

## اعمال روش گشتاورگیری زمانی بر روی منحنی‌های رخنه آلودگی خروجی از محیط‌های سنگ‌دانه‌ای

جعفر چابک پور<sup>۱\*</sup>، امیر صمدی<sup>۲</sup>، مهرنوش مریخی<sup>۳</sup>

۱. استادیار دانشکده فنی دانشگاه مراغه، مراغه

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری، دانشکده فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۸/۹)

### چکیده

در این تحقیق سعی گردید تا یک بررسی آزمایشگاهی بر روی پارامترهای انتقال و انتشار محیط‌های سنگ‌دانه‌ای با استفاده از دو دبی کاملاً درون‌گذر عبوری، دو قطر سنگدانه و پنج غلظت تزریقی مختلف انجام شود. ابتدا با استفاده از حسگرهای دیجیتال تعیین‌کننده هدایت الکتریکی و نرم‌افزار مربوطه اقدام به برداشت منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی نموده سپس با استفاده از روش گشتاورگیری زمانی ضرایب انتشار طولی و سایر پارامترهای انتقال و انتشار اعم از متوسط زمان ماند، واریانس و چولگی منحنی‌های رخنه محاسبه شد و با استفاده از ضرایب بدست آمده و حل تحلیلی معادله‌ی کلاسیک انتقال و انتشار، منحنی‌های تحلیلی استخراج شده و با موارد آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصله کارائی روش گشتاورگیری را به اثبات رسانده و نشان داد که حل تحلیلی انجام شده با ضرایب انتشار حاصل شده از روش گشتاورگیری، به جز نقطه اوج منحنی (در بعضی از مواقع)، بقیه قسمت‌های آن را به‌خوبی مدل‌سازی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: مصالح سنگ‌دانه‌ای، آلودگی، ضریب انتشار طولی، گشتاورگیری زمانی

### مقدمه

با توجه به نگرانی‌هایی که در خصوص آلودگی منابع آب در قرن اخیر ایجاد شده است، مدل‌سازی نحوه انتقال و انتشار این آلودگی‌ها و استفاده از روش‌های مختلف در این زمینه کاربرد بسیار زیادی پیدا نموده است. زمانی که آلاینده‌ای وارد آب می‌شود به دلیل گرادیان غلظت و تبادل مومنتوم بین نقاط مختلف جریان و همچنین وجود سرعت عمومی جریان، فرآیند-های انتقال و پخشیدگی آلودگی در آن انجام می‌شود. به همین جهت مکانیسم انتقال و پراکندگی آلاینده‌ها بخش مهمی از دانش محیط‌زیست را به خود اختصاص داده است. محیط‌های سنگ‌دانه‌ای نوعی از محیط‌های متخلخل هستند که در آن‌ها گرادیان هیدرولیکی همانند رابطه داری با توان یک سرعت منفذی جریان متناسب نیستند و این توان همانند جریان‌های متلاطم موجود در مجاری روباز نزدیک به دو می‌باشد. اغلب محققین توان  $1/8$  را برای آن مناسب می‌دانند. این امر باعث شده است تا نوعی از جریان درون محیط سنگ‌دانه‌ای تشکیل شود که به جریان غیرداری معروف می‌باشد (Chabokpour et al., 2016).

اگر یک ماده درون آب به‌طور یکنواخت توزیع نشده باشد یک شیب غلظت از این ماده طوری ایجاد می‌شود که ماده از نقطه‌ای با غلظت بیشتر به نقطه‌ای با غلظت کمتر انتقال می‌یابد. این نوع از انتشار که حتی در سیال ساکن نیز وجود دارد پخشیدگی مولکولی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود (Mahmoudian Shoshtari, 2008). نوع دیگری از پخشیدگی تحت اثر گرادیان سرعت بین نقاط مختلف سیال و تبادل مومنتوم بین آن‌ها ایجاد می‌شود که به‌عنوان پخشیدگی اغتشاشی<sup>۲</sup> معروف است. در جریان‌های عبوری از محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، به دلیل اعمال زبری از سوی سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل، سرعت‌های مختلف در نقاط مختلف ایجاد می‌شوند که وجود آن در منافذ محیط‌های متخلخل، نوعی پخشیدگی ایجاد می‌نماید که تحت عنوان انتشار مکانیکی<sup>۳</sup> معروف می‌باشد (Chabokpour, 2013). اثر همزمان پخشیدگی مولکولی و پخشیدگی مکانیکی نیز تحت عنوان انتشار هیدرودینامیکی نامیده می‌شود. در حالت کلی

