

## بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان در محیط‌های متخلخل دانه درشت

ابراهیم نوحانی<sup>۱\*</sup>، عزت‌اله عالی‌مکان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۲۵

### چکیده

با توجه به اینکه افزایش سرعت در حفرات یک محیط متخلخل، آشفته‌گی جریان را افزایش می‌دهد، استفاده از رابطه داری و روابطی که از فرض - های جریان لایه‌ای استفاده می‌کنند، از ضریب اطمینان خوبی برخوردار نیست. بنابراین نیاز به روابطی است که با در نظر گرفتن آشفته‌گی جریان، گرادیان هیدرولیکی را با توجه به سرعت جریان و مشخصات مکانیکی خاک، برآورد کند. از جمله روش‌هایی که از مقبولیت زیادی برخوردار است می‌توان به رابطه دو جمله‌ای فروش‌هایمر اشاره کرد. در این مطالعه با انجام آزمایشاتی روی جریان در محیط‌های متخلخل برای هفت خاک با دانه‌بندی مختلف، مقادیر آزمایشگاهی سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی اندازه‌گیری شد سپس روابط مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک به منظور اصلاح ضرایب رابطه فروش‌هایمر ارائه شد. الگوریتم ژنتیک مینی بر رفتار حرکت جامعه پرندگان و ماهی‌ها به دنبال شکار تعریف می‌شود. به منظور محاسبه ضرایب رابطه فروش‌هایمر، ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی عوامل موثر در برآورد این ضرایب تعیین شد و سپس با استفاده از پارامترهای بی‌بعد، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ضرایب اول و دوم رابطه فروش‌هایمر بر حسب خصوصیات مکانیکی محیط‌های متخلخل دانه درشت ارائه شد. نتایج نشان داد در پیش‌بینی ضرایب فروش‌هایمر روش الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین با توجه به این که رابطه فروش‌هایمر با دو روش متفاوت حل شده و هر دو روش به جواب‌های بسیار نزدیک به هم رسیده‌اند، بیانگر دقت حل روش‌های ارائه شده در این تحقیق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، رابطه فروش‌هایمر

### مقدمه

های سنگریزه‌ای در معرض عبور جریان است (قاضی مرادی، ۱۳۸۴). به علت افزایش سرعت جریان در داخل حفرات یک محیط متخلخل درشت‌دانه، جریان به صورت آشفته خواهد بود. بنابراین برای تحلیل آن‌ها به دلیل خارج شدن جریان از حالت آرام، امکان استفاده از رابطه داری وجود ندارد و روابط مبتنی بر فرض جریان‌های لایه‌ای، اعتبار خود را از دست می‌دهند. به همین جهت در مطالعات متنوعی، روابطی برای برآورد گرادیان هیدرولیکی این جریان‌ها بر حسب سرعت متوسط جریان در آن‌ها، پیشنهاد شده است که در این بین رابطه دو جمله‌ای فروش‌هایمر از فراگیری و مقبولیت بیشتری برخوردار است (بیر و همکاران، ۱۳۹۳). در برخی از مدل‌های ارائه شده، ضرایب جریان ناشی تنها به پارامترهای فیزیکی مصالح سنگ‌ریز بستگی دارند مانند روابط آرگون، ویلکینز، مک کرکودیل، استیفنسن و مارتینز (Ergun., 1952, Wilkins, 1956, McCorquodale., 1978, Stephenson., 1969, Martins., 1990). اما در روابط دیگر همچون وارد، این ضرایب تنها با این پارامترها قابل تعیین نبوده و تعیین آزمایشگاهی هدایت هیدرولیکی لازم خواهد بود (Ward., 1964). خلیفه و همکاران مطالعه‌ای بر روی تاثیر میزان آلودگی محیط متخلخل بر روی ضریب نفوذپذیری مصالح انجام دادند (Khalifa et

محیط‌های متخلخل دانه درشت کاربرد وسیعی در سدسازی، خاکریزها، توسعه‌ی سواحل، ریپرپها و موج‌شکن‌ها دارند. جریان نفوذی و گذرنده درون یک سد سنگریزه‌ای، نسبت به یک سد معمولی بسیار قابل توجه‌تر است. همچنین نیروهای ناشی وارده بر دانه‌های سنگ‌ریز کاملاً با نیروهای وارده بر مصالحی که جریان داری در آن‌ها برقرار است، متفاوت خواهد بود. شبکه‌ی جریان ناشی درون محیط سنگ‌ریز با عدد رینولدز جریان تغییر می‌کند. به دلیل آشفته‌گی جریان در محیط‌های سنگ‌ریز، برای تعیین دبی نشت، نیروهای نشت و شبکه‌ی جریان در ساختار سنگ‌ریز، بهره‌گیری از یک رابطه قابل اعتماد غیرداری اهمیت بالایی دارد. دانشی از ارتباط بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی، لازمه‌ی طراحی مهندسی سازه-

۱- استادیار گروه عمران، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دزفول، ایران  
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، ایران.  
\*نویسنده مسئول: (Email: Nohani\_e@yahoo.com)

می‌یابند. در آخرین پژوهش‌های به عمل آمده، پدیده عبور جریان از میان خلل و فرج سدهای پاره سنگی با عبور جریان از داخل لوله‌های تحت فشار شبیه‌سازی شده است. در این روش، مانند لوله‌ها عدد رینولدز و فاکتور اصطکاک در محیط سنگ دانه‌ای تعیین شده و رابطه‌ای بین آن‌ها برقرار گشته است (شایان‌نژاد، ۱۳۷۸). استفانسن، با شبیه‌سازی عبور جریان در محیط پاره‌سنگی و عبور جریان در لوله‌ها روابط خود را بیان نمودند (Stephenson., 1979). هررا و فلتون ضمن برطرف کردن ضعف‌های استفانسن در اولین گام برای تشریح دانه‌بندی و اعمال آن در رابطه‌های، انحراف معیار را معرفی نمودند (Herrera and Felton., 1991). قاضی مرادی و معصومی در سال ۱۳۷۳ به انجام پژوهش‌هایی در ادامه پژوهش‌های هررا و فلتون پرداختند. نوآوری کار آنان نسبت به محققین قبلی انتخاب اندازه سنگ دانه‌ها بود. بینگ جوم و گارگا با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های انجام شده توسط هانسن (Hansen., 1992) که بر روی قطرهای متوسط (۱/۴-۶ سانتی‌متر) انجام گرفت روابط خود را ارائه نمودند (Bingjum and Garga., 1998). جریان در محیط‌های متخلخل در مهندسی عمران آب و به‌خصوص مطالعات هیدرولیکی بر اهمیت می‌باشد. ارائه روابط دقیق برای محاسبه گرادیان این جریان‌ها بر حسب خصوصیات فیزیکی مصالح، مطالعه دقیق‌تر این جریان‌ها را میسر می‌سازد. با در دست داشتن این روابط برای مصالح خاص، می‌توان تقریب بسیار مناسبی از گرادیان جریان در محیط متخلخل خاص بدست آورد. بنابراین در این تحقیق جهت ارائه روابط بهینه شده برای ضرایب دو جمله‌ای فورس‌هایمر که نوآوری اصلی این طرح می‌باشد، از دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات استفاده شد. با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به‌عنوان جستجوگرهای جامع و فراکاشی، می‌توان روابط بهینه برای تطابق نتایج آزمایشگاهی و عددی را بدست آورد. به بیان دیگر، در این مطالعه تلاش می‌شود تا با استفاده از نتایج آزمایشات روی جریان در محیط‌های متخلخل درون فلوم و مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده‌ی گرادیان هیدرولیکی در آزمایشگاه و روابط بهینه‌سازی فراکاشی، بهترین روابط برای ضرایب رابطه‌ی دو جمله‌ای فورس‌هایمر ارائه شود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

مشخصات مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق شامل آب-انبار با طولی برابر ۱۲/۹ متر، ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر، عرض ۸۰ سانتی-متر، بدنه‌ی فلوم با طولی برابر ۱۵ متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر است که مجهز به سرریزهای جانبی، ورودی و خروجی

