر فولادی) انجام شده، بیانگر آنست که، در محیط سنگریزه‌ای تحت فشار، عملکرد رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴) نسبت به رابطه دو جمله‌ای (رابطه ۳)، از دقت بالاتری برخوردار است.

مقادیر مربوط به ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌یابی شده و همچنین مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) مربوط به هر سه دانه‌بندی (ریزدانه، اندازه متوسط و درشت‌دانه) در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲- مقادیر ضرایب a, b بهینه‌یابی شده و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) گرادیان هیدرولیکی

MRE %	b (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	a (s/m)	مصالح
۱۵/۹۵	۳۴۹/۹۹	۳/۷۲	ریزدانه
۲۵/۱۱	۱۷۶/۲۹	۷/۳۸	اندازه متوسط
۱۹/۷۸	۹۳/۱۹	۵/۳۲	درشت‌دانه

ضرایب a, b, c که با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌یابی شده و همچنین مقادیر مربوط به MRE در جدول ۳ بیان شده است.

خط انرژی در حل معادلات مذکور، اهمیت بالایی دارد. از آنجایی که در محیط متخلخل درشت‌دانه، شیب خط انرژی (S<sub>f</sub>) برابر با گرادیان هیدرولیکی (i) می‌باشد (Stephenson, 1979; Bari and Hansen, 2002; Bazargan and Shoaeei, 2006). به همین دلیل، یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی جریان غیرماندگار در محیط سنگریزه‌ای در حالت جریان آزاد و تحت فشار، محاسبه گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. در پژوهش‌های قبلی (شکری و همکاران ۱۳۹۰، Hannoura and McCorquodale, 1985) که در محیط متخلخل سطح آزاد در حالت جریان غیرماندگار انجام شده، مقدار جمله‌ی سوم رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴)، بسیار ناچیز بیان شده است و یا برای تحلیل جریان غیرماندگار، از ضرایب a, b به دست آمده از جریان

چنانچه به جای استفاده از رابطه دو جمله‌ای، از رابطه سه جمله‌ای جهت برآورد گرادیان هیدرولیکی استفاده شود، مقادیر بهینه مربوط به

جدول ۳- مقادیر بهینه ضرایب رابطه سه جمله‌ای و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) گرادیان هیدرولیکی

MRE %	c (s <sup>2</sup> /m)	b (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	a (s/m)	مصالح
۱۳/۶۳	۱۰/۴۹	۳۶۶/۳۹	۲/۷۲	ریزدانه
۲۱/۴۱	۳۹/۱۹	۲۴۹/۵۱	۳/۸۱	اندازه متوسط
۱۷/۳۶	۲۵/۱۶	۱۴۶/۰۱	۲/۵۰	درشت‌دانه

جریان غیرماندگار در محیط متخلخل تحت فشار بیانگر آن است که، مقدار ضریب c قابل صرف نظر کردن نبوده و از آنجاییکه مقدار ضریب C<sub>m</sub> نیز رابطه مستقیم با ضریب c دارد، با افزایش مقدار ضریب c، مقدار ضریب C<sub>m</sub> نیز افزایش یافته است.

جدول ۴- مقادیر ضریب جرم اضافه شده (C<sub>m</sub>) در دانه‌بندی‌های مختلف

C <sub>m</sub> (-)	c (s <sup>2</sup> /m)	n (-)	مصالح
۵۷/۳۸	۱۰/۴۹	۰/۳۵۸	ریزدانه
۲۶۷/۱۶	۳۹/۱۹	۰/۴۱۰	اندازه متوسط
۲۰۰/۳۲	۲۵/۱۶	۰/۴۴۸	درشت‌دانه

در شرایطی رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴)، دقت بیشتری نسبت به رابطه دو جمله‌ای (رابطه ۳) دارد که حاصل ضرب مقدار c در dv/dt در

طبق جداول ۲ و ۳، مقادیر مربوط به گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار-غیرداری در محیط متخلخل تحت فشار در حالت استفاده از رابطه سه جمله‌ای نسبت به رابطه دو جمله‌ای از دقت بیشتری برای هر سه دانه‌بندی برخوردار است.