1. Diffusion)

2. Dispersion

3. Mechanical Dispersion

برنامه‌ریزی ژنتیک سبب بهبود تخمین ضریب انتشار طولی رودخانه‌ها می‌شود. ایشان همچنین نتیجه‌گیری نمودند که مدل‌های ناشی از داده‌کاوی نسبت به مدل‌های تجربی و مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به مدل‌های شبکه‌ی عصبی کارایی بیشتری دارند.

Seo and Cheong (1998) در تحقیق خود، معادلات تجربی قبلی مورد استفاده برای محاسبه ضریب انتشار در رودخانه‌های طبیعی را به منظور پیش‌بینی ویژگی پراکندگی مورد استفاده قرار داده و یک روش ساده برای پیش‌بینی ضریب انتشار با استفاده از داده‌های هیدرولیک و هندسی رودخانه‌ها ارائه نمودند.

Izadinia and Abedi-Koupai (2011) رابطه‌ای در برگیرنده‌ی پارامترهای مؤثر بر ضریب انتشار طولی با استفاده از آنالیز ابعادی را ارائه کردند. ایشان در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر از نرم‌افزار SPSS استفاده نموده و در نهایت نتیجه‌گیری نمودند که پارامترهای مؤثر بر ضریب انتشار طولی شامل ضریب زبری و نسبت عرض به عمق می‌باشد. همچنین با انجام آنالیز حساسیت نشان دادند که تأثیر ضریب زبری بر ضریب انتشار طولی بیشتر است.

Harvey *et al* (1993) از معادلات مربوط به گشتاورهای زمانی برای مدل‌سازی انتقال و انتشار آلاینده‌ها در سفره‌های ناهمگن استفاده نمودند. Pang *et al* (2003) به این نتیجه رسیدند که روش گشتاور زمانی ابزاری مفید در اندازه‌گیری سرعت منفذی جریان و میزان ضریب انتشار می‌باشد و برآوردهای حاصل از آن مطابقت خوبی با برازش منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی دارد.

روش گشتاورهای زمانی در بسیاری از مدل‌های انتقال و پخشیدگی آلاینده‌ها در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. Schmid (2002) روشی را برای محاسبه گشتاورهای زمانی مدل ذخیره موقت (TS<sup>1</sup>) برای محاسبه پارامترهای چهارگانه این مدل ارائه نمود. Sedghi Asl (2010) اقدام به محاسبه‌ی ضریب انتشار با استفاده از روش گشتاورهای مکانی و زمانی برای آلودگی رودامین در محیط‌های پاره‌سنگی طولی کرد و در نهایت به کارایی بالای این روش‌ها نسبت به روش‌های پیچیده‌تر حل تحلیلی اشاره نمود. Parsaei and haggiabi (2015) از روش گشتاورگیری برای محاسبه‌ی ضرایب پخشیدگی آلودگی در رودخانه‌ها استفاده نمودند. سپس به

برآیند انتشار مولکولی و مکانیکی، انتشار هیدرودینامیکی را حاصل کرده و ممکن است که میزان آن در جهت‌های مختلف با یکدیگر برابر نباشد. این فرآیند در جهت طولی جریان، انتشار طولی و در جهت عرض جریان انتشار عرضی نامیده می‌شود (Bear, 1972).

