

مقاله علمی-پژوهشی

## محاسبه گرادیان هیدرولیکی درون مصالح زهکشی غیر همگن افقی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۳

### چکیده

تحلیل جریان ماندگار درون مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از دو روش تئوری جریان‌های متغیر تدریجی که جریان را به صورت یک بعدی تحلیل می‌کند و حل معادله پارکین که جریان را به صورت دو بعدی تحلیل می‌نماید، انجام می‌شود. محاسبه گرادیان هیدرولیکی (i) در هر دو روش اهمیت بالایی دارد. اغلب پژوهش‌های انجام شده در این زمینه در محیط‌های سنگریزه‌ای همگن انجام شده و بررسی‌های محدودی در زمینه جریان در محیط‌های سنگریزه‌ای غیر همگن صورت گرفته‌است. در این تحقیق، از نتایج آزمایش‌های موجود در محیط سنگریزه‌ای همگن و غیر همگن افقی که سه لایه مصالح با اندازه ذرات درشت، متوسط و ریزدانه بر روی هم قرار گرفته‌اند، استفاده شده‌است. در داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در پژوهش حاضر، تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان در هر یک از سه لایه همگن، به صورت جداگانه و متفاوت در دسترس بوده و همچنین تغییرات مذکور در محیط غیر همگن افقی متشکل از سه لایه نیز به صورت جداگانه در دسترس بوده‌است. با توجه به اینکه جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی، لایه‌های همگن درشت، متوسط و ریز به ترتیب بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، در راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر نیز داده‌های جریان ماندگار محیط همگن با همان ترتیب در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) و به تبع آن محاسبه گرادیان هیدرولیکی قرار داده شده‌اند. به عبارت دیگر، در پژوهش حاضر مقادیر مربوط به ضرایب a و b معادل در محیط سنگریزه‌ای غیر همگن افقی با توجه به نحوه قرارگیری لایه‌های همگن بر روی یکدیگر و فقط با استفاده از داده‌های جریان ماندگار در محیط همگن (درشت دانه، متوسط و ریز دانه) بهینه‌یابی شده و نتایج بیانگر آن است که، اختلاف میانگین خطای نسبی (MRE) راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر نسبت به شرایطی که از داده‌های جریان در محیط غیر همگن افقی به طور مستقیم جهت محاسبه ضرایب a و b و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی استفاده شود، برابر با ۱/۳۸ درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، جریان ماندگار، گرادیان هیدرولیکی، مصالح زهکشی غیر همگن افقی

### مقدمه

(1977):

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

(۱)

که در آن v: سرعت جریان (m/s)، k: قابلیت هدایت هیدرولیکی (s/m) که بستگی به خصوصیات فیزیکی ذرات و مشخصات جریان دارد و i: گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد) است.

در محیط‌های متخلخل دانه درشت نظیر شن و قلوه سنگ، سرعت جریان افزایش یافته و جریان به طور آرام نخواهد بود. در این نوع جریان‌ها، رابطه داری کارآیی خود را از دست داده (Hansen et al., 1995) و رابطه بین سرعت منفذی جریان و گرادیان هیدرولیکی در جریان‌های غیرداری به صورت غیر خطی است که معمولاً به دو صورت توانی و چند جمله‌ای مطابق با روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند

در حالت کلی، جریان آب در محیط‌های متخلخل، می‌تواند به دو صورت شکل بگیرد. در محیط‌های متخلخل با مصالح ریزدانه از قبیل خاک رس و سیلت، با توجه به سرعت کم، جریان به طور آرام و لایه‌ای می‌باشد. برای تحلیل و محاسبات مشخصات این نوع جریان‌ها از قبیل سرعت، دبی، تراز انرژی و سطح آزاد آب، از رابطه داری به شکل رابطه (۱) استفاده می‌گردد (McWhorter et al.,

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

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

درون محیط‌های سنگریزه‌ای همگن را مورد بررسی قرار داده‌اند. Sedghi-Asl and Ansari, 2016; Di Nucci, 2018) جریان حسینی به بررسی محیط متخلخل درشت‌دانه همگن و غیر همگن افقی در حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار پرداخته و روابطی را جهت محاسبه ضرایب رابطه دو جمله‌ای (فورشه‌ایمر) در محیط غیر همگن افقی ارائه کرده‌است (Hosseini, 1997). آسیابان و همکاران به منظور بررسی نیم‌رخ سطح آب در محیط‌های متخلخل (با هدف سدهای خاکی چند لایه) از رابطه حاکم بر جریان‌های متغیر تدریجی استفاده کرده و روش عددی گام به گام مستقیم کلاسیک را برای حل معادله ذکر شده به کار گرفتند. به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل عددی از تست‌های آزمایشگاهی بر روی چهار مدل مختلف از سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از سنگدانه‌های گرد گوشه رودخانه استفاده کردند (Asiaban et al., 2015). حسونند و سامانی (۱۳۹۸) به بررسی ضریب آب‌گذری معادل در سدهای پاره‌سنگی دو لایه افقی و دو لایه عمودی پرداختند. نتایج آنها بیانگر آنست که در سدهای دو لایه افقی، لایه‌ی پایینی نسبت به لایه بالایی تاثیر بیشتری بر روی ضریب آب‌گذری معادل دارد و هر چه لایه پایینی درشت‌دانه‌تر باشد، ضریب آب‌گذری معادل نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین در سد پاره‌سنگی غیر همگن عمودی، ترتیب قرارگیری لایه‌ها بر روی ضریب آب‌گذری تاثیر نداشت و طول لایه‌ها اثرگذار خواهد بود. به طوری که هر چه لایه درشت‌دانه‌تر طول بیشتری داشته‌باشد، ضریب آب‌گذری معادل نیز افزایش می‌یابد.