در پژوهش انجام شده توسط هانورا و مک کورکودال که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در محیط تحت فشار انجام شده، مقدار ضریب C<sub>m</sub> که در رابطه (۵) بیانگر جرم اضافه شده می‌باشد، در بازه ۰ تا ۱/۵ بیان شده است (Hannoura and McCorquodale, 1985). در حالی که نتایج پژوهش حاضر، بیانگر مقادیر متفاوتی به شرح جدول ۴ برای ضریب مذکور در هر سه دانه‌بندی می‌باشد.

مقدار ضریب جمله‌ی سوم (c)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم PSO بهینه‌یابی شده است. سپس طبق رابطه (۵)، با داشتن مقادیر ضریب c و تخلخل (n) هر یک از مصالح، می‌توان مقدار ضریب C<sub>m</sub> را محاسبه کرد. نتایج آزمایشگاهی در حالت



محاسبه گرادیان هیدرولیکی تاثیر داشته باشد. در جدول ۵، مقادیر میانگین هر یک از ضرایب رابطه سه جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی محاسباتی برای هر سه نوع مصالح بیان شده است.

جدول ۵- مقادیر میانگین درصد نسبت ضرایب رابطه سه جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی

مصالح	$(aV/i)*100$	$(bV^2/i)*100$	$(c(dV/dt)/i)*100$
ریزدانه	۲۲/۰۱	۷۰/۷۶	۷/۲۳
اندازه متوسط	۲۸/۵۷	۵۶/۶۴	۱۴/۴۹
درشت‌دانه	۳۳/۴۹	۴۹/۵۰	۱۷/۰۱

۲) در پژوهش صورت گرفته در محیط متخلخل سطح آزاد، مقدار ضریب  $C_m$  که در رابطه مربوط به ضریب  $C$  استفاده می‌شود، در بازه ۰ تا ۱/۵ بیان شده است. در حالیکه نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که، مقدار ضریب  $C_m$  در مصالح ریزدانه ۵۷/۳۸، در مصالح با اندازه متوسط ۲۶۷/۱۶ و در مصالح درشت‌دانه ۲۰۰/۳۲ به دست آمده است.

۳) با افزایش قطر مصالح، رابطه غیر دارسی (غیر خطی) نسبت به رابطه دارسی (خطی) کارایی بیشتری دارد. به همین دلیل، جمله‌ی سوم نسبت به گرادیان هیدرولیکی  $(cdv/dt)/i * 100$ ، در مصالح ریزدانه ۷/۲۳، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷۹ و در مصالح درشت‌دانه ۱۷/۰۱ درصد می‌باشد.

محاسبه تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه برای تحلیل جریان غیر ماندگار با استفاده از معادلات سنت و نانت اهمیت بالایی دارد. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که رابطه سه جمله‌ای نسبت به رابطه دو جمله‌ای از دقت بالاتری در محاسبات مربوط به تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان برخوردار است. به عبارت دیگر، استفاده از رابطه سه جمله‌ای نسبت به رابطه دو جمله‌ای، در مصالح ریزدانه ۱۴/۵، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷ و در مصالح درشت‌دانه ۱۲/۲ درصد باعث بهبود نتایج شده است. همچنین، مقدار ترم سوم رابطه سه جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی با افزایش قطر مصالح، افزایش یافته است.

## منابع

- شکری، م.، صبوری، م.، بیات، ح.، و صادقیان، ج. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی جریان غیرخطی غیرماندگار در محیط متخلخل سنگریزه‌ای. مجله آب و فاضلاب. ۲۳(۴): ۱۰۵-۱۱۵.
- صلاحی، م.، صدقی اصل، م.، و پرویزی، م. ۱۳۹۳. مطالعه آزمایشگاهی جریان غیردارسی درون مصالح متخلخل دانه ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۴۱۳-۴۲۲.
- صلاحی، ر.، رحیمی، ح.، و امید، م. ۱۳۸۴. بررسی جریان آشفته