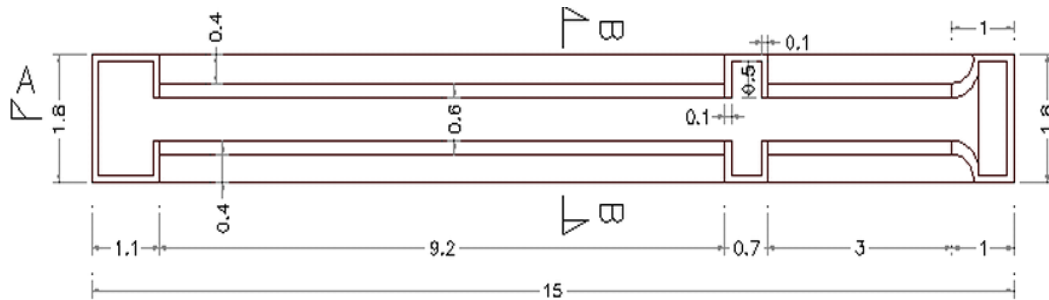
al., 2000). آنان توانستند یک رابطه بر مبنای فرمول هیزن<sup>۱</sup> ارائه نمایند. مارتینز و همکاران مطالعه‌ای بر روی مورفولوژی حفره‌ها و مجاری انجام دادند (Martins et al., 2007). آن‌ها به این نکته پی بردند که خصوصیات جریان درون محیط‌هایی با ذرات کروی، متناسب با حجم فضای خالی و چگونگی توزیع آن درون محیط مزبور تغییر می‌کند. زیکزینگ و همکاران مطالعه‌ای آزمایشگاهی در جهت بررسی خصوصیات نشت در محیط ماسه سنگی با تخلخل‌های مختلف انجام دادند (Xiexing et al., 2011). ایشان در مطالعه‌ی خود، با استفاده از یک سیستم الکتروهیدرولیکی خود تنظیم شونده با نام MTS815.02، و یک دستگاه تست نشت، خصوصیات نشت درون محیط ماسه سنگی را برای شرایط تخلخل مختلف و پنج دانه‌بندی متفاوت، مورد مطالعه قرار دادند. بالهوف و همکاران سعی در ارائه رابطه‌ای چند جمله‌ای برای توصیف جریان درون محیط‌های متخلخل در محدوده‌ی اعداد رینولدز پایین نمودند (Balhoff et al., 2010). نتایج مطالعه‌ی ایشان تفاوت قابل توجهی را با نتایج تجربی مشاهده شده از رابطه‌ی درجه دومی فورس‌هایمر<sup>۲</sup> نشان داد. ایشان معتقد بودند که برای یک محیط متخلخل همسان‌گرد، توان رابطه‌ی مورد استفاده به‌جای دو، می‌بایست چهار باشد. روچا و کروز مقاله‌ای را منتشر کردند که در آن جریان سه‌بعدی نشت کننده‌ی سیال غیرقابل تراکم درون محیط متخلخل را به روش‌های تحلیلی و عددی حل کرده بودند (Rocha and Cruz., 2010). محاسبه‌ی نفوذپذیری ذاتی و ظاهری این محیط متخلخل هدف تحلیل‌های انجام گرفته بود. حل عددی مطالعه‌ی ایشان نیز توسط روش المان محدود گالرکین<sup>۳</sup> صورت پذیرفت. ملک‌نژاد یزدی و همکاران (۱۳۸۹) مطالعه‌ی پیرامون بکارگیری سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی در تحلیل هیدرولیکی جریان در محیط متخلخل پاره سنگی منتشر کردند. ایشان ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ<sup>۴</sup> را با روش مذکور محاسبه کرده و با روابط تجربی مقایسه کردند. صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۹) به تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در شیب‌های افقی و چهار درصد پروفیل جریان درون زهکش‌های سنگ‌ریز از تئوری جریان متغیر تدریجی پیروی می‌نماید.

خیاط‌خلقی و همکاران (۱۳۹۴) تاثیر نفوذپذیری و پخشیدگی مولکولی بر الگوی جریان همرفتی در محیط‌های متخلخل درز و شکاف‌دار را مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق فوق نشان دادند که با کاهش ضریب پخشندگی مولکولی، املاح به واسطه حرکت در درز و شکاف‌ها به عمق بیش‌تری از محیط متخلخل انتقال

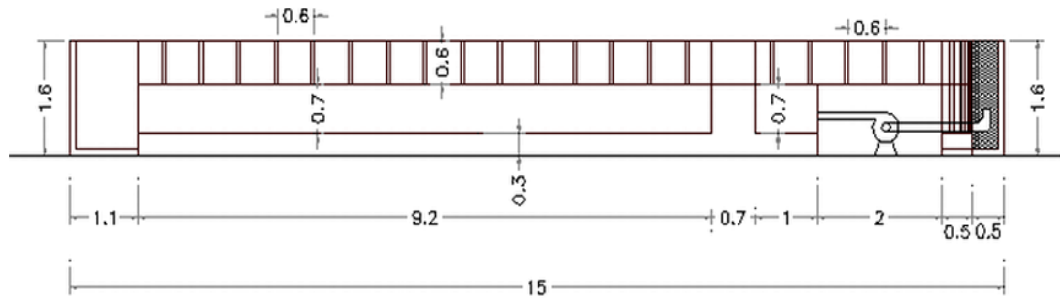
- 1-Hizen
- 2-Forchheimer
- 3-Galerkin
- 4-Darcy Weisbach coefficient

می‌باشد. سازه‌ی مخزن از جنس بتن‌آرمه است. بالای مخزن از پوشش دال‌های بتنی پیش‌ساخته با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد که صفحات پایه‌ی لچکی‌ها در فواصل ۶۰ سانتی‌متری در آن کار گذاشته شده است. روی این پوشش بتنی، فلوم اصلی شیشه‌ای قرار گرفته است. شیشه فلوم به ابعاد ۳/۸\*۳/۸\*۰/۶ متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر است و جهت اتصال آن‌ها و آب‌بندی فلوم از چسب آکواریوم استفاده شده است. سازه ورودی جریان به فلوم، حوضچه‌ای به ابعاد

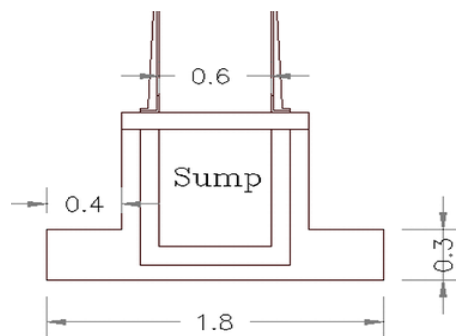
۱\*۱/۸ متر است و برای نرم‌شدن خطوط جریان، به حداقل رساندن اتلافات انرژی و همچنین ایجاد بیشینه آرامش جریان خروجی، حوضچه به شکل نیم‌دایره می‌باشد. به منظور تامین هد آب در فلوم شیشه‌ای از پمپی با سرعت چرخش ۲۹۰۰ دور در دقیقه با دبی اسمی ۲۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. کنترل دبی با دستگاه میکرومولینه انجام شد. پلان فلوم در شکل ۱ و برشی از این پلان در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.