در یک مقایسه کلی بین رابطه دو جمله‌ای و نمایی، دو رابطه تمایزهایی به شرح موارد زیر با یکدیگر دارند:

- (۱) تک جمله‌ای بودن رابطه نمایی سبب می‌شود که این رابطه فقط در دامنه محدودی از تغییرات عدد رینولدز (یا سرعت) قابل استفاده باشد (بازرگان و شعاعی، ۱۳۸۹).
- (۲) رابطه دو جمله‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی و معادله ناویر استوکس و هم‌چنین با نتایج آزمایش‌های تعداد بسیاری از محققان مطابقت دارد (Ward, 1964; Ahmed and Sunada, 1969).
- (۳) تفکیک اثرات خصوصیات جریان و ویژگی‌های مصالح متخلخل و حتی خواص سیال در رابطه دو جمله‌ای امکان‌پذیر است. در حالیکه در رابطه نمایی چنین نیست (بازرگان و بیات، ۱۳۸۱)
- (۴) رابطه دو جمله‌ای به شکل رابطه داری و یسباخ و با استفاده از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک جریان قابل تعریف است. در حالیکه رابطه نمایی چنین نیست (Stephenson, 1979; Leps, 1973).

جهت تحلیل یک بعدی جریان (تئوری جریان متغیر تدریجی) و دو بعدی جریان (حل معادله پارکین)، محاسبه گرادیان هیدرولیکی (i) از اهمیت بالایی دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت در محاسبات مشخصات جریان با استفاده از هر دو روش مذکور، مهم‌ترین قسمت، محاسبه گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده،

(Forchheimer, 1901; Leps, 1973; Stephenson, 1979).

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

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

در روابط فوق، V نشان دهنده سرعت منفذی، a و b مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل و سیال بوده و m و n ضرایبی هستند که علاوه بر خصوصیات محیط متخلخل و سیال، تابعی از ویژگی‌های جریان نیز هستند.

جهت تحلیل جریان ماندگار- غیر داری درون مصالح سنگریزه‌ای دو روش تحلیل یک بعدی جریان با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی و تحلیل دو بعدی جریان با استفاده از حل معادله پارکین به شرح زیر وجود دارد:

الف- تحلیل یک بعدی جریان با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی:

کاربرد تئوری جریان متغیر تدریجی در شبیه سازی جریان‌های مدفون توسط بری و هسنن مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش آنها، معادله دیفرانسیلی حاکم بر جریان با فرضیات جریان‌های غیر داری (روابط گرادیان هیدرولیکی) توسط روش گام به گام استاندارد حل شده‌است (Bary and Hansen, 2002).

برای حل معادله جریان متغیر تدریجی روش‌های بسیاری که برخی بر مبنای انتگرال‌گیری مستقیم و تعدادی بر اساس حل عددی می‌باشند، ارائه شده‌است. از روش‌های حل عددی انتگرال روش اویلر<sup>۱</sup>، اویلر اصلاح شده، رانگه کوتا<sup>۲</sup> و روش‌های حل تکراری همچون روش نیوتن رافسون<sup>۳</sup>، پاراساد<sup>۴</sup>، گام به گام استاندارد<sup>۵</sup> و کلاسیک می‌باشند.

ب- تحلیل دو بعدی جریان با استفاده از حل معادله پارکین:

پارکین برای اولین بار با ترکیب معادله پیوستگی و رابطه نمایی سرعت و گرادیان هیدرولیکی، معادله ای را به عنوان جایگزین معادله لاپلاس ارائه نمود. معادله یاد شده با معلوم بودن شرایط مرزی و مقدار ضریب تخلخل (n) قابل حل است. یکی از شرایط مرزی، پروفیل سطح آب می‌باشد (Arbhabharama and Dinoy, 1973; Scheidegger, 1958).

بازرگان و شعاعی (۱۳۸۹) در تحقیقات خود جریان در محیط‌های سنگریزه‌ای همگن را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و تئوری جریان‌های متغیر تدریجی مورد بررسی قرار دادند. محققین بسیاری از جمله (Ergun, 1952; Ward, 1964; Ahmed and Sunada, 1969; Sidiropoulou et al., 2007; Sadeghian et al., 2013;

- 1- Euler
- 2- Runge Kutta
- 3- Newton Raphson
- 4- Prasad
- 5- Standard step method

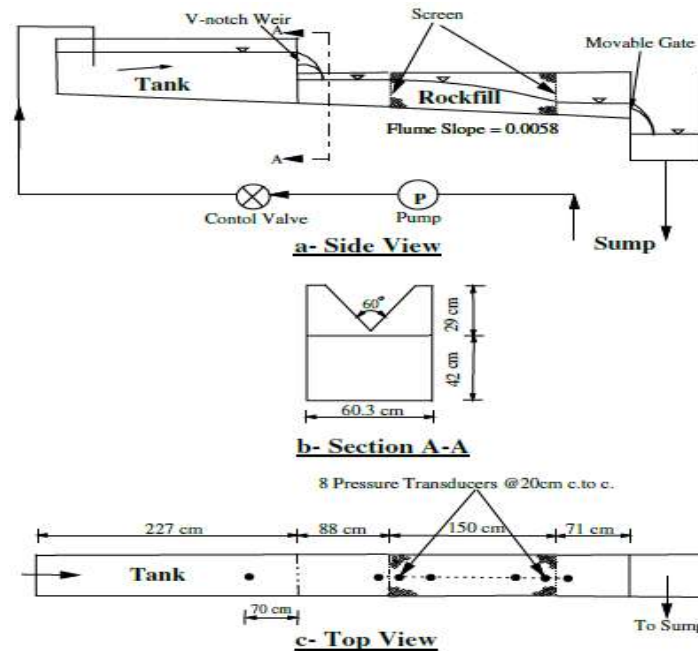
عبوری از سدهای سنگریزه‌ای همگن و غیر همگن صورت گرفته‌است. فلوم آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ می‌باشد. نحوه قرارگیری مصالح در حالت غیر همگن افقی به‌گونه‌ای است که در لایه‌ی زیرین، مصالح با اندازه درشت، سپس اندازه متوسط و در لایه بالایی مصالح ریز قرار داده شده‌است (شکل ۲). مشخصات مصالح استفاده شده در آزمایش‌های مذکور در جدول ۱ و مشخصات جریان ماندگار عبوری (عمق جریان در فواصل مختلف) با ۶ دبی مختلف، از مصالح با دانه‌بندی درشت، متوسط و ریزد و در حالت همگن به ترتیب در جدول‌های ۲ الی ۴ و در حالت غیر همگن افقی در جدول ۵ آورده شده‌است.

