

## بررسی ضرایب انتشار طولی آلودگی‌های غیرواکنشی در محیط‌های سنگدانه‌ای

جعفر چابک‌پور<sup>1\*</sup>، عمر مینائی<sup>2</sup>، رسول دانشفراز<sup>3</sup>

1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه

2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی - گروه مهندسی عمران دانشگاه مراغه، مراغه

3- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه

\*j.Chabokpour@maragheh.ac.ir

**چکیده -** در بسیاری از جریان‌های عبوری از بدنه سدهای سنگریزه‌ای و یا زه‌کش‌های طولی سنگی شامل جریان درون‌گذر دارای سطح آزاد، مدل‌سازی فرایندهای جابجایی و انتشار آلایندها از مهمترین مباحث می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از محلول کلرید سدیم و حسگرهای هدایت الکتریکی که درون محیط سنگدانه‌ای کار گذاشته شده بود، اقدام به برداشت منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی شد و با استفاده از حل تحلیلی معادله جابجایی-انتشار غیرماندگار و روش بهینه‌سازی برازش منحنی با روش کمترین مربعات اقدام به استخراج سری‌های زمانی آلودگی در موقعیت‌های کارگذاری حسگرهای هدایت‌سنج الکتریکی گردید. مجموعه دستگاه برداشت داده‌ها، شامل حسگرهای هدایت الکتریکی، دستگاه جمع‌آوری داده و نرم‌افزار تهیه شده برای آن بود. در این آزمایش‌ها از دو قطر سنگدانه با اندازه‌های متوسط 1/1 و 1/8 سانتی‌متر، دو دبی و پنج جرم تزریقی آلودگی استفاده گردید و در نهایت مشاهده شد که بر خلاف توزیع نرمال که حالت خاص و متقارنی از حل معادله مزبور است، منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی برداشت شده به صورت نامتقارن در بازوهای بالا و پائین‌رونده بوده و بازوی پائین‌رونده بسیار طولانی‌تری را دارد که این به دلیل ذخیره موقت آلودگی درون محیط سنگدانه‌ای و انتقال تدریجی آن به بیرون از محیط می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که حل تحلیلی معادله جابجایی و انتشار قادر به پیش‌بینی ساختار کلی منحنی‌های رخنه خروجی می‌باشد، ولی در بسیاری از موارد مشاهده گردید که نقطه اوج منحنی تئوریک پائین‌تر از منحنی آزمایشگاهی است. مقادیر متوسط پارامترهای آماری  $RMSE$ ،  $CRM$ ،  $ME$  و  $MAE$  برای منحنی‌های برداشت شده نیز به ترتیب برابر با 1/35، 0/000608، 640 (ppm) و 52/9 (ppm) می‌باشد که تطابق مناسب داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده با حل تحلیلی را نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** محیط سنگریزه‌ای، ضریب انتشار طولی، آلودگی غیر واکنشی، معادله جابجایی-انتشار.

### 1- مقدمه

سدهای سنگریزه‌ای یکی از انواع سدهای تأخیری هستند که با دپو کردن مصالح سنگی احداث می‌شوند و دارای بدنه نفوذپذیر هستند. این سدها آب را در زمان سیلاب به صورت موقت ذخیره نموده و با دبی اوج پائین‌تری به پائین‌دست منتقل می‌نمایند تا مناطق مسکونی، کشاورزی

و یا صنعتی پائین‌دست را از خطر سیلاب مصون بدارند، بدین ترتیب احتمال خطرات ناشی از سیل در پایین دست کاهش می‌یابد. آلودگی آب‌ها (آب‌های سطحی، زیرزمینی و ...) از مباحث بسیار مهم امروزی زندگی بشر است، چرا که آلودگی این آب‌ها تأثیر مستقیمی بر زندگی بشر دارد. ورود سموم کشاورزی، پساب‌های کارخانه‌ای، فاضلاب

نتایج تحقیقات (Maraqa (2001 نشان داد که ضریب تأخیر<sup>4</sup> در انتقال جرم از درون محیط متخلخل وابسته به سرعت منفذی جریان، غلظت اولیه تزریقی آلودگی و همچنین نحوه تزریق آلودگی می‌باشد، ولی طول محیط متخلخل تأثیری در آن ندارد.

ریاحی مدوار و ایوب‌زاده (1387) ضریب انتشار آلودگی را به روش سیستم استنتاج فازی - عصبی انطباقی تخمین زدند. ایشان در این تحقیق با استفاده از قابلیت سیستم‌های استنتاج فازی - عصبی انطباقی اقدام به ارائه‌ی روش جدیدی در تخمین ضریب پراکندگی طولی نمودند. نتایج نشان دادند استفاده از روش فازی - عصبی توسعه داده شده با نتایج موجود و داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی واقعی از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

نتایج تحقیقات (Gao et al. (2010 و Huang et al. (1995 نشان می‌دهد که مقادیر غلظت‌های آلودگی در فرایند انتقال آن از درون محیط متخلخل به طور وسیعی وابسته به ضرایب انتشار و ضریب انتقال جرم از درون محیط می‌باشد.

ولی‌پور و صادقی (1391) به بررسی عددی پخش آلودگی در محیط متخلخل بدون در نظر گرفتن جذب<sup>5</sup> ماده آلاینده پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان داد که کاهش ضرایب انتشار از مقدار معینی به بعد تأثیر زیادی بر پخش آلاینده‌ها ندارد.

Geng et al. (2014) تأثیر امواج دریا روی جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح در سواحل شنی را با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های آنها نشان داد که نیروی امواجی که به ساحل می‌رسند، باعث سرعت بخشیدن به حرکت املاح در داخل آب زیرزمینی موجود در نزدیک ساحل می‌گردند.