شکل ۱- پلان فلوم موج مورد استفاده در این پژوهش (مقادیر به متر)



شکل ۲- برش A-A (طولی) فلوم و آب‌انبار زیرین آن (مقادیر به متر)



شکل ۳- برش B-B (عرضی) فلوم و آب‌انبار زیرین آن (مقادیر به متر است)

شده قرائت گردید. D10، D30، D60، مترادف با قطر دانه‌هایی هستند که به ترتیب ۱۰، ۳۰، ۶۰ درصد دانه‌های خاک از آن کوچک‌تر می‌باشند. شکل منحنی دانه‌بندی را می‌توان با استفاده از ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب خمیدگی (CC) که از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

### مشخصات فیزیکی نمونه‌ها

در این پژوهش هفت مخلوط مختلف جهت انجام آزمایشات تهیه گردید. جهت تولید منحنی دانه‌بندی از آزمایش دانه‌بندی استفاده شده. جهت تعیین تخلخل ( $n$ ) از توزین نمونه در حالت خشک و محاسبه حجم فضای خالی با فرو بردن در ظرف آب استفاده گردید. پارامترهای D10، D30 و D60 از روی نمودارهای دانه‌بندی تولید

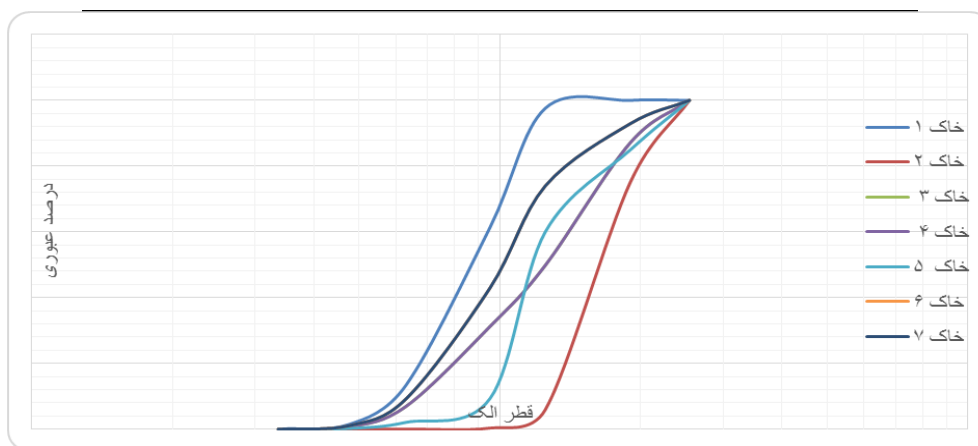
قطر الک و درصد عبوری به شرح جدول ۱ است.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

نتایج دانه‌بندی نمونه‌ها و رسم نمودارهای دانه‌بندی با توجه به

جدول ۱- درصدهای عبوری برای دانه‌بندی مصالح شماره دو درصدهای عبوری

خاک ۷	خاک ۶	خاک ۵	خاک ۴	خاک ۳	خاک ۲	خاک ۱	(قطرالک، میلی‌متر)
.	.	.	.	.	.	.	۳/۳۶
۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۲۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰	۱/۴	۴/۷۵
۹/۲	۹/۲	۲/۰۶	۶/۹۳	۶/۹۳	۰/۰۳	۱۳/۳۹	۶/۳
۴۲/۹۸	۴۲/۹۸	۹/۳۴	۳۱/۲۶	۳۱/۲۶	۰/۳۴	۶۱/۳۹	۹/۵۲۵
۷۳/۹۹	۷۳/۹۹	۶۰	۴۹/۸۳	۴۹/۸۳	۵/۹۲	۹۷/۶۲	۱۲/۵
۹۲/۹۴	۹۲/۹۴	۸۴/۹۷	۸۷/۱۸	۸۷/۱۸	۷۵/۱۹	۱۰۰	۱۹
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵/۴



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی هفت مصالح سنگی

جدول ۲- مشخصات فیزیکی هفت نمونه خاک برداشت از نمودارها

خاک	n	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>c</sub> (mm)	C <sub>u</sub> (mm)
۱	۰/۴۷۳	۵/۷	۷/۲	۹/۴	۰/۹۷	۱/۶۵
۲	۰/۳۶۴	۱۳	۱۵	۱۸	۱/۳۸	۰/۹۶
۳	۰/۴۰۱	۶/۷	۹/۲	۱۵	۲/۲۴	۰/۸۴
۴	۰/۳۷۱	۸	۱۰	۱۱	۱/۳۷	۱/۱۴
۵	۰/۴۲۸	۹/۷	۱۱	۱۲	۱/۲۴	۱/۰۴
۶	۰/۴۱۲	۶/۲	۷/۷	۱۱	۱/۷۷	۰/۸۴
۷	۰/۴۱	۷/۹	۱۱/۵	۱۵	۱/۹	۱/۱۲

### شاخص‌های خطا

در این تحقیق، تابع هدف برابر میزان خطای تجمعی بین مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی با مقادیری است که از روابط پیشنهادی به دست می‌آید. اگر بتوانیم مقدار این تابع هدف را توسط الگوریتم ژنتیک و روش ازدحام ذرات کمینه کنیم، در واقع به فرمول‌هایی دست پیدا کرده‌ایم که کم‌ترین فاصله و خطا را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی مشاهده شده ارائه می‌دهند. اگر در حالت ایده‌آل، به تابع هدف برسیم، بدان مفهوم است که روابط به دست آمده دقیقاً معادل

مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی است (بدون خطا). احتمال رسیدن به چنین نتیجه ایده‌آلی خیلی کم است اما تلاش ما این است تا با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مذکور تا آن جایی که ممکن است فاصله نتایج حاصله از فرمول‌ها و مشاهدات آزمایشگاهی را کاهش دهیم. شاخص‌های رایج خطا شامل شاخص متوسط قدرمطلق خطاها<sup>۱</sup>

1-Mean Absolute

یا درجه دوم خواهد بود. در راستای تشریح جریان‌ات غیرداری در مصالح درشت‌دانه نظریات مختلفی ارائه شده است که معروف‌ترین آن‌ها رابطه غیرخطی فورس‌هایمر می‌باشد (رابطه ۹).

$$i = aV + bV^2 \quad (9)$$

که در رابطه فوق به ترتیب  $i$ : گرادیان هیدرولیکی،  $V$ : سرعت جریان،  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که تابعی از ویژگی‌های جریان و محیط متخلخل هستند که با روش‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند.

### تحلیل ابعادی

فورس‌هایمر در روابط خود این دو پارامتر را به صورت اعدادی ثابت در نظر گرفت در حالی که پارامترهای دیگری علاوه بر سرعت، در تعیین گرادیان هیدرولیکی موثر می‌باشند که در این مطالعه به منظور تعیین دو پارامتر  $a$  و  $b$ ، پارامترهای موثر نیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای موثر فرض می‌شوند و پس از انجام آنالیز حساسیت و توصیه سایر محققین در استفاده از پارامترهای موثر، برخی از پارامترها به صورت مستقیم در رابطه استفاده می‌شوند و برخی پارامترها نیز به صورت غیرمستقیم اثر خود را در پارامترهای دیگر نشان می‌دهند. جلال‌الدینی در سال ۱۳۷۵ با انجام آزمایش‌هایی در موسسه تحقیقات حفاظت خاک و آب‌خیزداری کرج، رابطه‌ای بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری و اسیب‌خا را ارائه نمود. پارامترهای موثر در تعیین گرادیان هیدرولیکی را می‌توان به شکل رابطه ۱۰ ارائه داد.

(۱۰)

$i = f(R, V, \mu, g, K, \rho, D, f, n, D_{10}, D_{30}, D_{60}, C_u, C_c)$   
 در رابطه فوق به ترتیب،  $i$ : گرادیان هیدرولیکی،  $R$ : شعاع هیدرولیکی،  $V$ : سرعت جریان عبوری از کانال،  $\mu$ : گرانروی دینامیکی سیال،  $g$ : شتاب ثقل،  $k$ : ضریب نفوذپذیری ذاتی مصالح،  $\rho$ : جرم مخصوص سیال،  $D$ : قطر هیدرولیکی،  $f$ : ضریب اصطکاک،  $n$ : تخلخل،  $D_{10}$ ،  $D_{30}$  و  $D_{60}$  قطرهایی که به ترتیب ۱۰، ۳۰ و ۶۰٪ مصالح از آن‌ها کوچک‌تر هستند،  $C_u$ : ضریب شکل،  $C_c$ : ضریب انحنا می‌باشند. پارامترهای بی‌بعد حاصل از رابطه فوق را می‌توان به شکل رابطه ۱۱ ارائه داد.

$$i = f\left(\frac{\rho V D}{g} C_u, C_c, n\right) \quad (11)$$

پارامتر  $\frac{\rho V D}{g}$  عدد رینولدز می‌باشد که در جریان کانال‌های باز اهمیت قابل توجهی ندارد و بنابراین جهت برآورد گرادیان هیدرولیکی، این پارامتر در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین با توجه به توصیه محققان مختلف و هدف ما که ارائه ضرایب روابط فورس‌هایمر است، در این مطالعه به منظور برآورد این ضرایب از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود. این رابطه به صورت سه ساختار مختلف بیان می‌شود و ضرایب ثابت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات، برآورد می‌شود.