با افزایش قطر مصالح، رابطه خطی (دارسی) کارایی خود را از دست داده و از رابطه غیر خطی (غیر دارسی) جهت تحلیل جریان عبوری از محیط متخلخل استفاده می‌شود. به عبارتی، سرعت جریان در مصالح ریزدانه (دارسی) به صورت آرام بوده و تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان نیز به تبع آن به صورت خطی می‌باشد. در حالیکه با افزایش قطر مصالح، جریان علاوه بر حالت آرام، در ناحیه انتقالی و آشفته نیز می‌توان قرار گیرد. در این حالت (محیط متخلخل درشت‌دانه)، تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان از حالت خطی خارج شده و به سمت غیر خطی شدن سوق پیدا می‌کند و جهت تحلیل آن از رابطه دو جمله‌ای و نمایی در حالت ماندگار که رابطه دو جمله‌ای دقت بیشتری نسبت به رابطه نمایی دارد، استفاده می‌شود. جهت تحلیل جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار، نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که با افزایش قطر مصالح، مقدار ترم سوم رابطه سه جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش قطر مصالح، تاثیر جمله‌ی سوم  $(cdV/dt)$  در محاسبه تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان افزایش یافته و جریان به سمت غیر خطی شدن سوق می‌یابد و رابطه سه جمله‌ای نسبت به رابطه دو جمله‌ای از دقت بالاتری برخوردار است.

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی و تحلیل جمله‌ی سوم رابطه سه جمله‌ای و تاثیر آن بر روی دقت محاسبات گرادیان هیدرولیکی در حالت جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار (سیلندر فولادی) و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است. به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

۱) چنانچه از رابطه دو جمله‌ای جهت محاسبه گرادیان هیدرولیکی استفاده شود، میانگین خطای نسبی (MRE) برای مصالح ریزدانه، اندازه متوسط و درشت‌دانه به ترتیب ۱۵/۹۵، ۲۵/۱۱ و ۱۹/۷۸ درصد و در حالت استفاده از رابطه سه جمله‌ای، مقادیر مذکور به ترتیب ۱۳/۶۳، ۲۱/۴۱ و ۱۷/۳۶ درصد به دست آمده است.

- ASCE, 111(5): 783-799.
- Hansen, D. Garga, V. K. and Townsend, D. R. 1995. Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. *Canadian Geotechnical Journal* 32(2): 223-232.
- Hosseini, S.M., and Joy, D.M. 2007. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. *International Journal of River Basin Management* 5(4): 253-265.
- Kovács, G. 1980. *Developments in water science: seepage hydraulics*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kumar, D.N., and Reddy, M.J. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE* 133 (3), 192–201.
- Leps, T.M. 1973. Flow through rockfill, Embankment-dam engineering casagrande volume edited by Hirschfeld, RC and Poulos, SJ.
- Lu, W.Z., Fan, H.Y., Leung, A.Y.T., and Wong, J.C.K. 2002. Analysis of pollutant levels in central Hong Kong applying neural network method with particle swarm optimization. *Environmental Monitoring and Assessment* 79(3): 217-230.
- Mccorquodale, J.A., Hannoura, A.A.A., and Sam Nasser, M. 1978. Hydraulic conductivity of rockfill. *Journal of Hydraulic Research* 16(2): 123-137.
- McWhorter, D.B., Sunada, D.K., and Sunada, D.K. 1977. *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publication. LLC. U.S.Library.
- Meraji, S.H. 2004. Optimum design of flood control systems by particle swarm optimization algorithm, (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Iran University of Science and Technology).
- Moghaddam, A., Behmanesh, J., and Farsijani, A. 2016. Parameters estimation for the new four-parameter nonlinear Muskingum model using the particle swarm optimization. *Water Resources Management* 30(7): 2143-2160.
- Nagesh Kumar, D., and Janga Reddy M. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *J Water Resour Plan Manag* 133:192–201.
- Norouzi, H., and Bazargan, J. 2020. Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Water Supply*.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. 2011. Adoption of درون محیط های متخلخل سنگریزه ای تحت فشار. *مجله علوم کشاورزی ایران*. ۲۶(۲): ۲۶۳-۲۷۱.
- Afshar, A., Kazemi, H., and Saadatpour, M. 2011. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. *Water resources management*, 25(10), 2613-2632.
- Ahmed, N., and Sunada, D.K. 1969. Nonlinear flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division* 95(6): 1847-1858.
- Bari, R., and Hansen, D. 2002. Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams. *Journal of Hydraulic Research* 40(6): 673-683.
- Bazargan, J., and Norouzi, H. 2018. Investigation the Effect of Using Variable Values for the Parameters of the Linear Muskingum Method Using the Particle Swarm Algorithm (PSO). *Water Resources Management* 32(14): 4763-4777.
- Bazargan, J., and Shoaie, S.M. 2006. Discussion, "Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams." *IAHR J. of Hydraulic Research* 44(1): 138-141.
- Chau, K. 2005. A split-step PSO algorithm in prediction of water quality pollution. In *International Symposium on Neural Networks* (pp. 1034-1039). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Chu, H.J., and Chang, L.C. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(9):1024-1027.
- Di Cesare, N., Chamoret, D., and Domaszewski, M. 2015. A new hybrid PSO algorithm based on a stochastic Markov chain model. *Advances in Engineering Software* 90: 127-137.
- Eberhart, R., and Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (pp. 39-43). IEEE.
- Ergun, S. 1952. Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress* 48: 89–94.
- Fand, R. M., and Thinakaran, R. 1990. The influence of the wall on flow through pipes packed with spheres.
- Forchheimer, P. 1901. *Wasserbewegung Durch Boden*, Z.Ver, Deutsh. Ing., 45: 1782-1788.
- Hannoura, A.A., and McCorquodale, J.A. 1985. *Rubble Mounds: Hydraulic Conductivity Equation*, J. Waterway, Port, Costal and Ocean Engineering,