Sharma et al. (2014) اقدام به بررسی انتشار آلودگی در محیط متخلخل (با در نظر گرفتن اثر واکنش<sup>6</sup>) با حل هم‌زمان دو معادله انتقال (یکی برای بدنه اصلی جریان و دیگری برای محیط متخلخل) با استفاده از روش عددی حجم محدود نمودند و نتیجه‌گیری نمودند که مقادیر

شهری، وجود معادن نمک و ... از جمله مواردی هستند که بر آلودگی آب‌ها تأثیر می‌گذارند. انتقال آلودگی مکانیزم‌های مختلفی دارد. در محل تخلیه، انتقال آلودگی به دو عامل مومنتم اولیه جریان آلودگی و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بستگی دارد. به طور کلی، پارامترهایی که فرایند انتقال آلودگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از جابجایی<sup>1</sup> (حرکت ابر آلودگی توسط سرعت متوسط جریان) و انتشار. عمل انتشار نیز خود شامل دو فرایند پخشیدگی مولکولی<sup>2</sup> و پخشیدگی اغتشاشی<sup>3</sup> بواسطه وجود گرادیان سرعت (در نتیجه تبادل مومنتم) می‌باشد. پخشیدگی مولکولی ناشی از وجود گرادیان غلظت مابین نقاط مختلف سیال بوده و حتی در آب ساکن نیز اهمیت پیدا می‌کند. ولی در جریان‌های آشفته (مانند جریان در رودخانه‌ها و مجاری روباز، جریان غیرداری عبوری از محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، جریان در مجاری تحت فشار و ...) پخشیدگی اغتشاشی ناشی از گرادیان سرعت اهمیت بیشتری یافته و می‌توان از پخشیدگی مولکولی صرف‌نظر کرد. به دلیل زبری‌های اعمال شده از سوی سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل در لوله‌های منفذی جریان درون محیط متخلخل، سرعت‌های متفاوتی تشکیل شده و همین باعث تشکیل گرادیان سرعت شده و وجود گرادیان سرعت نیز باعث افزایش تبادل مومنتم بین لایه‌های مختلف سیال و یا قسمت‌های مختلف محیط شده و در نتیجه پخشیدگی اغتشاشی افزایش می‌یابد. محققان زیادی در این باره تحقیق کرده‌اند که در زیر به چند نمونه از پژوهش‌های آنها پرداخته می‌شود.

رخشنده‌رو و بشارت‌نیا (1380) چهار نمونه خاک با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت را به منظور بررسی تأثیر دانه‌بندی بر ضریب هدایت هیدرولیکی و ضرایب انتشار آلودگی مورد آزمایش قرار دادند. آنها برای ایجاد آلودگی از محلول کلرید پتاسیم (KCl) با غلظت اولیه 10 میلی‌زیمنس استفاده کردند. تهیه نمودارهایی برای برآورد اولیه پارامترهای موثر در پخش آلودگی از نتایج کار آنها بود.

<sup>4</sup> Retardation coefficient

<sup>5</sup> Non-Reactive

<sup>6</sup> Reactive

<sup>1</sup> Advection

<sup>2</sup> Diffusion

<sup>3</sup> Dispersion

چولگی در سمت راست خود بوده و اشاره نمودند که روش گشتاورگیری زمانی نسبت به سایر روش‌ها نتیجه بهتری برای تخمین ضریب انتشار طولی را ارائه می‌دهد. در نهایت یک رابطه ابعادی با خطای نسبی 30% برای تخمین ضریب انتشار استخراج نمودند.

Swami et al. (2016) با استفاده از روش حل عددی و کار آزمایشگاهی به بررسی انتقال آلاینده (بدون در نظر گرفتن جذب) در محیط متخلخل پرداختند. بدین منظور آنها یک لایه از مصالح درشت دانه را به عرض و ارتفاع به ترتیب 4 و 30 سانتی‌متر در فلوم آزمایشگاهی قرار داده و سپس دو طرف آن را با مصالح ریزدانه با عرض 48 سانتی‌متر پر نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ضریب انتشار آلودگی با فاصله گرفتن از محل آلودگی و سرعت رابطه داشته و با افزایش فاصله از محل تزریق آلودگی، مقدار آن کاهش می‌یابد.

با دقت در تحقیقات پیشین انجام شده در فرایند جابجایی و انتشار آلاینده‌ها مشاهده می‌گردد که بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه یا در جریان‌های دارای سطح آزاد (رودخانه‌ها) انجام شده و یا در محیط‌های سنگدانه‌ای که به صورت استوانه‌های تحت فشار هستند، می‌باشد و محیط‌های سنگدانه‌ای که دارای جریان غیرداری (عدم ارتباط خطی مابین سرعت منفذی و گرادیان هیدرولیکی) و همچنین دارای سطح آزاد هستند، بسیار کمتر مورد آزمون قرار گرفته‌اند، لذا انجام تحقیقات بیشتری در این زمینه از فرایندهای جابجایی و انتشار آلاینده‌ها احساس می‌گردد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول 180 سانتی‌متر، عرض 20 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر (شکل 1-پ) انجام گرفت. در انجام این آزمایش از دو نوع سنگدانه با اقطار متوسط 1/1 و 1/8 سانتی‌متر و ضرایب یکنواختی به ترتیب برابر با 1/4 و 1/53 استفاده شد. برای اندازه‌گیری تخلخل نمونه‌های سنگدانه‌ای به کار رفته در

بالای ضریب جذب، ضریب انتقال جرم، ضریب تأخیر و ضریب انتشار در منافذ محیط سنگی دارای شکستگی منجر به کاهش میزان غلظت آلودگی خواهد شد.

پارسانی و حقی‌آبی (1394) برای تخمین ضرایب پخشیدگی در دو رودخانه سورن و ناریو با استفاده از روش روندیابی غلظت، ضرایب انتشار آلودگی در جریان‌های سطحی را استخراج و آن را با روابط تجربی موجود برای تخمین آن مقایسه کردند. نتایج کار آنها نشان داد که هیچ کدام از روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه ضرایب انتشار دقت مناسبی نداشته و در بهترین حالت مقدار ضریب تعیین برابر 0/4 ( $R^2 = 0.4$ ) است.

احمدی (1395) به منظور کنترل انتقال آلاینده‌ها از منابع آلاینده سطحی به لایه‌های زیرین و آب زیرزمینی مطالعه آزمایشگاهی انجام داد. ایشان با قرار دادن یک لایه خاک ماسه‌ای تمیز بین دو لایه خاک رسی، حرکت آلاینده به منبع آب تعبیه شده در زیر لایه‌های آلاینده را مورد بررسی قرار داد. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که چاهک تزریق آب و حصار هیدرولیکی (لایه ماسه‌ای بین دو لایه رسی) می‌تواند ورود آلاینده را از منابع سطحی به لایه‌های زیرین و آب زیرزمینی به میزان حداقل 90 درصد کاهش دهد. همچنین، نتایج تحقیق ایشان نشان داد که بهترین عملکرد چاهک در ایجاد حصار هیدرولیکی زمانی است که ارتفاع آب در چاهک با ارتفاع منبع آلاینده یکسان باشد و شکاف‌های تزریق آب از چاهک به لایه ماسه‌ای، در وسط لایه تعبیه شود.