(MAE)، شاخص متوسط خطاها<sup>۱</sup> (MBE)، شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها<sup>۲</sup> (RMSE) و ... می‌باشند که به صورت روابط ۳ تا ۵ تعریف می‌شوند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{mi} - x_{ci}|}{n} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{ci})}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{ci})^2}{n}} \quad (5)$$

در معادلات فوق به ترتیب  $x_{mi}$ : مقدار اندازه‌گیری شده،  $x_{ci}$ : مقدار پیش‌بینی شده و  $\bar{x}_m$ : متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این تحقیق از شاخص خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربع‌ها<sup>۳</sup> (RMSE) استفاده شده است. این شاخص تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی می‌باشد. RMSE ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی توسط مجموعه داده‌ها است. این تفاوت‌های مجزا را مانده‌ها می‌نامند و خطای جذر میانگین مربعات برای جمع‌آوری آن‌ها در یک عدد کاربرد دارد. رابطه فورس‌هایمر

در آزمایش‌های انجام گرفته میزان اختلاف سطح آب در پیژومترها قرائت و ثبت شده است می‌توان افت انرژی برحسب ارتفاع ستون آب را بدست آورده و سپس با تقسیم آن بر طول نمونه، گرادیان هیدرولیکی را محاسبه نمود. به عبارتی اگر  $\Delta H$  اختلاف انرژی برحسب ارتفاع ستون آب در داخل دو لوله پیژومتر باشد، می‌توان نوشت (رابطه ۶):

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (6)$$

که در آن  $L$  طول نمونه است. جهت محاسبه سرعت واقعی در داخل سنگ‌دانه‌ها از رابطه ۷ استفاده شد.

$$V_a = \frac{V}{n^3} \quad (7)$$

که در آن  $V$  سرعت ظاهری و  $n$  تخلخل است که با توجه به دبی و سطح مقطع جریان که با داشتن ارتفاع پیژومتریک در هر مقطع و عرض ثابت فلوم شیشه‌ای از رابطه ۸ بدست آمد.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

از آنجایی که جریان سیالات در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه در کاربردهای متداول به صورت غیرداری است بنابراین برای تحلیل‌های مهندسی نمی‌توان از برخی روابط خطی متداول از قبیل لاپلاس استفاده نمود. بنابراین اگر بین سرعت جریان ( $V$ ) و گرادیان هیدرولیکی ( $i$ ) ارتباط خطی برقرار نباشد رابطه حاکم به صورت نمایی

- 1- Mean Bias
- 2- Root Mean Square
- 3- Root Mean Square

$$a \& b = f(n, C_u, C_c) \quad (12)$$

## نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای  $a$  و  $b$  در رابطه فروش هایمر، که هدف اصلی این مطالعه محاسبه آن هاست، یکسان نمی باشند. بنابراین نمی توان گفت افزایش یا کاهش هر یک از پارامترهای  $D_{10}$ ،  $D_{30}$ ،  $D_{60}$ ،  $C_u$ ،  $C_c$  و  $n$  سبب افزایش یا کاهش و به عکس ضرایب  $a$  و  $b$  می شود. بنابراین می توان گفت که در محاسبه پارامتر گرادیان هیدرولیکی، تنها استفاده از سرعت جریان، منجر به نتایج قابل اطمینانی نخواهد شد و استفاده از مشخصات مکانیکی خاک نیز ضروری به نظر می رسد. ضرایب رابطه فروش هایمر که وابسته به پارامترهای مختلفی است، با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی ژنتیک و ازدحام ذرات، محاسبه می شود. جدول ۳ خلاصه داده های آزمایشگاهی را نشان می دهد. در جدول ۳ برای بدست آوردن ضرایب فروش هایمر با استفاده از نتایج آزمایشات هر نمونه خاک بدین شکل عمل شد که با برآزش رابطه فروش هایمر به داده های بدست آمده از آزمایش، با استفاده از نرم افزار متلب<sup>۱</sup> مقادیر  $a$  و  $b$  بدین ترتیب بدست می آید (رابطه ۱۳) (برای نمونه خاک شماره یک):

$$i = 79.89v^2 + 0.99 \rightarrow \begin{cases} a = 79.89 \\ b = 0.9946 \end{cases} \quad (13)$$

لازم به ذکر است که در برآزش داده ها از منحنی درجه دو و با فرض گذر منحنی از نقطه مبدا مختصات استفاده شد تا منحنی به دست آمده بتواند معادل رابطه دوجمله ای فروش هایمر در نظر گرفته شود. برای سایر نمونه های خاک نیز به همین روش ضرایب فروش هایمر استخراج شد. هر دو روش الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات در واقع تکنیک های بهینه سازی فراکوشی هستند که به عنوان ابزار محاسباتی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. هدف از استفاده ابزارهای بهینه سازی، تعیین بهترین مقدار عددی پارامترهای روابط پیشنهادی برای توصیف ضرایب فروش هایمر بر حسب مشخصات مصالح است. جواب مسئله در مسایل بهینه سازی، جوابی است که بتواند مقدار یک کمیت را کمینه یا بیشینه کند. کمیت مورد نظر را تابع هدف می نامند. در این پژوهش، تابع هدف برابر میزان خطای تجمعی بین مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی با مقادیری است که از روابط پیشنهادی به دست می آید. اگر بتوانیم مقدار این تابع هدف را توسط الگوریتم ژنتیک و روش ازدحام ذرات کمینه کنیم، در واقع به فرمول - هایی دست پیدا کرده ایم که کمترین فاصله و خطا را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی مشاهده شده ارائه می دهند. به دنبال روابطی هستیم که مقدار این خطا برای آن ها مقدار کمی باشد. به منظور ارائه ساختارهای مختلف در این مطالعه، با توجه به غیرخطی بودن رابطه مورد نظر جهت تعیین ضرایب  $a$  و  $b$ ، ساختار مختلفی در ادامه ارائه می شود. به

منظور ارائه این ساختارها با در نظر گرفتن پارامترهای موثر که با استفاده از آنالیز ابعادی بدست آمد، ساختارهای مختلفی به صورت مرتبه اول (ساختار اول) و دوم (ساختار دوم) ارائه می شود. همچنین ساختار دیگری به صورت چند جمله ای ارائه می شود که مرتبه آن نیز بر اساس الگوریتم های ارائه شده در این مطالعه (ژنتیک و ازدحام ذرات) برآورد می شود.

## ساختار اول

به منظور ارائه ساختارهای مختلف در این مطالعه، با توجه به غیرخطی بودن رابطه مورد نظر جهت تعیین ضرایب  $a$  و  $b$ ، ساختار مختلفی ارائه می شود. به منظور ارائه این ساختارها با در نظر گرفتن پارامترهای موثر که با استفاده از آنالیز ابعادی به دست آمد، ساختارهای مختلفی به صورت مرتبه اول (ساختار اول) و دوم (ساختار دوم) ارائه می شود. همچنین ساختار دیگری به صورت چند جمله ای ارائه می شود که مرتبه آن نیز بر اساس الگوریتم های ارائه شده در این مطالعه (ژنتیک و ازدحام ذرات) برآورد می شود.

به عنوان اولین و ساده ترین ساختار (از لحاظ شکل ظاهری)، روابط ۱۴ و ۱۵ برای ضرایب فروش هایمر پیشنهاد می گردد.

$$(14)$$

$$a = X_1 n + X_2 D_{10} + X_3 D_{30} + X_4 D_{60} + X_5 C_u + X_6 C_c$$

$$(15)$$

$a = Y_1 n + Y_2 D_{10} + Y_3 D_{30} + Y_4 D_{60} + Y_5 C_u + Y_6 C_c$   
روابط فوق در واقع ترکیب خطی از پارامترهای مستقل که در این جا  $n$  (تخلخل) و  $D_{10}$ ،  $D_{30}$  و  $D_{60}$  (قطرهایی که ده درصد، سی درصد، و شصت درصد مصالح از آن کوچک ترند)،  $C_u$  ضریب شکل و  $C_c$  ضریب انحنای هستند، می باشند. مجهولاتی که به دنبال به دست آوردن بهترین مقادیر آن ها هستیم، یا همان متغیرهای تصمیم فرآیند بهینه سازی، دوازده پارامتر  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$ ،  $X_4$ ،  $X_5$  تا  $Y_6$  می باشند. در این مرحله از الگوریتم ژنتیک و روش ازدحام ذرات استفاده می شود تا این ضرایب مجهول به دست آیند (رابطه های ۱۶ و ۱۷).