استفاده از رابطه دو جمله‌ای (فورشه‌ایمر) نسبت به رابطه نمایی، از دقت و کارایی بالاتری جهت محاسبه گرادیان هیدرولیکی برخوردار است.

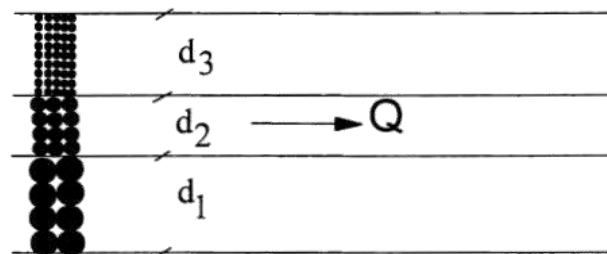
## مواد و روش‌ها

### داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی حسینی که به صورت محیط همگن برای مصالح با اندازه ذرات درشت، متوسط و ریز و همچنین محیط غیر همگن افقی برای دبی‌های مختلف و در حالت ماندگار مورد آزمایش قرار گرفته، استفاده شده‌است (Hosseini, 1997). مدل‌های آزمایشگاهی مذکور، جهت شبیه‌سازی جریان



شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی (Hosseini, 1997)



شکل ۲- نحوه قرارگیری مصالح در حالت غیر همگن افقی (Hosseini, 1997)

جدول ۱- مشخصات مصالح آزمایشگاهی (Hosseini, 1997)

مصالح	$d_{50}$ (mm)	$d_{10}$ (mm)	ضریب یکنواختی (-)	ضریب دانه‌بندی (-)	دانسیتته ذرات ( $g/cm^3$ )	تخلخل (-)	ضریب شکل (-)
ریزدانه	۸/۶	۵/۶	۱/۶۱	۱/۰۵	۲/۷۵	۰/۴۸۳	۰/۴۷
اندازه متوسط	۲۱/۱	۱۵/۱	۱/۴۵	۱/۱۳	۲/۷۱	۰/۴۵۸	۰/۵۳
درشت‌دانه	۲۶/۹	۲۰/۴	۱/۳۸	۱/۰۲	۲/۶۰	۰/۴۴۳	۰/۵۰

جدول ۲- مشخصات جریان در حالت همگن درشت‌دانه (Hosseini, 1997)

عمق جریان (میلی‌متر)						
آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	
۲/۸۹	۳/۸۴	۷/۶۷	۱/۱۸	۳/۴۳	۷/۰۹	دبی (L/s)
۱۹۱	۲۲۸	۳۵۳	۱۰۲	۲۰۴	۳۳۹	فاصله (m)
۱۹۱	۲۲۷	۳۵۲	۱۰۲	۲۰۴	۳۳۷	۰/۰۵
۱۸۶	۲۲۰	۳۳۷	۹۹	۱۹۷	۳۱۴	۰/۲۵
۱۷۵	۲۰۷	۳۱۷	۹۴	۱۸۵	۲۹۵	۰/۴۵
۱۶۵	۱۹۳	۲۹۲	۸۶	۱۶۹	۲۶۹	۰/۶۵
۱۵۰	۱۷۵	۲۶۵	۷۸	۱۵۳	۲۴۴	۰/۸۵
۱۳۷	۱۵۸	۲۳۲	۷۱	۱۳۷	۲۱۳	۱/۰۵
۱۲۰	۱۳۵	۱۷۱	۵۷	۱۱۱	۱۷۰	۱/۲۵
۹۰	۹۵	۱۱۴	۳۱	۵۴	۸۳	۱/۴۵
۸۱	۸۴	۹۷	۱۹	۳۷	۶۹	۱/۵

جدول ۳- مشخصات جریان ماندگار عبوری از درون مصالح همگن با اندازه ذرات متوسط (Hosseini, 1997)

عمق جریان (میلی‌متر)						
آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	
۰/۹۳	۲/۷۸	۵/۵۶	۱	۲/۸۹	۵/۶۲	دبی (L/s)
۱۰۷	۲۱۳	۳۳۰	۱۰۷	۲۱۳	۳۳۷	فاصله (m)
۱۰۶	۲۱۲	۳۲۸	۱۰۸	۲۱۳	۳۳۶	۰/۰۵
۱۰۲	۲۰۳	۳۱۴	۱۰۴	۲۰۴	۳۱۲	۰/۲۵
۹۵	۱۸۸	۲۹۲	۹۶	۱۸۹	۲۹۱	۰/۴۵
۸۹	۱۷۵	۲۶۸	۹۰	۱۷۶	۲۶۷	۰/۶۵
۸۱	۱۵۸	۲۴۱	۸۰	۱۵۷	۲۳۹	۰/۸۵
۷۱	۱۳۶	۲۰۷	۷۰	۱۳۷	۲۰۸	۱/۰۵
۵۷	۱۰۵	۱۵۷	۵۳	۱۰۴	۱۵۹	۱/۲۵
۴۰	۶۷	۹۴	۳۱	۶۴	۱۰۲	۱/۴۵
۳۰	۵۳	۷۶	۱۶	۳۹	۷۸	۱/۵

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

این الگوریتم برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابره‌ارت و کندی معرفی شد (Eberhart and Kennedy, 1995). الگوریتم ازدحام ذرات یک الگوریتم جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت است که

در شکل ۲، ضخامت لایه درشت دانه، اندازه متوسط و ریزدانه به‌ترتیب ۱۲، ۱۲ و ۱۶ سانتی‌متر هستند. (Hosseini and Joy, 2007).

1- Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm

ذرات می‌توان به ساختار و پیاده‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی بالا و همچنین بازده محاسباتی بالا اشاره کرد.

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

جدول ۴- دبی و عمق جریان در فواصل مختلف درون محیط همگن ریزدانه (Hosseini, 1997)

عمق جریان (میلی‌متر)						دبی (L/s)	فاصله (m)
آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶		
۱/۰۱	۲/۵۳	۳/۹۷	۱/۰۸	۲/۶۵	۴/۴۱۱		
۱۴۳	۲۵۰	۳۳۰	۱۴۴	۲۵۲	۳۳۴		۰
۱۴۲	۲۴۸	۳۳۰	۱۴۴	۲۵۱	۳۳۲		۰/۰۵
۱۳۵	۲۳۶	۳۱۴	۱۳۷	۲۳۹	۳۱۷		۰/۲۵
۱۲۶	۲۲۱	۲۹۳	۱۲۷	۲۲۲	۲۹۵		۰/۴۵
۱۱۵	۲۰۲	۲۶۸	۱۱۶	۲۰۲	۲۶۹		۰/۶۵
۱۰۲	۱۸۱	۲۴۱	۱۰۳	۱۸۲	۲۴۳		۰/۸۵
۸۹	۱۶۰	۲۱۲	۹۰	۱۶۱	۲۱۴		۱/۰۵
۷۰	۱۲۹	۱۷۳	۷۲	۱۳۱	۱۷۵		۱/۲۵
۳۴	۷۷	۱۰۹	۳۵	۷۹	۱۱۲		۱/۴۵
۱۱	۶۳	۸۹	۱۲	۶۲	۸۹		۱/۵

جدول ۵- داده‌های جریان ماندگار برای دبی‌های مختلف در محیط سنگریزه‌ای غیر همگن افقی (Hosseini, 1997)

عمق جریان (میلی‌متر)						دبی (L/s)	فاصله (m)
آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶		
۲/۳۹	۳/۹۳	۶/۳۱	۱/۲	۳/۴۹	۵/۷۱		
۱۸۴	۲۶۱	۳۸۰	۱۱۷	۲۳۹	۳۴۲		۰
۱۸۴	۲۶۰	۳۷۹	۱۱۶	۲۳۷	۳۴۰		۰/۰۵
۱۷۹	۲۵۰	۳۵۸	۱۱۴	۲۲۹	۳۲۳		۰/۲۵
۱۶۶	۲۳۳	۳۳۵	۱۰۵	۲۱۳	۳۰۰		۰/۴۵
۱۵۲	۲۱۱	۳۰۰	۹۵	۱۹۲	۲۶۸		۰/۶۵
۱۳۳	۱۸۷	۲۶۸	۸۴	۱۷۱	۲۳۸		۰/۸۵
۱۱۷	۱۶۳	۲۳۵	۷۴	۱۴۹	۲۰۶		۱/۰۵
۹۲	۱۲۹	۱۹۰	۵۸	۱۱۸	۱۵۹		۱/۲۵
۳۶	۶۰	۱۲۵	۲۳	۴۹	۶۷		۱/۴۵
۲۴	۵۴	۱۱۰	۱۹	۴۱	۵۹		۱/۵

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (5)$$

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 پارامترهای در بازه  $(0,2)$  انتخاب می‌شوند.  $c_1$  (پارامتر شناختی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و

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  $\lambda$ م بردار  $z$  باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از (Eberhart and Kennedy, 1995):

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{iBest}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{gBest}[t] - x_j^i[t]) \quad (4)$$

گرادیان هیدرولیکی (i) ارائه می‌شود. به عبارت دیگر در این پژوهش، تنها با استفاده از داده‌های جریان ماندگار عبوری از محیط همگن و توجه به نحوه قرارگیری مصالح جهت ساخت محیط غیر همگن افقی، ضرایب a و b رابطه دو جمله‌ای با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌یابی می‌شود. شایان ذکر است، در راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر، نیازی به داشتن داده‌های جریان عبوری از محیط غیر همگن افقی نمی‌باشد و تنها با داشتن گرادیان هیدرولیکی و سرعت هر یک از لایه‌های همگن، ضرایب a و b معادل و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی محیط غیر همگن افقی محاسبه می‌شود.

به عبارتی، پژوهش حاضر از مراحل زیر تشکیل شده‌است:

۱. جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b)، گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محیط غیرهمگن افقی مطابق شکل (۵) محاسبه شده و سپس جهت برازش رابطه دو جمله‌ای (جهت بهینه‌یابی ضرایب مذکور)، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده‌است.

۲. از آنجاییکه جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی در آزمایشگاه، مصالح درشت‌دانه، متوسط و ریزدانه مطابق شکل (۲) به ترتیب بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، مطابق راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر، داده‌های جریان عبوری از آن‌ها نیز با همان ترتیب درون محیط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات قرار داده شده و سپس ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) معادل بدون نیاز به داده‌های جریان در محیط غیر همگن افقی بهینه‌یابی شده‌است.