چابک‌پور و همکاران (1395) با انجام آزمایش‌های زیادی اقدام به بررسی آزمایشگاهی ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه نمودند. این محققان با اشاره به این موضوع که بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی ایجاد شده با مصالح سنگریزه‌ای، علی‌الخصوص سدهای تأخیری سنگریزه‌ای مجبور به انتقال مقدار زیادی از مصالح رسوبی شسته شده از حوضه‌های آبریز هستند، پارامترهای تأثیرگذار در جابجایی و انتشار مصالح رسوبی از این محیط‌ها را مورد بررسی دادند. ایشان گزارش نمودند که منحنی‌های رخنه<sup>1</sup> خروجی از محیط سنگدانه‌ای دارای

<sup>1</sup> Break Through Curve

داخل آب شهری هدایت هیدرولیکی پایه آب شهری اندازه‌گیری نموده و غلظت مربوطه، به عنوان غلظت پایه<sup>1</sup> بعداً از آن کم گردیده است. برای سنسورهای مورد استفاده نیز، رابطه کالیبراسیون مرتبط کننده هدایت الکتریکی به غلظت استخراج گردیده است.

دمای آب در زمان انجام آزمایش‌ها در محدوده (17-19) درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. در حالت کلی آلاینده‌ها به دو گروه کلی واکنشی<sup>2</sup> و غیرواکنشی<sup>3</sup> تقسیم‌بندی می‌گردند. کلرید سدیم معمولاً جزو آلاینده‌های غیرواکنشی تقسیم‌بندی می‌گردد و برای اینکه جذب آن توسط سنگدانه‌ها به حداقل میزان خود برسد، سنگدانه‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها به طور کامل شستشو شده و تمامی زوائد آلی و یا خاک‌های چسبیده به آن‌ها شسته شده است. البته برای اینکه غیرواکنشی بودن کلرید سدیم با سنگدانه‌های محیط متخلخل به اثبات برسد، آزمایش شاهدهی نیز ترتیب داده شد. به این صورت که در آب ساکن حاوی سنگدانه‌ها محلول کلرید سدیم تزریق شد و در طول یک ساعت تغییرات غلظت محلول ثبت گردید و در نهایت تغییرات خاصی در غلظت محلول مشاهده نگردیده است.

در شکل 1 نمای کلی فلوم و ابزار اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و محیط متخلخل مورد استفاده نشان داده شده و در شکل 2 نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی ارائه شده است.

### 3- مبانی تئوری و روابط مورد استفاده در تحقیق

اندازه‌گیری میزان انتشار درون محیط‌های متخلخل، از دیدگاه کمی و معادلات حاکم، متفاوت از انتقال جرم درون رودخانه‌ها نیست. در صورتی که دو عمل جابجایی به وسیله سرعت متوسط جریان و انتشار (شامل انتشار مولکولی و انتشار حاصل از وجود گرادیان سرعت و همچنین انتشار حاصل از اعوجاج مسیرهای جریان درون محیط متخلخل) با مسائل هیدرودینامیکی خود جریان ترکیب گردد، پیچیدگی حاصل بیشتر می‌گردد.

انجام آزمایش‌ها، یک بشر دو لیتری از مصالح سنگریز اشباع پر شده و منافذ نمونه سنگدانه‌ای با آب پر شده و حجم آن اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه (1) اقدام به محاسبه تخلخل سنگدانه‌ها گردید.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

که در رابطه (1)،  $n$  تخلخل سنگدانه‌ها،  $V_v$  حجم منافذ و  $V_t$  حجم کل می‌باشد.

مقادیر تخلخل برای سنگدانه‌های با قطر متوسط 1/1 سانتی‌متر برابر با 42 درصد و برای سنگدانه‌های با قطر متوسط 1/8 سانتی‌متر 44 درصد تعیین شد. شایان ذکر است با توجه به اینکه حجم منافذ ایجاد شده مابین سنگدانه‌ها متأثر از فرایندهای اتفاقاتی در زمان ریزش سنگدانه‌ها است، آزمایش‌های تعیین تخلخل سنگدانه‌ها برای هر قطر سنگدانه 5 بار تکرار و میانگین آن به عنوان تخلخل در نظر گرفته شد. فلوم به کار گرفته شده در انجام آزمایش‌ها دارای کف افقی بوده و با تغییر دبی ورودی اقدام به اعمال گرادیان‌های هیدرولیکی متفاوتی بر روی محیط متخلخل گردید. دو دبی 0/26 و 0/37 لیتر بر ثانیه و پنج جرم کلرید سدیم به میزان 5، 10، 15، 25 و 50 گرم به صورت محلول در یک لیتر آب به بالادست محیط متخلخل به صورت آبی تزریق می‌گردید. حسگر-های اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (شکل 1-الف) در فواصل 0/36 و 1/1 متری از ابتدای محیط متخلخل قرار گرفته بود و از طریق نرم‌افزار مربوطه هم‌زمان به یک دستگاه کامپیوتر (شکل 1-ب) متصل گردیده بود. هم‌زمان با تزریق محلول کلرید سدیم به ابتدای فلوم اقدام به شروع برداشت داده‌های هدایت الکتریکی می‌شد. حسگرهای نصب شده نیز قبلاً کالیبره شده و داده‌های برداشت‌شده با رابطه کالیبراسیون تبدیل به غلظت بر حسب  $\left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)$  شده است. در طول آزمایش‌ها همواره حالت کاملاً درون‌گذر جریان حفظ گردید و برای حفظ حالت آن، دبی تا مقداری افزایش یافت تا ارتفاع آب در بالادست محیط متخلخل از ارتفاع محیط متخلخل بیشتر نگردد. در انجام آزمایش‌های مورد نظر در این تحقیق از آب شهری استفاده شده و برای اینکه بتوان تمامی هدایت الکتریکی را به غلظت کلرید سدیم نسبت داد، قبل از تزریق جرم به

<sup>1</sup> Background Concentration

<sup>2</sup> Reactive

<sup>3</sup> None Reactive



(ب)