## الگوریتم ژنتیک:

$$a = 79.6 + 2.25C_u \quad (16)$$

$$b = 0.077D_{10} + 0.364C_c \quad (17)$$

$$i = (79.6n + 2.25C_u)V + (0.077D_{10} + 0.364C_c)V^2 \quad (18)$$

الگوریتم ازدحام ذرات در رابطه های ۱۹ و ۲۰ آمده است.

$$a = 79.18n + 2.295C_u \quad (19)$$

$$b = 0.076D_{10} + 0.361C_c \quad (20)$$

$$i = (79.18n + 2.295C_u)V + (0.076D_{10} + 0.361C_c)V^2 \quad (21)$$

با استفاده از روش‌های ارایه شده در این مطالعه (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات) و نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که برآوردهای انجام شده از دقت خوبی برخوردار هستند، به طوری که تقریباً مقادیر برآورد شده و مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی، به جز برای خاک ۴، تقریباً برابر است. همچنین در این شکل ۶ مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم ارایه شده، برآوردهای یکسانی دارند هر چند نتایج الگوریتم ژنتیک با اختلاف بسیار کمی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات، از دقت بهتری برخوردار است.

جدول ۴ مقادیر بهینه شده پارامترهای مجهول معادلات ساختار پیشنهادی اول و جدول ۴ محاسبه مقادیر ضرایب فورس‌هایمر با پارامترهای بهینه شده را نشان می‌دهد. شکل ۵ نتایج برآورد ضریب اول رابطه فورس‌هایمر (a) را برای خاک‌های مختلف در ساختار اول نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که نتایج ارایه شده با استفاده از هر دو الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک تقریباً برای تمامی خاک‌ها یکسان می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که به جز در خاک نوع ۱ و نوع ۷، مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از الگوریتم‌ها، دارای تطابق خوبی با مقادیر ارایه شده آزمایشگاهی هستند. شکل ۶ نتایج حاصل از برآورد ضریب دوم رابطه فورس‌هایمر (b) برای ساختار اول

جدول ۳- خلاصه داده‌های آزمایشگاهی

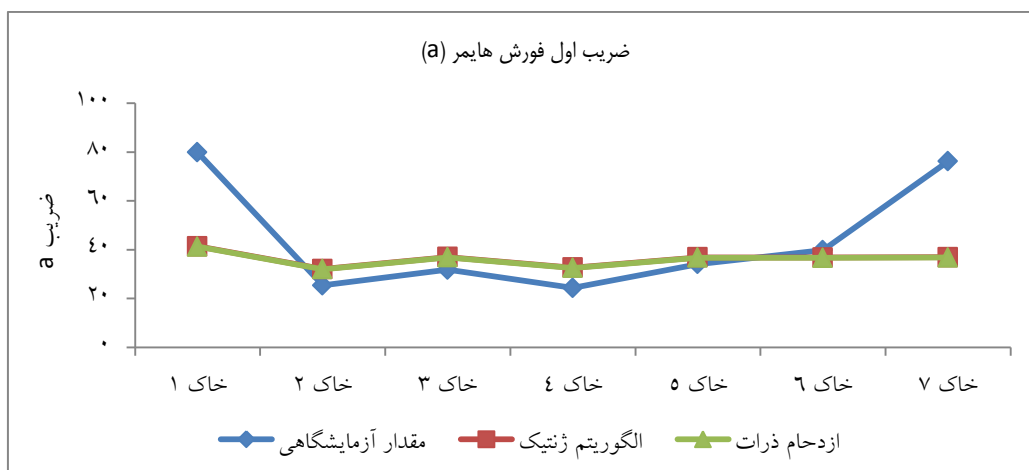
خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳	خاک ۴	خاک ۵	خاک ۶	خاک ۷	
۵/۷	۱۳	۶/۷۰	۸/۰۰	۹/۷۰	۶/۲۹	۷/۹۰	D <sub>10</sub> (mm)
۷/۲	۱۵	۹/۲۰	۱۰/۰۰	۱۱/۰۰	۷/۷۰	۱۱/۵۰	D <sub>30</sub> (mm)
۹/۴	۱۸	۱۵/۰۰	۱۱/۰۰	۱۲/۰۰	۱۱/۰۰	۱۵/۰۰	D <sub>60</sub> (mm)
۱/۶۵	۱/۳۸	۲/۳۴	۱/۳۸	۱/۳۴	۱/۷۷	۱/۹۰	ضریب انحنای (C <sub>u</sub> )
-۰/۹۷	-۰/۹۶	-۰/۸۴	۱/۱۴	۱/۰۴	-۰/۸۷	۱/۱۲	ضریب خمیدگی (C <sub>c</sub> )
-۰/۴۷۳	-۰/۳۶۴	-۰/۴۰۱	-۰/۳۷۱	-۰/۴۲۸	-۰/۴۱۲	-۰/۴۱	پوکی (n)
۷۹/۸۹	۲۵/۳۴	۳۱/۷۸	۲۴/۳۴	۳۴/۰۶	۳۹/۷۹	۷۶/۲۱	ضریب اول فورس‌هایمر (a)
-۰/۹۹۴۶	۱/۳۴۷	-۰/۸۲	۳/۱۵۹	-۰/۸۷۵۸	-۰/۵۰۴	-۰/۸۶۳۱	ضریب دوم فورس‌هایمر (b)

جدول ۴- مقادیر بهینه شده پارامترهای مجهول معادلات ساختار پیشنهادی اول

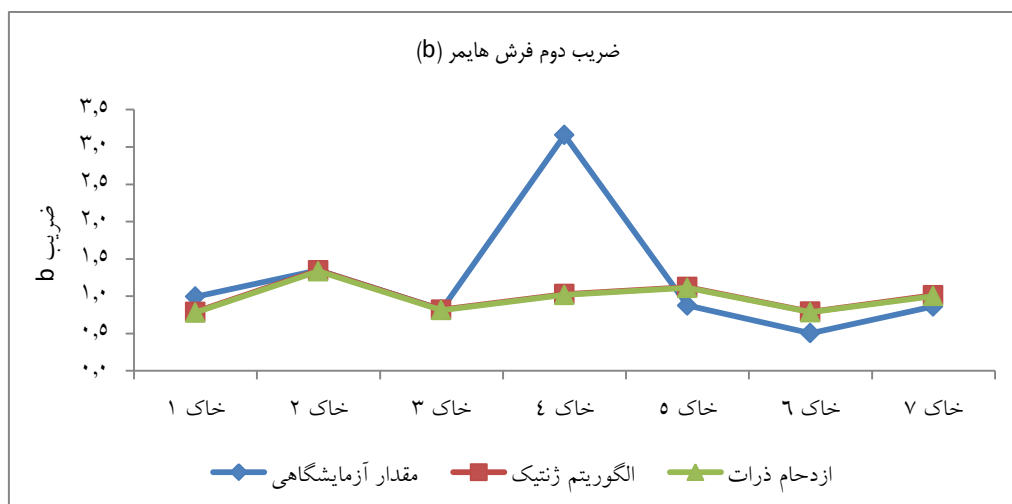
	الگوریتم ژنتیک (GA)		الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)		
	Y	X	Y	X	
ضریب اول	Y1	.	۷۹/۱۱۷	۷۹/۵۷۹	X1
	Y2	-۰/۰۷۶۶۷	.	.	X2
	Y3	.	.	.	X3
	Y4	.	.	.	X4
	Y5	.	۲/۲۹۵	۲/۲۴۹	X5
	Y6	-۰/۳۶۴۳	.	.	X6
مقدار خطا RMSE	۱/۷۹۶	مقدار خطا RMSE	۱۲۱/۰۶۹۴	۱۲۰/۵۰۲۲	