## نتایج و بحث

محاسبه گرادیان هیدرولیکی (i) جهت تحلیل یک بعدی (تئوری جریان متغیر تدریجی) و دو بعدی (حل معادله پارکین) جریان درون مصالح سنگریزه‌ای از اهمیت بالایی دارد. معمولاً ضرایب رابطه دو جمله‌ای (رابطه ۳) یا رابطه نمایی (رابطه ۲) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان مصالح همگن با اندازه ذرات درشت، متوسط و ریز مورد استفاده در پژوهش حاضر که تنها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و بدون استفاده از الگوریتم مذکور و رابطه دو جمله‌ای یا نمایی به دست آمده‌است، در شکل ۴ آورده شده‌است. همچنین مقادیر مربوط به ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) هر یک از مصالح مذکور نیز در جدول ۶ ارائه شده‌است. شایان ذکر است، جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b)، طبق رابطه  $i = aV + bV^2$ ، بایستی مقادیر گرادیان هیدرولیکی (i) نسبت به سرعت جریان (V) مطابق شکل‌های ۴ و ۵ رسم شده و سپس با برازش رابطه دو جمله‌ای فوق، ضرایب مذکور به گونه‌ای محاسبه گردد که رابطه دو جمله‌ای بالاترین دقت ممکن را داشته باشد، در پژوهش حاضر، جهت برازش

در مقابل  $c_2$  (پارامتر اجتماعی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. در معادله فوق با گذشت زمان اگر ذره‌ای دارای تابع 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 (۴) 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 به طور 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.

تابع هدف پژوهش حاضر در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، برای محاسبه مقادیر بهینه ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b)، کمینه کردن مجموع شاخص SAD مربوط به سه نوع مصالح (درشت، متوسط و ریز) می‌باشد. تابع هدف مذکور طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود. روندنا الگوریتم PSO در پژوهش حاضر نیز، به صورت شکل ۳ می‌باشد.

$$SAD = \sum_{i=1}^3 SAD_i \quad \text{And} \quad SAD_i = \sum_{j=1}^n |i_j - I_j| \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $i_j$ : گرادیان هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و  $I_j$ : گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده با استفاده از رابطه دو جمله‌ای (فورشه‌ایمر) می‌باشد.

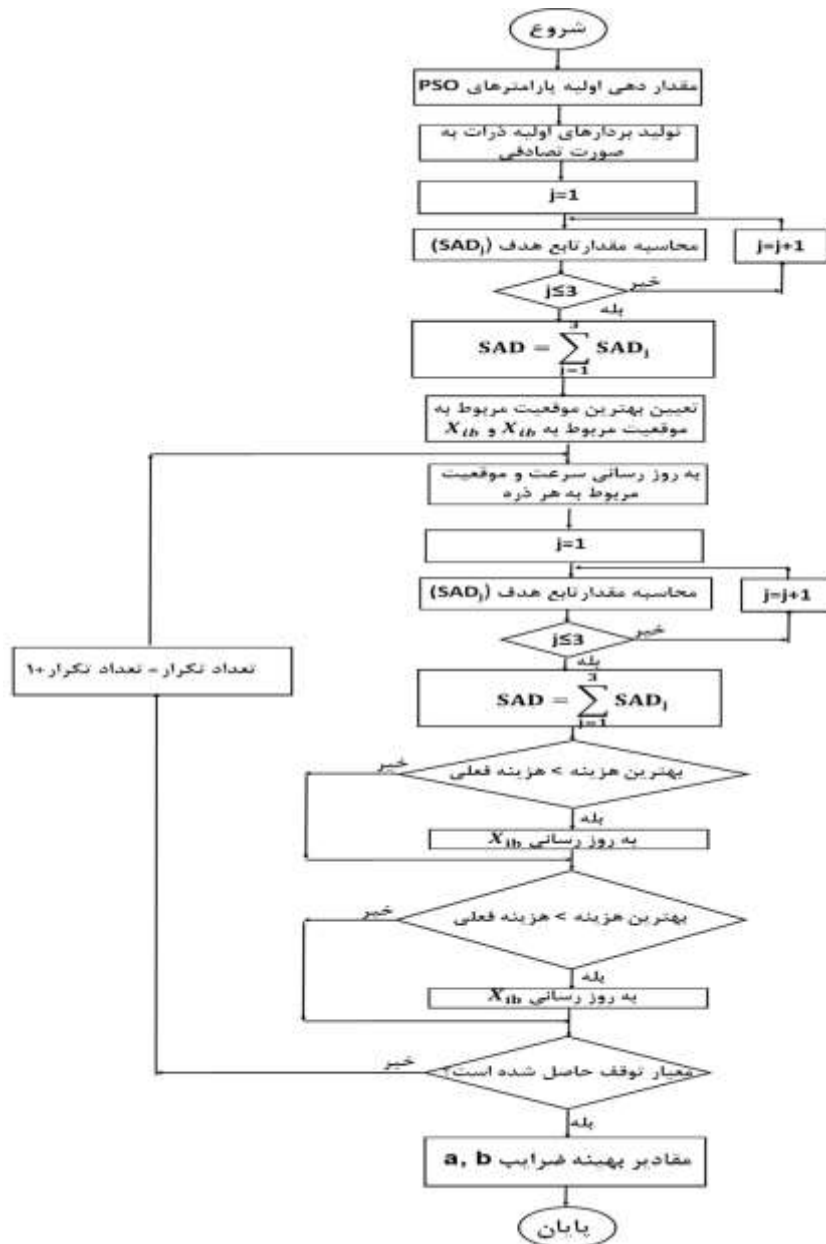
در پژوهش حاضر، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، راهکار جدیدی که از دقت بالایی نیز برخوردار است، جهت محاسبه ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) و به تبع آن محاسبه

1- Cognitive component

2- Social component

درون محیط سنگریزه‌ای غیر همگن صورت گرفته‌است.