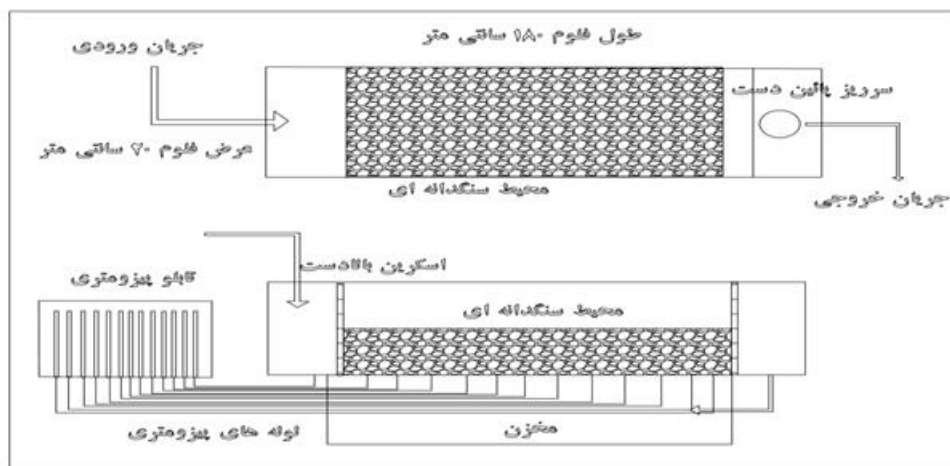


(الف)



(پ)

شکل 1 الف و ب- دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی و پ- فلوم آزمایشگاهی



شکل 2 نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی

در صورتی که با استفاده از روش‌های ریاضی و داده‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی برداشت شده، اقدام به اعمال معادلات دیفرانسیلی حاکم نموده و ضرایب انتشار محاسبه شوند، پارامتری استخراج می‌شود که تمامی پدیده‌های

مهمترین مسأله هیدرودینامیکی جریان عدم پایداری مؤلفه‌های سرعت و نوسان آن‌ها حول یک میزان متوسط است، ولی همه موارد مذکور در ضریب انتشار مستتر هستند و تأثیر کلی خود را در آن می‌گذارند. به بیان دیگر

مذکور به صورت رابطه شماره (6) خواهد بود (چابک‌پور و همکاران 1395).

$$c(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4Dt}} e^{-(x-vt)^2/4Dt} \quad (6)$$

که در آن  $A$  مساحت مقطع عبوری جریان،  $M$  جرم آلودگی تزریق شده،  $x$  موقعیت استخراج منحنی رخنه<sup>1</sup> خروجی،  $D$  ضریب انتشار طولی،  $v$  سرعت متوسط جریان و  $t$  زمان است. رابطه (6) به عنوان رابطه گوسین معروف بوده و در صورتی که جرم توزیعی زیر نمودار برابر با یک باشد، منحنی نرمال نامیده می‌شود. با توجه به نوع تزریق کلرید سدیم به جریان درون‌گذر عبوری از محیط سنگدانه‌ای مورد آزمایش در این تحقیق، رابطه (6) اساس توزیع آلودگی در قسمت‌های مختلف محیط قرار گرفت و با اعمال بردارهای زمانی به آن ضرایب انتشار استخراج گردید.

#### 4- تجزیه و تحلیل نتایج

در ابتدا برای اینکه صحت وجود جریان متلاطم غیرداری درون محیط متخلخل اثبات شود، مابین پارامترهای  $Re$  (عدد رینولدز تشکیل شده در مقاطع مختلف محیط متخلخل) و  $\left(\frac{h}{d_{50}}\right)$  (نسبت عمق جریان به قطر متوسط محیط متخلخل) دیاگرامی مطابق با شکل 3 تهیه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، حداقل عدد رینولدز موجود درون محیط برابر با 1000 است و با نزدیک شدن به قسمت خروجی جریان از محدوده سنگدانه‌ای، سرعت و به تبع آن عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

با استفاده از رابطه (6) و داده‌های هدایت الکتریکی برداشت شده در گام‌های زمانی 4 ثانیه‌ای، اقدام به بازتولید منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی بر اساس معادله کالیبراسیون حسگرها گردید و منحنی‌های رخنه بر اساس غلظت در واحد میلی‌گرم بر لیتر یا (ppm) استخراج شد. برای اعمال حل تحلیلی بر روی داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده، می‌بایستی پارامترهای آزمایشگاهی نظیر  $x$ ،  $M$ ،  $t$  و  $D$  مشخص گردد. پارامتر فاصله طولی ( $x$ ) موقعیت سنسورهای نصب شده در محیط سنگدانه‌ای در نظر گرفته شد.

مؤثر بر انتشار را درون خود دارد. در صورتی که دو فرایند جابجایی و انتشار به صورت هم‌زمان در جریان وجود داشته باشند، اثر هم‌زمان آن‌ها به صورت دو عامل مجزا و هم‌افزا بررسی گردیده است.

طبق قانون اول فیک نرخ زمانی انتقال جرم ( $\dot{m}$ ) به صورت رابطه (2) ارائه می‌گردد (Chanson, 2004 and French, 1985).

$$\dot{m} = vc + \left(-D \frac{\partial c}{\partial x}\right) \quad (2)$$

که در آن  $v$  سرعت متوسط جریان،  $c$  غلظت آلودگی و  $D$  ضریب انتشار می‌باشد. ترم اول این معادله به نام شار جابجایی و ترم دوم آن به نام شار انتشار نامیده می‌شود. پس از اعمال قانون اول فیک، رابطه (2) در حالت یک بعدی به شکل رابطه (3) تبدیل می‌گردد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

رابطه (3) بر حسب شرایط اولیه و مرزی اعمال شده به معادله دیفرانسیلی، دارای حل‌های تحلیلی بسیار متنوعی می‌باشد که به بعضی از آن‌ها اشاره می‌گردد. اگر در زمان  $t = 0$  شرایط مرزی به صورت رابطه (4) باشد، حل تحلیلی آن به صورت رابطه (5) خواهد بود.

$$\begin{cases} c(x, 0) = 0 & \text{for } x > 0 \\ c(x, 0) = C_0 & \text{for } x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

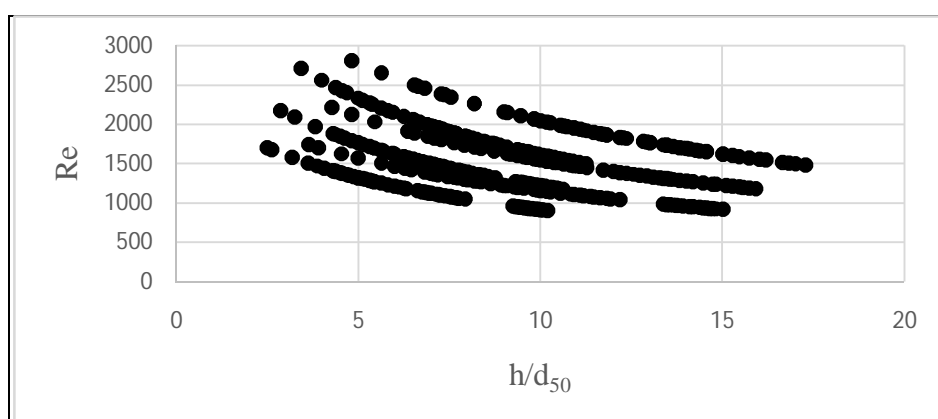
$$c(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{(x - vt)}{\sqrt{4Dt}} \right] \right] \quad (5)$$

که در آن  $C_0$  غلظت اولیه،  $x$  فاصله از محل تزریق آلودگی،  $\operatorname{erf}$  تابع خطا و  $t$  زمان می‌باشد.