جدول ۵- محاسبه مقادیر ضرایب فورس‌هایمر با پارامترهای بهینه شده

خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳	خاک ۴	خاک ۵	خاک ۶	خاک ۷	
۷۹/۸۹	۲۵/۳۴	۳۱/۷۸	۲۴/۳۴	۳۴/۰۶	۳۹/۷۹	۷۶/۲۱	مقدار آزمایشگاهی ضریب a
۴۱/۳۵	۳۲/۰۸	۳۶/۹۵	۳۲/۶۲	۳۶/۸۴	۳۶/۹۰	۳۶/۹۰	مقدار محاسباتی a (الگوریتم ژنتیک)
۴۱/۲۱	۳۱/۹۸	۳۶/۸۶	۳۲/۵۱	۳۶/۷۰	۳۶/۶۷	۳۶/۸۰	مقدار محاسباتی a (ازدحام ذرات)
-۰/۹۹۴۶	۱/۳۴۷	-۰/۸۲	۳/۱۵۹	-۰/۸۷۵۸	-۰/۵۰۴	-۰/۸۶۳۱	مقدار آزمایشگاهی ضریب b
-۰/۷۸۹۷	۱/۳۴۷۶	-۰/۸۲۰۸	۱/۰۲۷۷	۱/۱۲۲۸	-۰/۷۹۲۳	۱/۰۱۲۶	مقدار محاسباتی b (الگوریتم ژنتیک)
-۰/۷۸۲۳	۱/۳۳۴۸	-۰/۸۱۳۰	۱/۰۱۷۹	۱/۱۱۲۲	-۰/۷۸۴۸	۱/۰۰۳۰	مقدار محاسباتی b (ازدحام ذرات)



شکل ۵- مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار اول برای ضریب اول فروش‌هایمیر



شکل ۶- مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار اول برای ضریب دوم فروش‌هایمیر

الگوریتم ازدحام ذرات (روابط ۲۶-۲۸)

$$a = 186.02n + 0.407C_u \quad (26)$$

$$b = 0.007D_{10} + 0.82C_u + 0.14C_c \quad (27)$$

$$i = (186.02n + 0.407C_u)V + (0.007D_{10} + 0.82C_u + 0.14C_c)V^2 \quad (28)$$

شکل ۷ نتایج حاصل از برآورد ضریب اول رابطه فروش‌هایمیر (a) که به صورت ساختار دوم ارائه شده در مطالعه حاضر، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات محاسبه شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که نتایج برآوردهای انجام شده توسط این دو الگوریتم روندی مشابه با ساختار اول دارد. شکل ۷ نشان می‌دهد که تقریباً برآوردهای انجام شده توسط هر دو الگوریتم یکسان است و برای خاک‌های یک و هفت، از برآوردهای نسبتاً خوبی برخوردار نیست در حالی که برای سایر خاک‌ها تقریباً مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی از تطابق خوبی برخوردار هستند.

## ساختار دوم

به‌عنوان ساختار دوم، حالت توان دو را برای مشخصات ورودی امتحان می‌کنیم. این ساختار دارای شکلی مشابه با ساختار اول هستند با این تفاوت که پارامترهای موثر در برآورد ضرایب a و b به صورت مرتبه دو ارائه شده‌اند. معادلات ساختار دومی به شکل رابطه ۲۱ تا ۲۴ می‌باشد.

$$a = +X_1n^2 + X_2D_{10}^2 + X_3D_{30}^2 + X_4D_{60}^2 + X_5C_u^2 + X_6C_c^2 \quad (21)$$

$$b = Y_1n^2 + Y_2D_{10}^2 + Y_3D_{30}^2 + Y_4D_{60}^2 + Y_5C_u^2 + Y_6C_c^2 \quad (22)$$

$$a = 185.8n + 0.379C_u \quad (23)$$

$$b = 0.0062D_{10} + 0.87C_u + 0.148C_c \quad (24)$$

بنابراین رابطه فروش‌هایمیر به‌صورت رابطه ۲۵ ارائه می‌شود:

$$i = (185.8n + 0.379C_u)V + (0.0062D_{10} + 0.87C_u + 0.148C_c)V^2 \quad (25)$$



(پوکی) و  $C_u$  (ضریب شکل) در معادله تاثیر داشته و سایر پارامترها ضریب صفر گرفته‌اند. بنابراین در ساختار پیشنهادی جدید برای ضریب  $a$ ، تنها از این دو کمیت استفاده می‌شود و در این مرحله ضریب  $b$  و توان آن‌ها مجهول در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این جهت باز گذاشتن دست الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای رسیدن به برآزش بهتر، حاصل ضرب این کمیت‌ها در ساختار جدید گنجانده می‌شود. با همین استدلال ساختار جدید برای ضریب دوم فورس‌هایمر یعنی ضریب  $b$  نیز تعریف می‌گردد (رابطه ۲۹ و ۳۰).

$$a = X_1 n^{X_2} + X_3 C_u^{X_4} + X_5 n C_u \quad (29)$$

$$b = Y_1 D_{10}^{Y_2} + Y_3 C_c^{Y_4} \quad (30)$$

شکل ۸ نتایج حاصل از برآورد ضریب دوم رابطه فورس‌هایمر (a) را برای هفت خاک با دانه‌بندی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل برآوردهای انجام شده با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات ارایه شده است. با توجه به شکل نتایج برآورد این ضریب توسط الگوریتم‌های مورد استفاده تقریباً برای تمامی خاک‌ها یکسان است و نتایج ارایه شده توسط هر دو الگوریتم یکسان می‌باشد.

### ساختار سوم

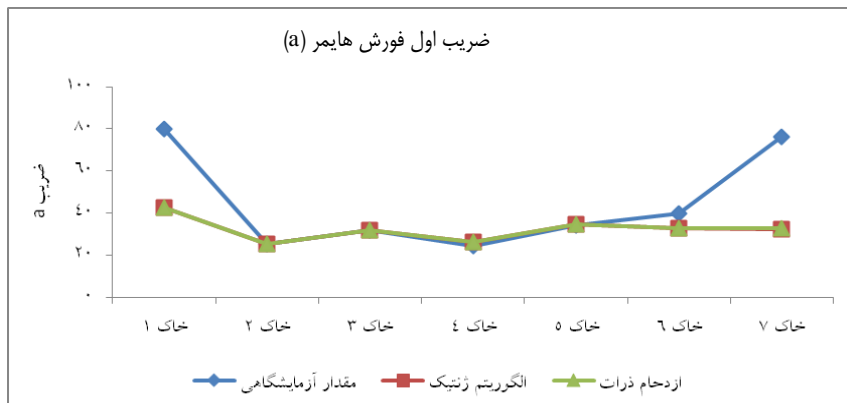
جهت تعریف ساختار سوم به نتایج به دست آمده از سد و ساختار قبلی رجوع می‌کنیم. مشاهده می‌شود که در مورد ضریب اول فورس‌هایمر یعنی ضریب  $a$ ، در هر دو ساختار قبلی تنها پارامترهای  $n$

جدول ۶- مقادیر بهینه شده پارامترهای مجهول معادلات ساختار پیشنهادی دوم

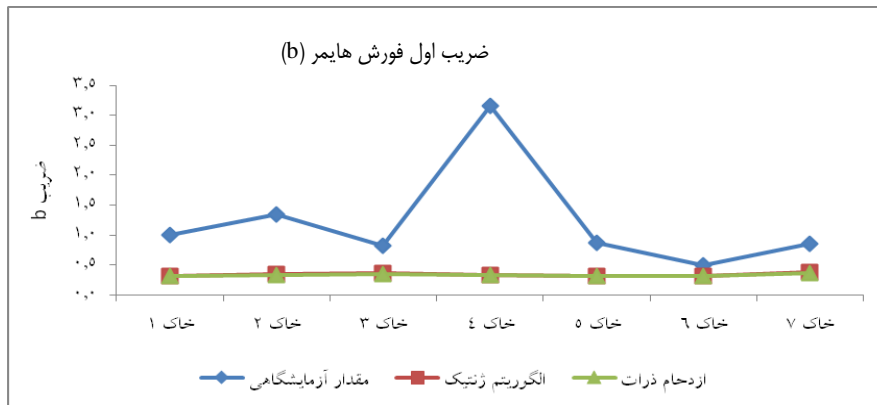
	ازدحام ذرات		الگوریتم ژنتیک	
	(PSO)	(GA)	(PSO)	(GA)
X1	۱۸۶/۰۱۹	۱۸۵/۷۹۹	۰	۰
X2	۰	۰	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۷۰
X3	۰	۰	۰	۰
X4	۰	۰	۰	۰
X5	۰/۴۰۷	۰/۳۷۹	۰/۰۸۷۳۲۲	۰/۰۸۱۶۵۵
X6	۰	۰	۰/۱۴۸۱	۰/۱۴۰۱
مقدار خطا RMSE	۲۶۵۹/۲۶۹	۱۲۶۴/۷۶۵	۳/۸۵۶	۳/۹۰۴