با تزریق آلاینده‌های گوناگون به جریان‌های با سطح آزاد، انتقال آن به پائین‌دست با کمک سرعت متوسط انجام می‌شود و انتشار آن‌ها در طول، عرض و عمق به وسیله کمک فرآیند اختلاط با جریان و پخشیدگی طولی و عرضی و عمقی انجام می‌شود. ضریب انتشار در جریان‌های با سطح آزاد در هر سه جهت طولی و عرضی و عمقی با  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$  بیان می‌شود (Taylor and Singh, 2005).

استفاده از حل‌های تحلیلی و یا عددی برای محاسبه میزان غلظت آلاینده‌ها در جریان‌های مختلف مستلزم دانستن ضریب انتشار می‌باشد. زمانی که داده‌های واقعی غلظت-زمان موجود باشد این ضریب به سادگی قابل محاسبه می‌باشد. در غیر این صورت این ضریب‌ها معمولاً با استفاده از مدل‌ها و روابط تجربی محاسبه می‌گردند (Kashefipour and Falconer, 2002).

Seo and Baek (2004) یک روش نظری برای تخمین ضریب انتشار طولی که بر اساس توزیع سرعت عرضی در آبراهه‌های طبیعی تنظیم شده بود، ارائه نمودند. این محققان معادله‌ی توزیع بتا را که یک تابع چگالی احتمال است به عنوان مناسب‌ترین مدل برای توضیح رفتار پیچیده‌ی سرعت عرضی در مقاطع نامنظم دانستند و معادله‌ی جدیدی برای تخمین ضریب انتشار طولی بر اساس تابع توزیع بتا برای پروفیل سرعت عرضی ارائه نمودند. مقایسه‌ی معادله‌ی پیشنهادی با معادلات موجود و ضرایب انتشار طولی مشاهداتی مشخص کرد که معادله‌ی پیشنهادی نتایج بهتری نسبت به سایر معادلات ارائه می‌دهد.

Riahi-Madvar and Ayyoubzadeh (2007) 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، روش جدیدی را در این زمینه ارائه نمودند که نتایج آن نشان داد استفاده از روش فازی-عصبی توسعه داده شده با نتایج موجود و داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی واقعی تطابق مناسب‌تری دارد.

Soltangerdfamarzi *et al* (2015) با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی، معادلات تجربی مختلف برای تعیین ضریب انتشار طولی در رودخانه‌ها را مورد بررسی قرار داده و نتیجه‌گیری نمودند که استفاده از روش‌های نروفازی و

محیط‌های متخلخل، استفاده از روش گشتاورگیری زمانی و مکانی برای منحنی‌های رخنه‌ی برداشت شده می‌باشد. از آنجائی که معمولاً منحنی‌های رخنه<sup>۱</sup> برداشت شده، نمایش-دهنده تغییرات غلظت در مقابل زمان می‌باشند، لذا استفاده از روش گشتاورگیری زمانی نسبت به روش گشتاورگیری مکانی برای بدست آوردن پارامترهای انتشار بیشتر مرسوم می‌باشد. در زیر رابطه کلی گشتاور مرتبه  $n$  ام به صورت زیر ارائه شده است (رابطه ۴).

$$M_{n,t}(x) = \int_0^{\infty} t^n c(x,t) dt \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن:  $M_{n,t}(x)$  گشتاور مرتبه  $n$  ام  $c(x,t)$  نسبت به مبدأ زمانی ( $t = 0$ ) می‌باشد.

با ملاک قرار دادن رابطه (۳) به عنوان رابطه مبنائی، گشتاور مرتبه صفرام برابر با رابطه (۵):

$$M_{0,t}(x) = \int_0^{\infty} \left[ \frac{M}{A\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4Dt}\right) \right] dt = \frac{M}{Q}$$

که در آن  $Q$  دبی حجمی عبوری است و برابر است با  $Q = uA$ ، با استفاده از رابطه (۵) می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که جرم ردیاب برابر است با:

$$M = M_{0,t}(x) \times Q \quad (\text{رابطه ۶})$$

رابطه گشتاور مرتبه  $n$  ام بی بعد شده نیز برابر است با:

$$m_{n,t}(x) = \frac{M_{n,t}(x)}{M_{0,t}(x)} = \frac{\int_0^{\infty} t^n c(x,t) dt}{\int_0^{\infty} c(x,t) dt} \quad (\text{رابطه ۷})$$

با توجه به رابطه فوق گشتاور مرتبه صفرم نرمال شده برابر با یک خواهد بود. یعنی سطح زیر منحنی برای گشتاور نرمال شده نسبت به مبدأ برابر با یک است (Chanson, 2004).