شرایط اولیه و مرزی فوق همانند این است که یک لوله پر از سیال با غلظت اولیه، بر روی جریانی که با سرعت متوسط  $v$  در حال حرکت می‌باشد، قرار گیرد. از لحاظ کاربردی، زمانی که یک شبکه فاضلاب با آب و نرخ ثابتی از شوینده‌ها مورد شستشو قرار گیرد، شرایط مرزی به صورت فوق بیان می‌گردد.

شرایط اولیه و مرزی بعدی که برای آن حل تحلیلی ارائه گردیده است، حالتی است که در ابتدای گام زمانی جرم ثابتی آلودگی ( $M$ ) به صورت آنی در ابتدای بازه رها گردد. حل معادله مشابه حالتی است که جرم ( $M$ ) در یک سیال ساکن در فاصله‌ای از ابتدای بازه که برابر با  $x = vt$  می‌باشد رها گردد. در نهایت حل دقیق و تحلیلی شرایط

<sup>1</sup> Break Through Curve

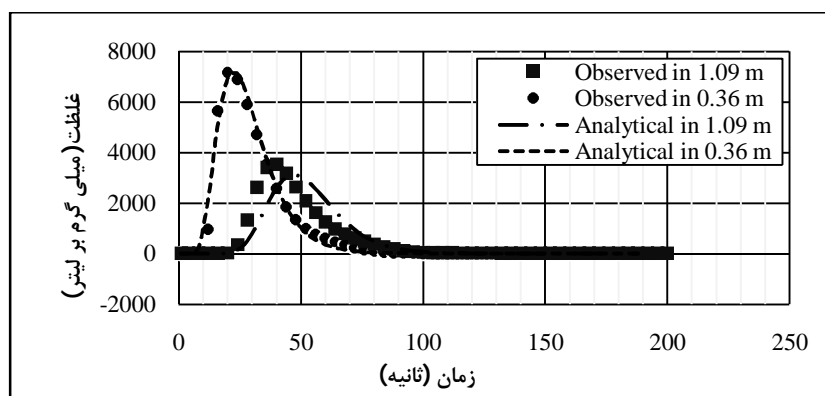


شکل 3 تغییرات نسبت عمق جریان به قطر متوسط محیط سنگدانه‌ای در مقابل عدد رینولدز محیط متخلخل

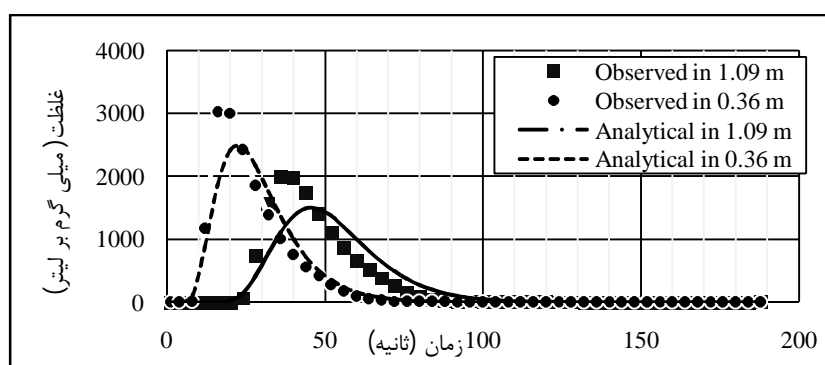
جابجایی و انتشار قادر به پیش‌بینی مطلوب نقطه اوج منحنی رخنه خروجی از هر دو موقعیت برداشت داده نیست و منحنی‌های حل تحلیلی دارای بازوی بالارونده با شیب ملایم‌تری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی (علی-الخصوص در محل حسگر دوم) می‌باشند. بر خلاف بازوی بالارونده، این معادله قسمت انتهایی<sup>1</sup> بازوی پائین‌رونده را به صورت مطلوبی مدل‌سازی می‌نماید و اختلاف چندانی مابین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی مشاهده نمی‌گردد. البته به نظر می‌رسد در محل حسگر دوم که در فاصله 1/1 متری از شروع محیط سنگدانه‌ای قرار گرفته است، حل تحلیلی مقداری تقدم فاز نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیدا نموده است که این امر می‌تواند به دلیل تفاوت سرعت ظاهری با سرعت منفذی جریان در مسیرهای جریان درون محیط سنگدانه‌ای باشد. به بیان دیگر جریان درون گذر عبوری، زبری بسیار بیشتری را نسبت به جریان‌های با سطح آزاد تحمل می‌نماید و سرعت جریان از درون محیط برای داده‌های آزمایشگاهی کمتر می‌گردد، لذا منحنی حل تحلیلی نسبت به منحنی آزمایشگاهی مقداری تقدم فاز پیدا می‌نماید. در حالت کلی منحنی‌های برداشت شده دارای بازوی بالارونده با شیب زیاد بوده، ولی دارای شیب بسیار کمی در بازوی پائین‌رونده می‌باشند. علاوه بر آن، انتقال آلودگی از درون این محیط‌ها دارای خاصیت تصادفی نیز می‌باشد، به این صورت که ممکن است در طول زمان برخلاف روند افزایشی و یا کاهش غلظت بر روی منحنی رخنه باشد.