جدول ۷- محاسبه مقادیر ضرایب فورس‌هایمر با پارامترهای بهینه شده

مقدار آزمایشگاهی ضریب a	مقدار محاسباتی a (الگوریتم ژنتیک)	مقدار محاسباتی a (ازدحام ذرات)	مقدار آزمایشگاهی ضریب b	مقدار محاسباتی b (الگوریتم ژنتیک)	مقدار محاسباتی b (ازدحام ذرات)
۷۹/۸۹	۴۲/۶۰	۴۲/۷۲	۰/۹۹۴۶	۰/۳۲۲۵	۰/۳۰۹۹
۲۵/۳۴	۲۵/۳۴	۲۵/۴۳	۱/۳۴۷	۰/۳۴۳۶	۰/۳۳۸۳
۳۱/۷۸	۳۱/۷۸	۳۱/۹۵	۰/۸۲	۰/۳۶۱۶	۰/۳۴۷۵
۲۴/۳۴	۲۶/۲۹	۲۶/۳۷	۳/۱۵۹	۰/۳۳۷۸	۰/۳۲۷۲
۳۴/۰۶	۲۴/۶۲	۲۴/۷۰	۰/۸۷۵۸	۰/۳۲۱۹	۰/۳۱۴۲
۳۹/۷۹	۳۲/۷۳	۳۲/۸۶	۰/۵۰۴	۰/۳۲۲۰	۰/۳۰۹۹
۷۶/۲۱	۳۲/۶۰	۳۲/۷۴	۰/۸۶۳۱	۰/۳۷۹۹	۰/۳۶۶۴



شکل ۷- مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار دوم برای ضریب اول فورس‌هایمر



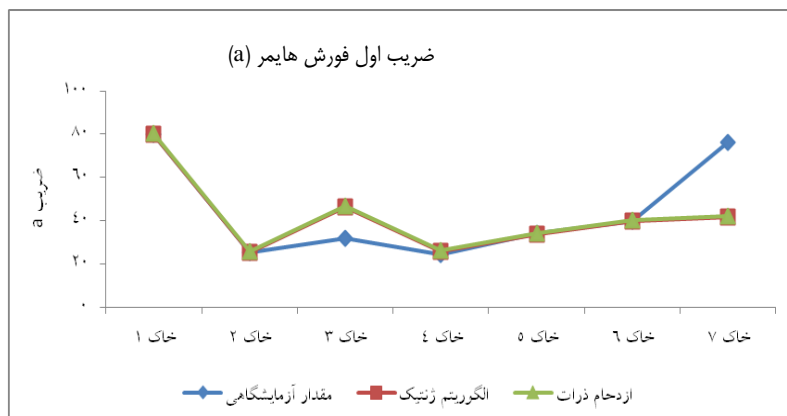
شکل ۸- مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار دوم برای ضریب دوم فروش هایمر

جدول ۸- مقادیر بهینه شده پارامترهای مجهول معادلات ساختار پیشنهادی سوم

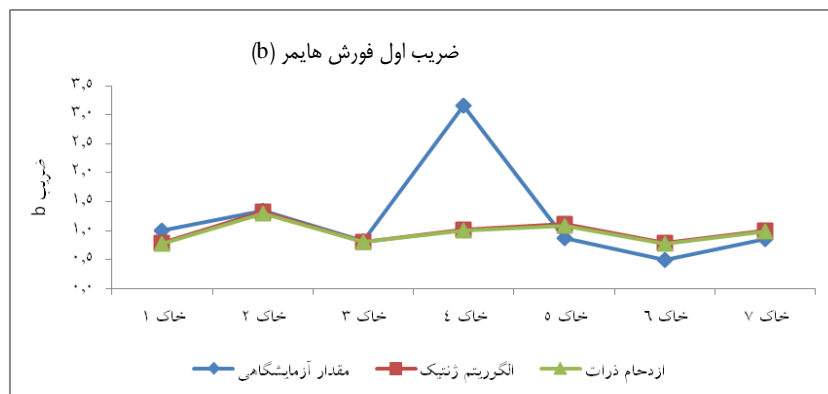
فرم	ازدحام ذرات		الگوریتم ژنتیک	
	(PSO)	(GA)	(PSO)	(GA)
X1	۱۰۲۲۸۵۴۹	۱۰۲۲۰۴۲۰	Y1	۰/۰۷۶۸
X2	۱۶/۵۶۰۱۹	۱۶/۵۶۴۲۴	Y2	۰/۹۹۱۰
X3	۱/۲۵۸۱۰۹	۱/۲۵۸۵۳۸	Y3	۰/۳۶۵۴
X4	۰/۵۰۱۹۹۸۱	۰/۵۰۱۸۲۸	Y4	۱/۰۰۸
X5	۴۶/۸۹۰	۴۶/۴۰۸	Y5	.
	.	.	Y6	.
مقدار خطا	۵۲۳/۱۳۸	۵۲۷/۷۸۴	مقدار خطا	۱/۸۰۶
RMSE			RMSE	۱/۸۳۱

جدول ۹- محاسبه مقادیر ضرایب فروش هایمر با پارامترهای بهینه شده

خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳	خاک ۴	خاک ۵	خاک ۶	خاک ۷	
۷۹/۸۹	۲۵/۳۴	۳۱/۷۸	۲۴/۳۴	۳۴/۰۶	۳۹/۷۹	۷۶/۲۱	مقدار آزمایشگاهی ضریب a
۷۹/۸۷	۲۵/۴۲	۴۶/۲۸	۲۵/۹۰	۳۴/۰۰	۳۹/۸۷	۴۱/۸۰	مقدار محاسباتی a (الگوریتم ژنتیک)
۸۰/۴۱	۲۵/۶۷	۴۶/۷۲	۲۶/۱۵	۳۴/۲۹	۴۰/۲۴	۴۲/۲۰	مقدار محاسباتی a (ازدحام ذرات)
۰/۹۹۴۶	۱/۳۴۷	۰/۸۲	۳/۱۵۹	۰/۸۷۵۸	۰/۵۰۴	۰/۸۶۳۱	مقدار آزمایشگاهی ضریب b
۰/۷۸۴۸	۰/۳۲۷۰	۰/۸۱۳۲	۱/۰۱۸۸	۱/۱۰۹۹	۰/۷۸۵۸	۱/۰۰۳۸	مقدار محاسباتی b (الگوریتم ژنتیک)
۰/۷۷۲۷	۱/۳۰۴۴	۰/۸۰۱۸	۱/۰۰۱۰	۱/۰۹۱۲	۰/۷۷۴۷	۰/۹۸۶۵	مقدار محاسباتی b (ازدحام ذرات)



شکل ۹- مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار سوم برای ضریب اول فروش هایمر



شکل ۱۰ - مقایسه نتایج فرمول‌های ساختار سوم برای ضریب دوم فروش‌هایمر

فروش‌هایمر بر حسب خصوصیات مکانیکی مصالح می‌باشند. روابط انتخابی به شکل رابطه ۳۱ و ۳۲ است.

$$a = 10220420n^{16.56} + 1.259C_u^{0.501} + 46.408nC_u \quad (31)$$

$$b = 0.0767D_{10} + 0.3643C_c \quad (32)$$

نتایج بدست آمده از برآورد ضرایب رابطه فروش‌هایمر نشان‌دهنده این است که هر دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات از دقت نسبتاً یکسانی برخوردار هستند همچنین نتایج ارائه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک از دقت بیشتری در پیش‌بینی ضرایب فروش‌هایمر برخوردار است. در ساختار سوم، پارامترهای توانی ضریب b مربوط به رابطه فروش‌هایمر به سمت عدد یک میل کرده‌اند. در واقع مشخص می‌شود که رفتار این ضریب نسبت به پارامترها به صورت خطی نزدیک بوده و به همین خاطر در فرم نهایی، از ساختار اول که فرم خطی داشت استفاده شد. بررسی منحنی‌های به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک و روش ازدحام ذرات در تمام سه ساختار، مبین این است که هر دو روش نتایجی بسیار نزدیک به یکدیگر دارند. باید توجه داشت که استراتژی حل این دو الگوریتم کاملاً با یکدیگر متفاوت است. این که یک مسئله با دو روش متفاوت حل شده و هر دو روش به پاسخ-های بسیار نزدیک به یکدیگر رسیده‌اند می‌تواند دلیل بر صحت روش حل مسئله باشد.