گشتاور زمانی مرتبه اول به صورت رابطه (۸) است و از لحاظ ابعادی از بعد زمان بوده و برابر است با فاصله زمانی از مبدأ مختصات تا مرکز منحنی رخنه. منظور از مرکز منحنی رخنه نیز مرکز سطح منحنی غلظت-زمان می‌باشد. این پارامتر با  $t_m$  نمایش داده شده است و به عنوان سرعت متوسط حرکت شناخته می‌شود.

$$m_{1,t}(x) = \frac{\int_0^{\infty} tc(x,t) dt}{M_{0,t}(x)} = \frac{x}{u} \left( 1 + 2 \frac{D}{ux} \right) = t_m \quad (\text{رابطه ۸})$$

ترم دوم داخل پرانتز در رابطه (۸)، نسبت به ترم اول دارای مقدار کمتری است و لذا در رابطه فوق این ترم قابل اغماض است. به همین دلیل در بسیاری از مواقع برای سرعت متوسط حرکت، رابطه (۹) به کار می‌رود.

$$t_m = \frac{x}{u} \quad (\text{رابطه ۹})$$

گشتاورهای زمانی در بسیاری از مواقع به جای مبدأ

بررسی کارایی و دقت روابط تجربی ارائه شده توسط محققین پیشین برای محاسبه‌ی ضرایب پخشیدگی پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که روابطی که توسط هانگ و فیشر بدست آمده‌اند دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روابط می‌باشند.

Chabokpour *et al* (2016) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده در یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از محیط متخلخل درشت‌دانه، اقدام به برداشت منحنی‌های رخنه‌ی رسوبات معلق عبوری از محیط‌های متخلخل نمودند. سپس با مقایسه دو روش گشتاورگیری زمانی و استفاده از معادله‌ی کلاسیک انتقال و انتشار (ADE)، به منظور تخمین ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق، به این نتیجه رسیدند که روش گشتاورگیری زمانی در مقایسه با معادله‌ی کلاسیک کارایی بهتری دارد. همچنین رابطه بدون بعدی را برای تخمین ضرایب انتشار با میانگین خطای نسبی ۳۰ درصد ارائه نمودند.

#### مبنای تئوریک روش گشتاورگیری زمانی

برای یک جریان سه بعدی رابطه کلی انتقال و انتشار به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $C$  غلظت آلودگی،  $t$  زمان،  $x$  فاصله در جهت طولی،  $y$  فاصله در جهت عرضی،  $z$  فاصله در جهت عمقی،  $u$  سرعت در راستای طولی،  $v$  سرعت در راستای عرضی،  $w$  سرعت در راستای عمقی،  $D_x$  ضریب انتشار طولی،  $D_y$  ضریب انتشار عرضی،  $D_z$  ضریب انتشار عمقی است.

معمولاً فرآیند انتشار در عرض و عمق جریان ابتدا تکمیل می‌شود و سپس فرآیند انتشار طولی آغاز می‌گردد لذا در اکثر جریان‌ها، انتشار عرضی و عمقی ابتدا تکمیل می‌شود و پس از اختلاط کامل عرضی و عمقی فرآیند انتشار طولی شروع می‌گردد لذا معادله انتشار سه بعدی در عمل تبدیل به معادله انتشار یک‌بعدی به صورت رابطه (۲) می‌گردد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