پارامتر زمان ( $t$ ) منطبق بر بردار زمانی داده‌های آزمایشگاهی و در فواصل 4 ثانیه‌ای فرض شد، ولی برای پارامتر اندازه سطح مقطع ( $A$ ) در عمل چالش وجود داشت و این چالش ناشی از ایجاد پروفیل طولی در محیط متخلخل است. به دلیل ایجاد پروفیل ( $M_2$ ) درون محیط متخلخل، فرض یک عمق ثابت در تمامی طول آن فرض نادرستی است و می‌بایستی توسط روش‌های متداول عددی پروفیل ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته و عمق و در نتیجه مساحت مقطع در نقطه استخراج منحنی رخنه محاسبه شود. تجارب نویسندگان مقاله کارایی مناسب روش عددی رانگ-کوتای مرتبه 4 برای محاسبه عمق جریان درون محیط پاره‌سنگی را اثبات نموده است. جرم بازیابی شده توسط هر منحنی حسگرهای هدایت الکتریکی نیز با استفاده از روش ذودنقه‌ای و اعمال دبی جریان استخراج گردید. در نهایت اصلی‌ترین چالش برای محاسبه منحنی‌های رخنه برای حل عددی، محاسبه ضرایب انتشار طولی برای هر منحنی برداشت شده در حالت‌های مختلف دبی، قطرهای متفاوت سنگدانه‌ای و جرم‌های تزریقی آلودگی به درون محیط سنگدانه‌ای است. با استفاده از روش بهینه‌سازی کلاسیک (LSCFIT) در نرم‌افزار متلب که بر مبنای برازش بهترین منحنی بر اساس معادله حاکم و با روش کمترین مربعات خطا می‌باشد و کدنویسی در آن، در نهایت منحنی‌های رخنه حل تحلیلی بر مبنای حالت غیرواکنشی آلاینده (کلرید سدیم) استخراج گردید که نمونه‌هایی از آن در شکل‌های 4 تا 7 نمایش داده شده است. با توجه به این منحنی‌ها به خوبی دریافت می‌گردد که در حالت کلی معادله کلاسیک

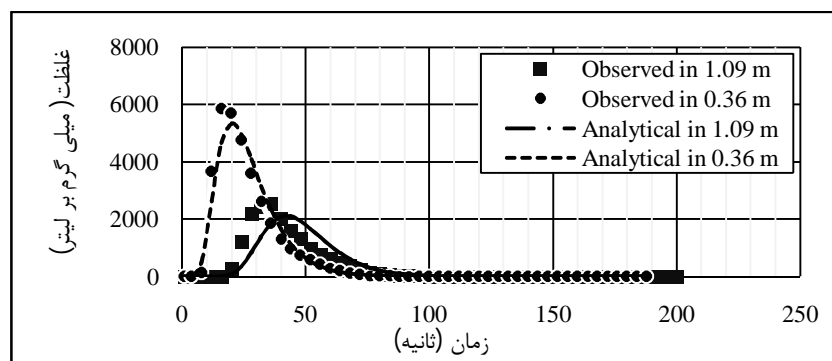
1 Tail of BC curve



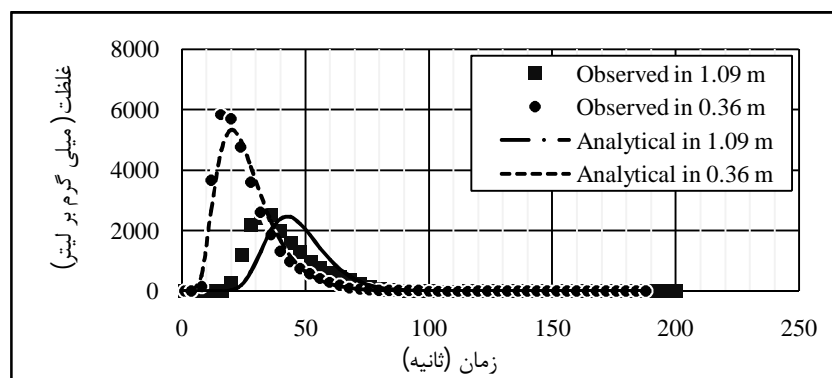
شکل 4 منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و تحلیلی برای دبی 0/26 لیتر بر ثانیه، قطر سنگ‌دانه 1/1 سانتی‌متر و جرم تزریقی 50 گرم



شکل 5 منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و تحلیلی برای دبی 0/26 لیتر بر ثانیه، قطر سنگ‌دانه 1/8 سانتی‌متر و جرم تزریقی 25 گرم



شکل 6 منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و تحلیلی برای دبی 0/37 لیتر بر ثانیه، قطر سنگ‌دانه 1/1 سانتی‌متر و جرم تزریقی 50 گرم



شکل 7 منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و تحلیلی برای دبی 0/37 لیتر بر ثانیه، قطر سنگ‌دانه 1/8 سانتی‌متر و جرم تزریقی 50 گرم



حسگر شماره اول که در فاصله 36 سانتی متری از شروع محیط سنگدانه‌های قرار گرفته است، بیشتر از حسگر شماره دوم که در فاصله 110 سانتی متری قرار گرفته است، می‌باشد. به منظور تعیین نحوه مدل‌سازی و دقت معادله کلاسیک جابجایی-انتشار اقدام به بررسی تعدادی از پارامترهای آماری مابین داده‌های آزمایشگاهی و حل تحلیلی گردید. پارامترهای آماری بررسی شده شامل شاخص حداکثر خطا ME، شاخص میانگین قدر مطلق خطا MAE، شاخص ضریب باقی‌مانده جرمی CRM و شاخص ریشه میانگین مربعات خطا RMSE است که روابط آن‌ها به ترتیب مطابق با معادلات (7) تا (10) می‌باشند (بی همتا و زارع چاهوکی، 1389).

$$ME = \max \text{abs}(C_{\text{exp}} - C_{\text{cal}}) \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_1^n \text{abs}(C_{\text{exp}} - C_{\text{cal}}) \quad (8)$$

$$CRM = \frac{\sum_1^n C_{\text{exp}} - \sum_1^n C_{\text{cal}}}{\sum_1^n C_{\text{exp}}} \quad (9)$$

$$RMSE = \left( \frac{100}{M} \right) \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (C_{\text{exp}} - C_{\text{cal}})^2} \quad (10)$$

در روابط فوق ME شاخص حداکثر خطا،  $C_{\text{exp}}$  غلظت مشاهداتی،  $C_{\text{cal}}$  غلظت محاسباتی، n تعداد داده‌ها، MAE میانگین قدر مطلق خطا، CRM ضریب باقی‌مانده جرمی و RMSE ریشه میانگین مربعات خطا است.