## منابع

- بیرج، تاران، ت و نورآبادی، س. ۱۳۹۳. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده: تئوری و کاربردهای انتقال در محیط-های متخلخل، انتشارات دیباگران. تهران.
- شایان‌نژاد، م. ۱۳۷۸. بررسی و مدل‌سازی جریان در سدها و کاربرد آن در کنترل سیل. پایان نامه دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه خواجه نصیر طوسی. ۳۷۸ص.
- خیاط‌خلقی، م، مال‌میر، م، ناصری، ح، ر و هورفر، ع. ح. ۱۳۹۴. تاثیر

شکل ۱۰ نتایج حاصل از برآورد ضریب دوم رابطه فروش‌هایمر با استفاده از ساختار سوم ارائه شده در این مطالعه و الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک و ازدحام ذرات را با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده، مقایسه می‌کند. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که جز برای خاک ۴، تقریباً برای سایر خاک، نتایج برآورد شده با استفاده از هر دو الگوریتم تقریباً با مقادیر مشاهده شده یکسان هستند. در این ساختار نیز مانند ساختار اول و دوم، مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند. تفاوت بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر به‌دست آمده از روابط پیشنهادی ناشی از این واقعیت است که روابط پیشنهادی نتوانسته‌اند بهتر از حد خاصی اقدام به پیش‌بینی مقادیر آزمایشگاهی نمایند. در این مطالعه سه مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ممکن است مدل دیگری هم وجود داشته باشد که قادر باشد نتایج را به نحو بهتری پیش‌بینی کند. اما مدل‌های پیشنهادی تحقیق حاضر با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات تا حد ممکن بهینه شده و به جواب‌های آزمایشگاهی نزدیک شده‌اند. طبیعتاً هر مسئله بهینه‌سازی یک جواب بهینه بیش‌تر ندارد و نمی‌توان از آن جواب فراتر رفت. در این مورد هم کم‌ترین فاصله از جواب‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده و مدل نتوانسته جواب بهتری پیدا کند.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام آزمایشاتی روی جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه برای هفت خاک مختلف، مقادیر آزمایشگاهی سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی اندازه‌گیری شد سپس روابط مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک به‌منظور اصلاح ضرایب رابطه فروش‌هایمر ارائه شد. بهترین روابط ارائه شده برای ضرایب فروش‌هایمر را می‌توان بدین شکل انتخاب کرد که ضریب اول رابطه فروش‌هایمر (a) با استفاده از ساختار سوم و ضریب دوم این رابطه (b) با استفاده از ساختار اول دارای دقت بیش‌تری می‌باشد. این روابط قادر به پیش‌بینی مقادیر ضرایب اول و دوم رابطه

- fill Dam. Ph.D. Thesis. Ottawa University, Department of Civil Engineering, p 102.
- Herrera,N.M and Felton,G.K. 1991. Hydraulic of Flow Throuth a Rockfill Dam Using Sediment-free water. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE Library. 34.3: 871-875.
- Khalifa,M., Wahyudi,I and Thomas,P.A. 2000. New Device for Measuring Permeability Under High Gradients and Sinusoidal Gradients. Geotechnical Testing Journal. 23.4: 404-412.
- Mc Corquodale,JA., Hannoura, A and Nasser,M.S .1978. Hydraulic Conductivity of Rock fill. Journal of Hydraulic Research. Delft. The Netherlands. 16.2: 123-137.
- Martins,R. 1990. Turbulent seepage flow through rock fill structures. Water Power and Dam Construction. 90:41-45.
- Martins,AA., Laranjeira,P.E., Lopes,J.C.B and Dias,M.M. 2007. Network modeling flow in a packed bed. American Institute of Chemical Engineers Journal.53.1: 91-107
- Rocha.R.P.A and Cruz,M.E. 2010. Calculation of the permeability and apparent permeability of three-dimensional porous media. Transport in Porous Media .83:349-373.
- Stephenson, D.J. 1979. Rock fill in Hydraulic Engineering. Elsevier scientific, Amsterdam, Netherlands. Volume 27,1st Edition. 228 pages.
- Wilkins,J.K. 1956. Flow of water through rock fill and its application to the design of dams. Proceedings of the 2nd Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 144-149.
- Ward JC (1964) Turbulent flow in porous media. J. Hydra. Div. ASCE 95(6):1-11.
- Xiexing,M., Shunca,L., Zhanqing,C and Weiqun,L. 2011. Experimental Study of Seepage Properties of Broken Sandstone Under Different Porosities. Transport in Porous Media .86:805-814.
- نفوذپذیری و پخشیدگی مولکولی بر الگوی جریان همرفتی در محیط‌های متخلخل درز و شکافدار. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۲۰۴۶: ۳۶۳-۳۷۲
- صدقی اصل، م.، رحیمی، ح، فرهودی، ح و محمد ولی سامانی، ح. ۱۳۸۹. تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰۷: ۸۱-۹۴.
- جلال‌الدین، ک.، ۱۳۷۵. بررسی هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد. رشته سازه های آبی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. ۲۷۵ ص.
- قاضی مرادی، ا.، ۱۳۸۴. تعیین سرعت جریان آب در سازه های متخلخل سنگدانه ای و پاره سنگی برای کنترل سیل و آبخیزداری، مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۶۹، صفحه ۳۵.
- قاضی مرادی، ا.، معصومی، س.م.، ۱۳۷۳. بررسی جریان در محیط های متخلخل دزشت دانه. اولین همایش ملی هیدرولیک ایران، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران.
- ملک نژاد یزدی، م.، دهقانی، ا.، داودی، م.ه.، مفتاح هلقی، م و ناظمی، ا.ی. ۱۳۸۹. بکارگیری سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی در تحلیل هیدرولیکی جریان در محیط متخلخل پاره-سنگی. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- Balhoff,M., Mikelic,A and Wheeler,M.F. 2010. Polynomial Filtration Laws for Low Reynolds Number Flows Through Porous Media. Transport in Porous Media .81:35-60.
- Bingjum,L and Garga,K.L. 1998. Theoretical Solution for Seepage Flow in over Topped Rock fill. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE Library. 37.2: 213-217.
- Ergun,S. 1952. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress. 48.2: 89-94.
- Hansen,D. 1992. The Behaviour of Flow Through Rock

## Experimental and Numerical Investigation Flow in Porous Media by Coarse-Grained

E.Nohani<sup>1\*</sup>, E. Alimakan<sup>2</sup>

Received: Jul.08, 2017

Accepted: Agus.16, 2017

### Abstract

Considering that increasing speed in the pores of a porous milieu, turbulent flow increases, Darcy equation and equations that using the laminar flow assumptions, has no confidence coefficient. Therefore need to equations that consider turbulent flow, estimate hydraulic gradient according to the flow velocity and mechanical properties of the soil. Such methods that have great plausibility cab be noted the binomial Forchheimer equation. In this study conducted experiments on flow in porous zone for soil with seven different gradations, laboratory values were measured and by using different methods calculated coefficients Forchheimer. The method used in this experiment consisted of the algorithm genetic and particles swarm algorithm. In order to calculate the equation coefficients Forchheimer, at the first by using the dimensional analysis factors in estimating the coefficients determined and then by using the dimensionless parameters, estimated coefficients of the screw. The obtained results indicate the superiority of the proposed genetic algorithm compared with particles swarm algorithm.

**Keywords:** Forchheimer equation, Genetic algorithms, Particle swarm algorithms

---

1- Assistant Pofessor ,Department of Hydraulic Structures, Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

2- Graduate Student, Civil Engineering Department, Hydraulic Structures, Islamic Azad University, Dezful Branch, Iran.

(\* -Corresponding Author Email: Nohani\_e@yahoo.com)