زمانی که جریان ماندگار و دارای سرعت یکنواختی باشد و ماده‌ی ردیاب با جرم  $M$  به صورت آنی در داخل جریان تزریق شود، رابطه (۲) دارای حل تحلیلی به صورت (۳) خواهد بود (French, 1987).

$$c(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4Dt}\right] \quad (\text{رابطه ۳})$$

یکی از روش‌های محاسبه‌ی ضریب انتشار درون

گشتاور مرکزی مرتبه سوم، رابطه (۱۶) به صورت زیر حاصل خواهد شد.

$$\mu_{3,t}(x) = \frac{\int_0^{\infty} (t-t_m)^3 c(x,t) dt}{M_{0,t}(x)} = \frac{12t_m^3}{Pe^2} = m_{3,t} - 3m_{1,t} \times m_{2,t}(x) + 2m_{1,t}^3 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

عدد  $Pe$  (پکلت) نیز از پارامترهای مهم در فرآیندهای انتقال و انتشار می‌باشد که بیانگر نسبت قدرت انتقال به انتشار آلاینده است و به صورت  $Pe = \frac{xu}{D}$  قابل محاسبه است.

قابل ذکر است که مقدار ضریب چولگی را نباید با خود چولگی اشتباه گرفت و ضریب چولگی برابر است با:

$$CSK = \frac{\mu_{3,t}}{(\mu_{2,t})^{3/2}} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که در آن  $CSK$  ضریب چولگی می‌باشد (Gonzalez-Pinz et al., 2013)

در حالت کلی، هدف از انجام این پژوهش، تعیین ضرایب انتشار طولی محیط‌های متخلخل درشت‌دانه برای جریان‌های عبوری حاوی آلاینده که در اینجا از کلرید سدیم به عنوان آلاینده استفاده شده است، می‌باشد. در این تحقیق سعی شده تا از طریق برداشت منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و اعمال روش گشتاورگیری زمانی که در بالا شرح داده شد اقدام به محاسبه ضرایب انتشار و چولگی منحنی‌های آزمایشگاهی شود. بررسی کارائی این روش، به عنوان یک روش عملی برای جریان‌های درون‌گذر از محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، از دیگر اهداف این تحقیق بود. سپس با استفاده از ضرایب انتشار طولی مستخرج از این روش و اعمال آن‌ها در حل تحلیلی معادله یک‌بعدی، منحنی‌های تئوری بازسازی و نحوه انتقال و انتشار این آلاینده از این‌گونه محیط‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۸۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده گردید (شکل ۱). در انجام آزمایش‌ها از دو قطر سنگدانه با متوسط اندازه‌های ۱/۸ سانتی‌متر و ۱/۱ سانتی‌متر استفاده شد که به ترتیب دارای تخلخل ۰/۴۲ و ۰/۴۴ بودند. شیب طولی فلوم آزمایشگاهی در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. دو دبی ۰/۲۶ و ۰/۳۷ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت که یک پروفیل طولی از نوع M2 درون محیط سنگدانه‌ای ایجاد می‌نمودند. در شکل (۱) نمای کلی فلوم و محیط متخلخل استفاده شده در آزمایش نشان داده شده است.

مختصات نسبت به زمان متوسط حرکت (زمان متوسط ماندگاری) و به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$\mu_n = \frac{\int_0^{\infty} (t-t_m)^n c(x,t) dt}{M_{0,t}(x)} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

با توجه به رابطه (۹) مشتق مرتبه اول زمان متوسط ماندگاری نسبت به متغیر مکانی  $x$  بهترین راه برای سرعت متوسط (رابطه ۱۱) می‌باشد.

$$u = \left( \frac{dt_m}{dx} \right)^{-1} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