به نظر می‌رسد، بررسی پارامترهای آماری می‌بایستی در غلظت‌های مختلف آلودگی تزریقی به صورت مجزا انجام شود. لذا در 5 جرم اولیه تزریقی (میلی‌گرم) و برای منحنی‌های رخنه خروجی، مقادیر پارامترهای آماری به طور مجزا مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نتیجه‌گیری گردید که معادله به کار رفته، منحنی آزمایشگاهی اول را بهتر از منحنی دوم مدل‌سازی نموده است و مقدار پارامترهای ME، MAE، CRM و RMSE برای منحنی رخنه اول کمتر از منحنی دوم است. به همین علت می‌توان پیش‌بینی نمود که با افزایش طول محیط‌های سنگدانه‌ای دقت معادله کلاسیک انتقال و انتشار برای مدل‌سازی کمتر می‌شود.

یکی از دلایل مهم نامتقارن بودن منحنی رخنه برداشت شده آزمایشگاهی این است که محلول کلرید سدیم به عنوان آلاینده مدتی در مخزن بالادست معلق بوده و بلافاصله وارد محیط سنگریز نمی‌شود. به این اثر، اثر ذخیره<sup>1</sup> گفته می‌شود. علاوه بر آن، آلاینده درون منافذ محیط متخلخل نیز به طور موقت تله‌اندازی می‌شود و با شیب ملایم‌تری به بیرون از محیط سنگدانه‌ای منتقل می‌شود، لذا اثر ذخیره در درون محیط نیز وجود دارد.

سعی گردید تا مشخصات آزمایش‌های انجام شده به همراه جرم آلاینده تزریق شده و همچنین درصد بازیابی جرم و مقادیر ضرایب انتشار طولی استخراج شده برای تمامی آزمایش‌ها و در هر دو موقعیت برداشت داده در جدول 1 ارائه گردد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با تغییرات انجام شده در پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی جریان، ضرایب انتشار متفاوتی حاصل می‌گردد. ضرایب انتشار بدست آمده در درون خود تمامی پیچیدگی‌ها و فرایندهای اتفاقی موجود برای عبور هم‌زمان جریان و آلودگی را دارا است. در حالت کلی افزایش دبی باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده بر روی محیط پاره‌سنگی شده و با افزایش سرعت منفذی جریان و در نتیجه تأثیر انتشار مکانیکی و گرادیان‌های سرعت منفذی جریان مقدار ضریب انتشار ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد. افزایش قطر سنگ‌دانه‌ها نیز از این رو که باعث افزایش تخلخل محیط شده و در نتیجه در یک دبی ثابت سرعت منفذی بیشتری ایجاد می‌نماید، باعث افزایش ضریب انتشار طولی محیط برای آلودگی شده است. افزایش غلظت اولیه تزریق شده به جریان روند معنادارای را در میزان ضریب انتشار طولی نشان نمی‌دهد و در صورتی که جرم بازیابی شده از هر منحنی آزمایشگاهی به عنوان مبنای توزیع جرم در منحنی حل تحلیلی قرار گیرد، مقادیر تقریباً نزدیک به هم برای مقادیر ضرایب انتشار مشاهده می‌گردد. درصد بازیابی جرم نیز با افزایش جرم آلودگی تزریق شده به محیط پاره‌سنگی افزایش می‌یابد، یعنی هرچه جرم آلاینده تزریق شده (تزریق به صورت دفعی و آنی) افزایش یابد، درصد بازیابی آن نیز در حسگرها افزایش می‌یابد. درصد بازیابی نیز به طور متوسط در

<sup>1</sup> Storage effect

**جدول 1** مشخصات کلی آزمایش‌های انجام شده و ضرایب انتشار استخراج شده

شماره آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	قطر سنگدانه (سانتی‌متر)	جرم تزریق شده (گرم)	درصد بازیابی جرم برای منحنی اول	درصد بازیابی جرم برای منحنی دوم	ضریب انتشار منحنی رخنه اول (سانتی‌متر مربع بر ثانیه)	ضریب انتشار منحنی رخنه دوم (سانتی‌متر مربع بر ثانیه)
1	0/26	1/1	5	30/20	17/53	3/314	9/581
2	0/26	1/1	10	43/45	29/83	5/454	10/525
3	0/26	1/1	15	51/06	35/84	5/469	9/894
4	0/26	1/1	25	69/63	42/32	5/237	10/414
5	0/26	1/1	50	92/42	54/23	4/445	9/128
6	0/37	1/1	5	44/20	21/48	3/177	8/620
7	0/37	1/1	10	59/57	38/90	5/875	12/500
8	0/37	1/1	15	61/87	39/89	6/489	11/947
9	0/37	1/1	25	71/72	43/88	5/533	11/104
10	0/37	1/1	50	97/44	52/10	5/586	12/332
11	0/26	1/8	5	31/42	34/46	7/813	21/066
12	0/26	1/8	10	19	43/38	4/886	10/535
13	0/26	1/8	15	51/80	55/46	7/536	17/222
14	0/26	1/8	25	68/11	57/02	5/074	11/818
15	0/26	1/8	50	93/15	73/64	5/206	12/213
16	0/37	1/8	5	30/81	22/08	6/064	22/433
17	0/37	1/8	10	45/05	35/96	5/518	15/052
18	0/37	1/8	15	47/18	42/04	8/269	18/931
19	0/37	1/8	25	56/66	46/52	15/578	29/018
20	0/37	1/8	50	74/03	60/27	9/670	21/180

**جدول 2** شاخص‌های آماری بررسی شده برای آزمایش‌ها

جرم تزریقی (میلی گرم)	شاخص حداکثر خطا برای منحنی اول	شاخص حداکثر خطا برای منحنی دوم	شاخص میانگین قدر مطلق خطا برای منحنی اول	شاخص میانگین قدر مطلق خطا برای منحنی دوم	شاخص ضریب باقی‌مانده جرمی برای منحنی اول	شاخص ضریب باقی‌مانده جرمی برای منحنی دوم	شاخص ریشه میانگین مربعات خطا برای منحنی اول	شاخص ریشه میانگین مربعات خطا برای منحنی دوم
5000	135/78	98/074	10/21	11/68	0/001094	0/0006317	1/99	2/46
10000	254/016	251/618	19/31	30/07	0/0000953	0/000048	1/27	2/2
15000	426/714	376/213	35/53	49/23	0/0000583	0/000834	1/33	1/89
25000	952/099	635/451	71/87	77/8	0/001808	0/002419	1/41	1/65
50000	1475/581	1143/194	127/58	138/9	-0/000018	0/000864	0/8	1/19

### 5- نتیجه‌گیری

استخراج ضریب انتشار طولی برای جریان درون‌گذر دارای سطح آزاد با هوا از درون محیط‌های سنگریزه‌ای یکی از مهمترین پارامترهای لازم برای تولید منحنی‌های رخنه تحلیلی و یا عددی می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد

همچنین می‌توان گفت که با افزایش جرم تزریقی مقدار پارامتر RMSE کمتر شده، ولی مابقی پارامترهای آماری افزایش می‌یابند که این امر ناشی از ماهیت بزرگتر اعداد ایجاد شده در منحنی رخنه خروجی است و لزوماً نمی‌تواند ناشی از بدتر شدن مدل‌سازی تحلیلی باشد.