و بهینه‌یابی ضرایب مذکور از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده‌است. بررسی‌های محدودی جهت محاسبه ضرایب مذکور



شکل ۳- روندنما الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

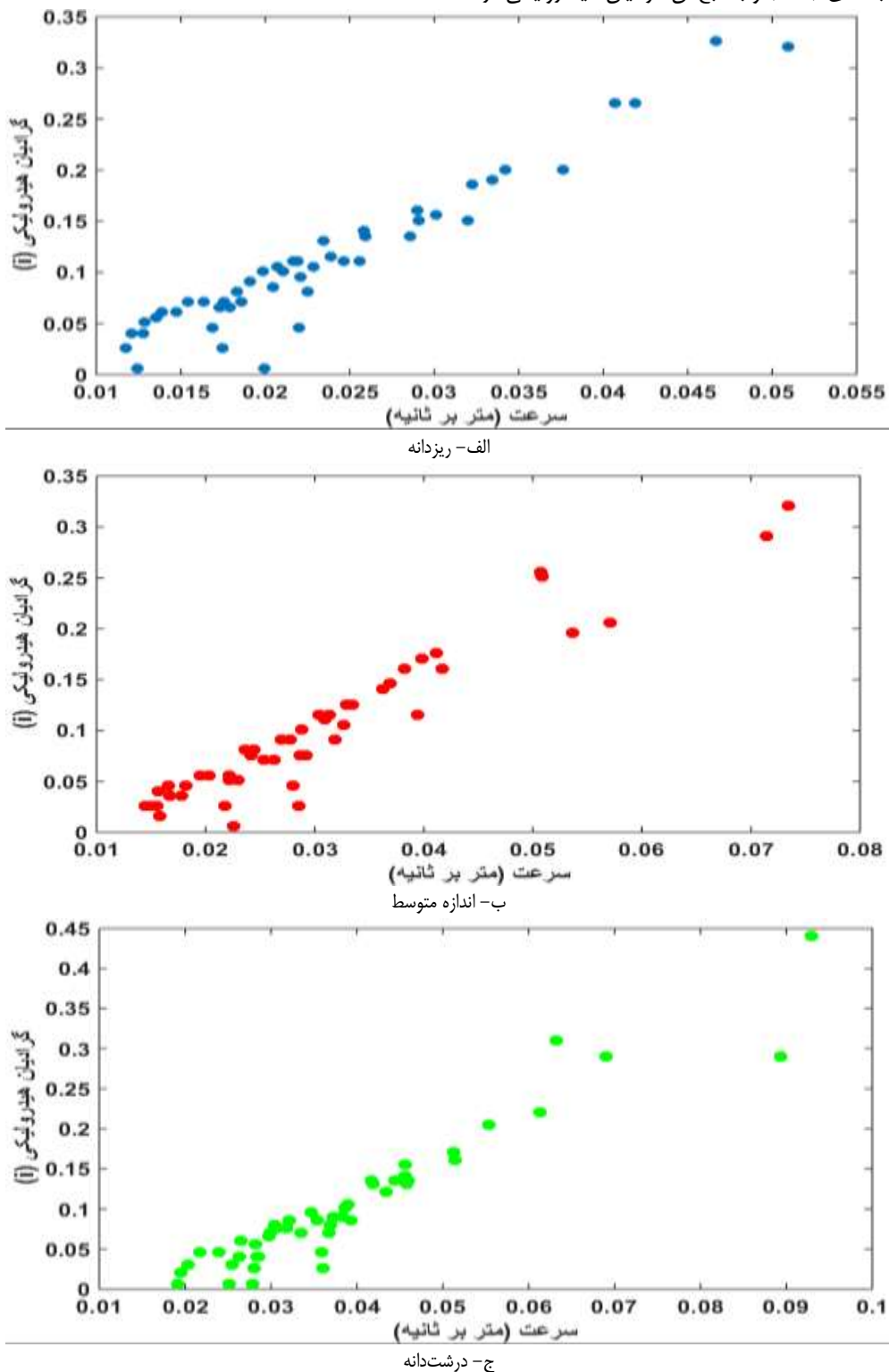
در این تحلیل‌ها، ضرایب رابطه دو جمله‌ای و یا نمایی با استفاده از برازش بر روی داده‌های آزمایشگاهی با تقریبی به‌دست آمده و سپس با استفاده از ضرایب مذکور، گرادیان هیدرولیکی برای سرعت‌های مختلف محاسبه شده و در تحلیل یک بعدی و دو بعدی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر، با توجه به نحوه چیدمان لایه‌های همگن جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی،

از آنجاییکه محاسبه گرادیان هیدرولیکی در تحلیل یک بعدی و دو بعدی جریان اهمیت بالایی دارد، یکی از اهداف بررسی جریان در محیط غیر همگن این است که بتوان روابط یا مدلی را ارائه نمود که در آن تنها با استفاده از داده‌های جریان در محیط همگن، گرادیان هیدرولیکی معادل در محیط غیر همگن را بدون نیاز به داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در محیط غیر همگن، محاسبه نمود. به‌عبارتی



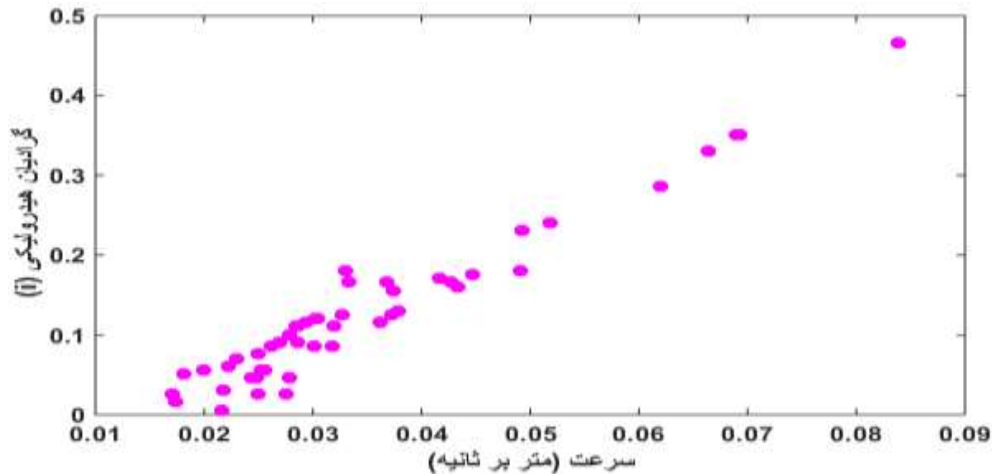
محیط غیر همگن افقی محاسبه شده‌است.