زمان متوسط ماندگاری با استفاده از گشتاور مرتبه اول منفی نسبت به مبدأ نیز به طور مستقیم قابل محاسبه است و برای این منظور رابطه (۱۲) را به صورت زیر داریم:

$$m_{-1,t}(x) = \frac{\int_0^{\infty} t^{-1} c(x,t) dt}{M_{0,t}(x)} = \frac{u}{x} = \frac{1}{t_m} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان گفت که گشتاور مرتبه صفرم نسبت به زمان متوسط ماندگاری، برابر با صفر خواهد بود ( $\mu_n = 0$ ). گشتاور دوم نسبت به زمان متوسط ماندگاری مطابق با رابطه (۱۳) تعریف می‌گردد و عبارت است از واریانس زمانی منحنی رخنه ( $\sigma_t^2$ ).

$$\mu_{2,t}(x) = \frac{\int_0^{\infty} (t-t_m)^2 c(x,t) dt}{M_{0,t}(x)} = \frac{8D^2}{u^4} + \frac{2Dx}{u^3} = m_{2,t}(x) - (m_{1,t}(x))^2$$

به دلیل اینکه ترم اول رابطه فوق در قیاس با ترم دوم دارای عدد کوچکتری می‌باشد، لذا می‌توان رابطه (۱۴) را مابین واریانس توزیع و ضریب انتشار طولی نوشت.

$$\sigma_t^2 = \frac{2Dx}{u^3} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

از رابطه (۱۴) می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که واریانس زمانی توزیع به صورت خطی با پارامتر طول  $x$  تغییر می‌نماید. لذا با مشتق‌گیری از رابطه (۱۴) رابطه (۱۵) نتیجه‌گیری می‌شود.

$$\frac{d\sigma_t^2}{dx} = \frac{2D}{u^3} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

رابطه فوق به این معنی می‌باشد که اگر واریانس زمانی منحنی رخنه ( $\sigma_t^2$ ) در مقابل پارامتر طول ( $x$ ) ترسیم گردد از روی شیب منحنی می‌توان ضریب انتشار طولی را محاسبه نمود و این ضریب در جریان‌های ماندگار و یکنواخت دارای مقداری ثابت خواهد بود.

از روی گشتاور مرکزی مرتبه سوم نیز چولگی و همچنین ضریب چولگی منحنی رخنه محاسبه می‌شود. لذا با اعمال



شکل ۱. فلوم و محیط متخلخل مورد استفاده در آزمایش

از ابتدای محیط سنگدانه‌ای، دو سنسور هدایت الکتریکی نصب گردید که به Data logger دستگاه *EC* سنج دیجیتالی وصل شده بودند (شکل ۲. الف و ب). این دستگاه با استفاده از یک نرم‌افزار که برای این مجموعه نوشته شده بود در فواصل ۴ ثانیه اقدام به برداشت هدایت الکتریکی جریان عبوری از محیط سنگدانه‌ای نموده و این مقادیر با استفاده از یک رابطه کالیبراسیون تبدیل به غلظت جریان بر حسب (میلی‌گرم بر لیتر) گردید. در نهایت داده‌های استخراج شده تبدیل به دو منحنی رخنه در دو طول مختلف از محیط سنگدانه‌ای گردید و سپس با اعمال روش گشتاورگیری زمانی اقدام به بررسی فرآیندهای انتقال و انتشار آلاینده در محیط سنگدانه‌ای شد.

در این آزمایش‌ها، مصالح سنگریزه‌ای پس از دانه‌بندی به وسیله‌ی الک شستشو شده و در داخل فلوم آزمایشگاهی به طور کاملاً تصادفی ریخته شد. در طی آزمایش‌ها، ارتفاع محیط متخلخل طوری تنظیم شده بود که جریان عبوری از محیط سنگدانه‌ای کاملاً به صورت درون گذر از محیط باشد. عبور دبی-های مختلف از روی محیط سنگدانه‌ای نیز گرادیان‌های مختلفی را ایجاد می‌کردند.