$n$	تخلخل سنگدانه‌ها
$n$	تعداد داده‌ها
$Re$	عدد رینولدز
$RMSE$	ریشه میانگین مربعات خطا
$t$	زمان
$V_p$	حجم منافذ
$V_t$	حجم کل سنگدانه‌ها
$x$	فاصله از محل تزریق آلودگی
$v$	سرعت متوسط و حاکم در جریان

که معادله کلاسیک جابجایی و انتشار، در صورت وارد نمودن صحیح پارامتر سرعت منفذی جریان، قابلیت مدل-سازی فرایندهای جابجایی و انتشار را دارا است، ولی در مدل‌سازی نقطه اوج منحنی‌های رخنه دارای کاستی‌هایی است. استفاده از رابطه پیوستگی برای محاسبه سرعت منفذی، به دلیل تشکیل پروفیل طولی ( $M_2$ ) درون محیط سنگدانه‌ای، نیاز به یک روش جانبی برای محاسبه پروفیل طولی دارد. افزایش دبی و قطر سنگدانه‌های محیط متخلخل باعث افزایش ضرایب انتشار محیط متخلخل برای آلاینده‌ها شده و تغییرات غلظت اولیه خروجی روند معناداری را در ضریب انتشار نشان نداده است. اعداد بدست آمده در این پژوهش می‌تواند برای کارهای اجرایی بسیار قابل توجه بوده و منجر به پیش‌بینی فرایند جابجایی-انتشار آلودگی گردد. ضرایب استخراج شده در این تحقیق برای حالت غیرواکنشی بوده و جرم اعمال شده در معادله همان جرم بازیابی شده از منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی می‌باشد. درصد بازیابی جرم نیز در منحنی‌های رخنه دوم که در فاصله بیشتری از شروع محیط سنگدانه‌ای قرار گرفته است، بیشتر از منحنی رخنه اول می‌باشد. همچنین با افزایش جرم تزریقی درصد بازیابی آلودگی از روی منحنی‌های برداشت شده افزایش می‌یابد.

## 7- تشکر و قدرانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح پژوهشی با شماره 94/د/369 می‌باشد و بدین طریق از معاونت پژوهشی دانشگاه مراغه برای تامین اعتبارات آن تشکر و قدرانی می‌شود.

## 8- منابع

احمدی، ح. (1395). "بررسی آزمایشگاهی عملکرد حصار هیدرولیکی در انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی". مجله تحقیقات کاربردی سازه‌های آبیاری و زه‌کشی. دوره 17، شماره 66، صص 31-42.

بی‌همتا، م. و زارع چاهوکی، م. (1389). اصول آمار در علوم منابع طبیعی. انتشارات دانشگاه تهران، شماره 2924، چاپ دوم.

پارسائی، ع. و حقی‌آبی، ا. ح. (1394). "مطالعه ضریب پخش طولی و مدل‌سازی آلودگی در رودخانه‌ها (مطالعه موردی رودخانه سروم و نارو)". مجله آب و خاک. دوره 29، شماره 5، صص 1070-1085.

چابک‌پور، ج.، امیری تکلدانی، ا. و صدقی اصل، م. (1395). "برآورد ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق درن محیط‌های متخلخل درشت‌دانه". مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره 23، شماره 6، صص 317-332.

رخشنده‌رو، غ. ر. و بشارت نیا، آ. (1380). "بررسی هیدرولیکی پدیده انتقال و پخش آلودگی در محیط‌های متخلخل". سومین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران. دانشگاه تهران.

ریاحی مدوار، ح. و ایوب‌زاده، س. ع. (1387). "تخمین ضریب پراکندگی آلودگی با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی انطباقی". مجله آب و فاضلاب اصفهان. دوره 19، شماره 3،

## 6- فهرست علائم

$A$	مساحت مقطع عبوری جریان
$C_0$	غلظت اولیه
$c$	غلظت آلودگی
$C_{exp}$	غلظت مشاهداتی
$C_{cal}$	غلظت محاسباتی
$CRM$	ضریب باقی‌مانده جرمی
$D$	ضریب انتشار طولی
$erf$	تابع خطا
$\frac{h}{d_{50}}$	نسبت عمق جریان به قطر متوسط محیط متخلخل
$M$	جرم آلودگی تزریق شده
$MAE$	میانگین قدر مطلق خطا
$ME$	شاخص حداکثر خطا
$\dot{m}$	نرخ زمانی جرم

- flow and solute transport in a laboratory beach". *Journal of Contaminant Hydrology*. 165:37-52. صص. 36-46.
- Huang, K., Toride, N. and Genuchten, M. T. (1995). "Experimental investigation of solute transport in large homogeneous and heterogeneous saturated soil columns". *Transport in Porous Media*. 18(3):283-302.
- Maraq, M. A. (2001). "Prediction of mass-transfer coefficient for solute transport in porous media". *Journal of Contaminant Hydrology*. 50(1):1-9.
- Sharma, P. K., Joshi, N., Srivastava. R. and Ojha, C. S. (2014). "Reactive transport in fractured permeable porous media". *Journal of Hydrologic Engineering*. 20(7):1-10.
- Swami, D., Sharma, P. K. and Ojha, C. S. (2016). "Behavioral study of the mass transfer coefficient of nonreactive solute with velocity distance and dispersion". *Journal of Environmental Engineering*. 143(1):1-10.
- ولی‌پور، م. و صادقی، م. (1391). "مدل‌سازی پخش مواد آلاینده همراه جریان آب در یک محیط متخلخل". اولین کنفرانس انتقال حرارت و جرم ایران. دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.
- Chanson, H. (2004). *Environmental hydraulics of open channel flows*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford.
- French, R. H. (1985). *Open channel hydraulics*. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Gao, G., Zhan, H., Feng, S., Fu, B., Ma, Y. and Huang, G. (2010). "A new mobile-immobile model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion". *Water Resources Research*, 46(8):1-16.
- Geng, X., Boufadel, M. C., Xia, Y., Li, H., Zhao, L., Jackson, N. L. and Miller, R. S. (2014). "Numerical study of wave effects on groundwater