مدلی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده‌است که در آن تنها با استفاده از داده‌های جریان ماندگار در محیط همگن، ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی در



شکل ۴- گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان برای محیط سنگریزه‌ای همگن با اندازه مصالح، ریز، متوسط و درشت





شکل ۵- گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان در حالت محیط سنگریزه‌ای غیر همگن افقی

جدول ۶- مقادیر ضرایب a, b، بهینه‌یابی شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) مربوط به

مقایسه گرادیان هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی

MRE %	b	a	روش محاسبه و نوع محیط
۵۰/۴۱۳	۹۰/۹۲۶	۲/۵۴۴	داده‌های آزمایشگاهی محیط همگن ریزدانه
۵۰/۱۹۵	۲۸/۲۰۷	۲/۲۹۴	داده‌های آزمایشگاهی محیط همگن متوسط
۶۷/۴۹۵	۴۳/۱۸۷	۰/۹۰۳	داده‌های آزمایشگاهی محیط همگن درشت‌دانه
۵۰/۷۹۹	۴۵/۵۰۶	۱/۹۰۷	داده‌های آزمایشگاهی محیط غیر همگن افقی
۵۲/۱۷۹	۲۸/۰۸۷	۲/۱۳۱	راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر

ضرایب a و b به دست آمده برای محیط همگن، غیر همگن و راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر به شرح جدول ۶ می‌باشد. در تمامی حالت‌های مذکور، گرادیان هیدرولیکی با استفاده از ضرایب a و b بهینه و رابطه دوجمله‌ای محاسبه شده و با مقادیر به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) نیز در جدول ۶ آورده شده است.

ابتدا با استفاده از داده‌های ثبت شده در آزمایشگاه و مطابق با شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان به دست آمده و سپس با برازش رابطه‌ی دو جمله‌ای، مقادیر مربوط به ضرایب a و b و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده است. با مقایسه نتایج مذکور، مقادیر خطا در جدول ۶ بیان شده است.

مطابق با جدول ۶، میانگین خطای نسبی در محیط همگن ریزدانه برابر با ۵۰/۴۱۳ درصد، در محیط همگن با اندازه ذرات متوسط برابر با ۵۰/۱۹۵ درصد و در محیط همگن درشت‌دانه برابر با ۶۷/۴۹۵ به دست آمده است. به عبارت دیگر نتایج بیانگر آن است که رابطه‌ی دو جمله‌ای برای داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در پژوهش حاضر، دارای میانگین خطای نسبی بالاتر از ۵۰ درصد می‌باشد.

همچنین، مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی در شرایط استفاده مستقیم از داده‌های آزمایشگاهی جریان در محیط غیر همگن

سپس جهت صحت سنجی گرادیان هیدرولیکی محیط غیر همگن که با استفاده از راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر و داده‌های جریان در محیط همگن به دست آمده است، از آنجاییکه داده‌های آزمایشگاهی جریان ماندگار در محیط غیر همگن نیز در دسترس می‌باشد، گرادیان هیدرولیکی به دست آمده با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) ارائه شده در جدول ۶ بیانگر دقت مناسب مدل ارائه شده است. چنانچه بخواهیم، گرادیان هیدرولیکی را با استفاده از رابطه دو جمله‌ای و داده‌های ثبت شده در آزمایشگاه محاسبه نماییم، میانگین خطای نسبی برابر با ۵۰/۷۹۹ درصد بوده و مقدار مذکور با استفاده از راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر برابر با ۵۲/۱۷۹ درصد محاسبه شده است. به عبارت دیگر، میانگین خطای نسبی راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر (توجه به نحوه قرارگیری لایه‌های محیط همگن جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات) نسبت به روش معمول (که در آن بایستی جریان ماندگار از درون محیط غیر همگن عبور داده شده و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان رسم شده و سپس با برازش، ضرایب رابطه دو جمله‌ای محاسبه شود) ۱/۳۸ درصد اختلاف داشته و بیانگر دقت بالای راهکار ارائه شده می‌باشد.

حسنوند، ک.، و محمدولی سامانی، ج. ۱۳۹۸. تعیین ضریب آب‌گذری معادل در سدهای پاره سنگی دو لایه افقی و دو لایه عمودی. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۲(۳): ۷۵-۸۸.

Ahmed, N. and Sunada, D. K. 1969. Nonlinear flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division, 95(6): 1847-1858.

Arbhabhira, A. and Dinoy, A.A. 1973. Friction factor and Reynolds number in porous media flow. Journal of the Hydraulics Division. ASCE. 99(6): 901-915.

Asiaban, P., Amiri Tokaldany, E., and Tahmasebi Nasab, M. 2015. Simulation of water Surface profile in vertically stratified rockfill dams. International Journal of Environmental Research. 9(4):1193-1200.

Bari, R. and Hansen, D. 2002. Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams. Journal of Hydraulic Research. 40(6): 673-683.

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.

Di Nucci, C. 2018. Unsteady free surface flow in porous media: One-dimensional model equations including vertical effects and seepage face. Comptes Rendus Mécanique. 346(5): 366-383.