پنج جرم مختلف از کلرید سدیم به ترتیب برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ گرم در یک لیتر آب به طور کامل حل شده سپس به صورت آبی به بالادست محیط متخلخل تزریق شدند. در بدنه محیط متخلخل در دو نقطه به فاصله ۰/۳۶ و ۱/۰۹ متر



(ب)



(الف)

شکل ۲. سنسورهای هدایت الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق (الف) و Data logger دستگاه *EC* سنج هدایت الکتریکی (ب)

انتشارپذیری طولی نیز که حاصل تقسیم ضریب انتشار طولی به سرعت متوسط می‌باشد نیز محاسبه شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، پارامترهای زیادی در فرایند انتقال و انتشار عبوری از این محیط‌ها تاثیرگذار هستند که از جمله می‌توان به تغییرات دبی، قطر سنگ‌دانه، طول محیط متخلخل و سرعت منفذی جریان اشاره کرد. با افزایش دبی در هر یک از محیط‌ها سرعت منفذی جریان افزایش یافته

## نتایج و بحث

در این مطالعه از طریق روابط (۸) تا (۱۷)، روش گشتاورگیری زمانی بر روی منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی اعمال شد و ضرایب انتشار، سرعت متوسط جریان یا (متوسط زمان ماندگاری) و ضریب چولگی برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه گردید. خلاصه‌ی نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در جداول شماره (۱ و ۲) ارائه شده است. در این جداول، پارامتر

معادله یک‌بعدی انتقال-انتشار است، اقدام به بازسازی منحنی-های رخنه تحلیلی گردید و از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب نمودارهای مربوطه ترسیم و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شکل‌های (۳) تا (۷) نمونه‌هایی از این نمودارهای استخراج شده ارائه شده است.

با توجه به این شکل‌ها مشخص شده است که مابین نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی هماهنگی خوبی دیده می‌شود. لکن در پیش‌بینی نقطه اوج منحنی اختلافاتی مشاهده می‌شود. همچنین منحنی‌های رخنه‌ی آزمایشگاهی حاصل از حسگر اول که در فاصله‌ی ۰/۳۶ متر از محل تزریق آلاینده قرار دارد، هماهنگی بهتری بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی نسبت به حسگر دوم که در فاصله‌ی ۱/۰۹ متر قرار دارد، نشان می‌دهد. منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی دارای شیب زیاد در بازوی بالارونده و شیب ملایم در بازوی پایین‌رونده است.

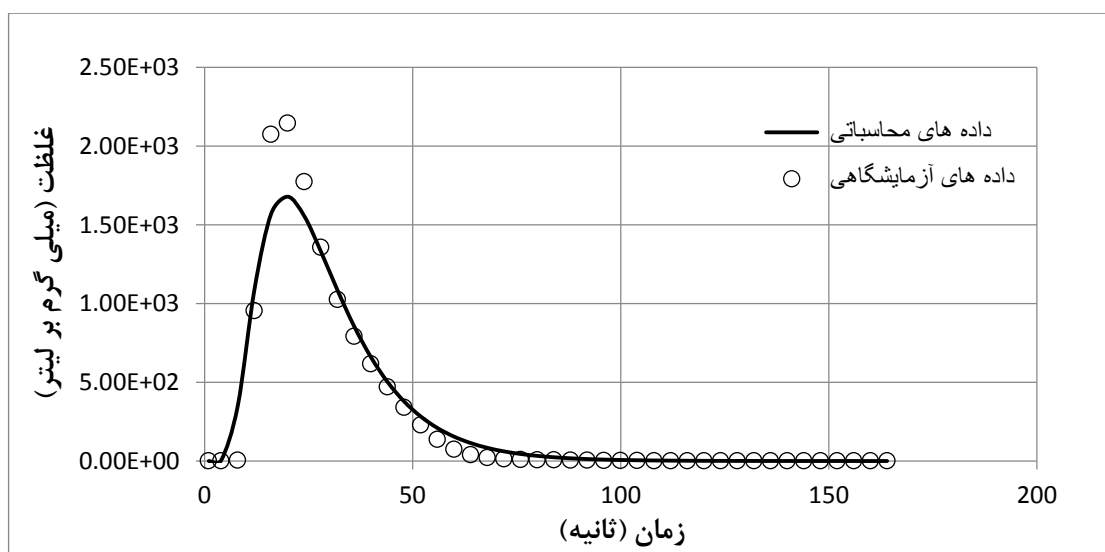
و ضریب انتشار محیط متخلخل نیز افزایش می‌یابد. با تغییر قطر سنگ‌دانه‌ها نیز میزان تخلخل محیط تغییر پیدا کرده و ضرایب انتشار متفاوتی بدست می‌آید. با افزایش قطر سنگ‌دانه‌ها میزان ضریب انتشار هم افزایش یافته است. با افزایش جرم آلاینده تزریق شده به ابتدای محیط، تأثیر مشخصی بر روند ضریب انتشار طولی مشاهده نگردید ولی درصد بازیابی جرم افزایش پیدا نموده است. با افزایش طول محیط سنگدانه‌ای و یا با حرکت رو به جلو در طول محیط سنگدانه‌ای، میزان ضریب انتشار کاهش پیدا نموده است. با توجه به اینکه جریان‌های عبوری از محیط‌های سنگدانه‌ای با سطح آزاد، دارای کمترین عمق در خروجی خود و بیشترین عمق در بالادست هستند، قابلیت انتشارپذیری طولی نیز با حرکت به سمت پایین محیط متخلخل (با افزایش طول) افزایش پیدا کرده است. پس از استخراج ضرایب انتشار طولی با روش گشتاورگیری زمانی، با استفاده از رابطه (۳) که حل تحلیلی