Shi, Y., and Eberhart, R. 1998. A modified particle swarm optimizer. In 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360) (pp. 69-73). IEEE.

Ward, J.C. 1964. Turbulent flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division. 90(5): 1-12.

Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. Journal of Hydraulic Research 49(6): 814-817.

Stephenson, D.J. 1979. Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier scientific publishing company. Distributors for the United States and Canada.

Sidiropoulou, M.G., Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A. 2007. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. Hydrological Processes: An International Journal 21(4): 534-554.

## Experimental Study of Hydraulic Gradient Changes in Unsteady flow within Confined Drainage Materials

R. Nasiri<sup>1</sup>, H. Norouzi<sup>2\*</sup>, J. Bazargan<sup>3</sup>

Received: Sep.09, 2020

Accepted: Oct.21, 2020

### Abstract

Unsteady flow analysis is performed using the equations of St. Venant. Calculating the slope of the energy line ( $S_f$ ) is of great importance in the analysis of unsteady flow. Since  $S_f$  is equal to the hydraulic gradient ( $i$ ) in a coarse porous media, the calculation of  $i$  is of great importance. In the present study, using experimental data recorded in a steel cylinder with a diameter of 16 cm and a length of 70 cm, 40 cm of which is filled with rockfill with three small, medium, and large grains, investigated the unsteady flow in a confined porous media. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the Forchheimer binomial relation coefficients used in steady flow ( $a$ ,  $b$ ) and the triplet relation used in unsteady flow ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ). The results of the present study indicate that the values related to the mean relative error (MRE) in the case of using a triple relation to the binomial relation to calculate the hydraulic gradient of unsteady flow, in small materials 14.5, in medium materials 14.7 and in large material, it has improved by 12.2%. The value of the third sentence is a triple relation to the hydraulic gradient ( $(cdv/dt)/i$ ) in 7.23% in small materials, 14.79% in medium materials, and 17.01% in large materials. In other words, since with increasing the diameter of the material, the efficiency of the nonlinear (non-Darcy) relation increases compared to the linear (Darcy) relation, the third sentence of the triple relation also has a greater effect on the hydraulic gradient calculations.

**Keywords:** Confined drainage materials, Hydraulic gradient, Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Triple relation, Unsteady flow

1- Post Graduate Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: hadinorouzi72@gmail.com)