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.

Forchheimer, P. 1901. Wasserbewegung Drunch Boden, Z. Ver, Deutsh. Ing., 45: 1782-1788.

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. 1997. Development of an unsteady non-linear model for flow through coarse porous media. Ph. D. Thesis. Dissertation University of Guelph. Canada.

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.

Leps, T.M. 1973. Flow through rockfill, Embankment-dam engineering casagrande volume edited by

افقی نیز برابر با ۵۰/۷۹۹ درصد و با استفاده از راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر (توجه به نحوه قرارگیری لایه‌های همگن جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی و صرفاً استفاده از داده‌های جریان در محیط همگن و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات)، برابر با ۵۲/۱۷۹ درصد محاسبه شده‌است.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، جهت محاسبه ضرایب  $a$  و  $b$  درون مصالح سنگریزه‌ای غیر همگن افقی، مطابق با ترتیب قرارگیری مصالح، مشخصات جریان درون محیط سنگریزه‌ای همگن نیز با همان ترتیب، درون محیط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات قرار داده شده و بدون نیاز به داده‌های آزمایشگاهی مربوط به محیط سنگریزه‌ای غیر همگن افقی و فقط با استفاده از داده‌های جریان در محیط همگن، ضرایب مذکور بهینه‌یابی شده‌است. به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. چنانچه ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جریان ماندگار در محیط غیر همگن افقی، مقادیر مربوط به گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده و سپس با برآزش رابطه دوجمله‌ای (گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان)، مقادیر مربوط به ضرایب  $a$  و  $b$  و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی محاسبه شود، میانگین خطای نسبی برابر با ۵۰/۷۹۹ درصد به‌دست آمده‌است.
  ۲. مقدار میانگین خطای نسبی در شرایط استفاده از راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر که در آن ضرایب رابطه دوجمله‌ای و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی، فقط با استفاده از داده‌های جریان در محیط همگن و توجه به نحوه قرارگیری لایه‌های همگن جهت تشکیل محیط غیر همگن افقی و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات محاسبه شده‌است، برابر با ۵۲/۱۷۹ درصد به‌دست آمده‌است.
- نتایج بیانگر آن است که؛ با استفاده از راهکار ارائه شده در پژوهش حاضر و بدون نیاز به داده‌های جریان ماندگار عبوری از محیط غیر همگن افقی، می‌توان با دقت مناسبی ضرایب رابطه دوجمله‌ای و به تبع آن گرادیان هیدرولیکی را محاسبه کرد.

## منابع

- بازرگان، ج.، و بیات، ح.، ۱۳۸۱. تعیین ضرایب معادله غیر خطی جریان در پی‌های آبرفتی درشت دانه. نشریه استقلال. ۲۱(۱): ۱۰۱-۱۱۲.
- بازرگان، ج.، و شعاعی، م. ۱۳۸۹. تحلیل جریان‌های غیر داری در مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی. نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری. ۴۴(۲): ۱۳۱-۱۳۹.

- 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.
- 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.
- Hirschfeld, RC and Poulos, SJ.
- McWhorter, D.B., Sunada, D.K. and Sunada, D.K. 1977. *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publication. LLC. U.S.Library.
- Sadeghian, J. Khayat Kholghi, M. Horfar, A. and Bazargan, J. 2013. Comparison of binomial and power equations in radial non-darcy flows in coarse porous media. *Journal of Water Sciences Research*. 5(1): 65-75.
- Scheidegger, A. E. 1958. The physics of flow through porous media. *Soil Science*. 86(6): 355.
- Sedghi-Asl, M. and Ansari, I. 2016. Adoption of extended dupuit-Forchheimer assumptions to non-darcy flow problems. *Transport in Porous Media*. 113(3): 457-469.
- Stephenson, D.J. 1979. Rockfill in hydraulic

## Calculation of Hydraulic Gradient within Horizontal Heterogeneous Drainage Materials Using Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm

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

Received: Mar.10, 2020

Accepted: May.23, 2020

### Abstract

The analysis of steady-state flow within rockfill materials is performed using two methods of gradually varied flow theory that analyzes the flow as one-dimensional and the Parkin equation that analyzes the flow as two-dimensional. The calculation of the hydraulic gradient ( $i$ ) is of great importance in both methods. Most of the research in this area has been done in homogeneous rockfill materials and limited studies have been carried out on the flow in heterogeneous rockfill materials. In this study, we used the results of experiments in homogeneous and horizontal heterogeneous rockfill materials with three layers of aggregates with large, medium and small size. In the experimental data used in the present study, changes in hydraulic gradient relative to the flow velocity in each of the three homogeneous layers were available separately and also the changes in the horizontal heterogeneous media consisting of three layers were available separately. Due to the fact that in order to form a horizontal heterogeneous rockfill media, large, medium, and small homogeneous layers are placed on top of each other, respectively, in the approach presented in the present study, the data of the steady flow of homogeneous media are placed in the same order in the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to optimize the coefficients of the binomial equation ( $a$ ,  $b$ ) and consequently the calculation of hydraulic gradient. In other words, in the present study, the values of the coefficients  $a$ ,  $b$ , equivalent to the horizontal heterogeneous media, depending on how the homogeneous layers are placed on top of each other and only using the data of steady flow in the homogeneous media (large, medium and small size) Optimized. The results show that the difference of mean relative error (MRE) the approach presented in the present study than conditions where flow data in a horizontal heterogeneous media are directly used to calculate the coefficients  $a$  and  $b$  and consequently the hydraulic gradient, is 1.38 percent.

**Keywords:** Horizontal Heterogeneous Drainage Materials, Hydraulic Gradient, Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Steady Flow

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
(\*- Corresponding Author Email: hadinorouzi72@gmail.com)