جدول ۱. ضرایب طولی بدست آمده از طریق روش گشتاورهای زمانی در شرایط مختلف آزمایشگاهی

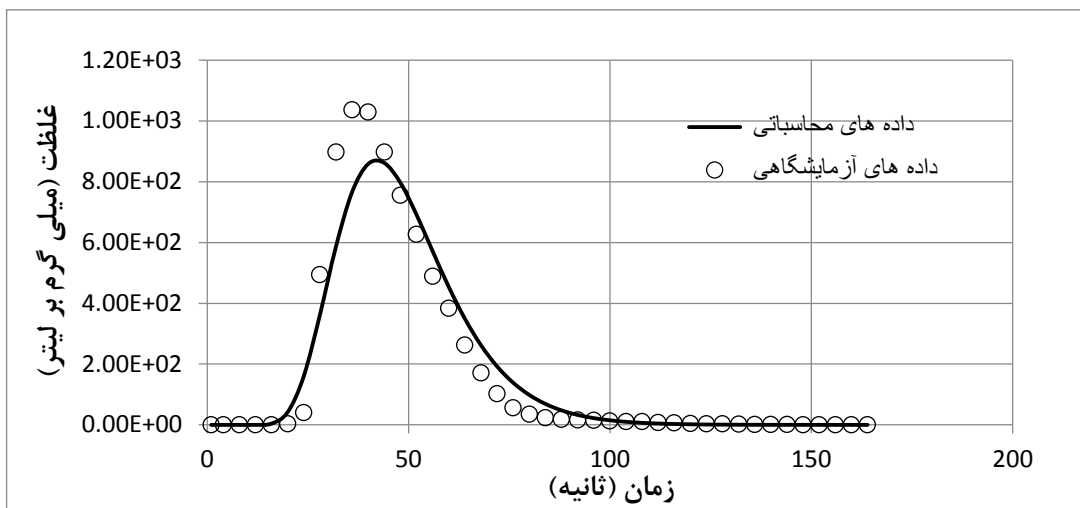
ردیف	قطر سنگدانه (cm)	دبی (L/s)	سرعت متوسط (m/s)	مساحت جریان (m <sup>2</sup> )	موقعیت سنسور (cm)	جرم نمک تزریق شده (gr)	جرم بازیابی شده (gr)	درصد بازیابی	ضریب انتشار طولی (m <sup>2</sup> /s)	قابلیت انتشارپذیری طولی (m)
۱	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۱۶۰۸۷	۰/۰۲۳	۳۶	۵	۲/۲۰۹	۴۴/۱۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۲۷
۲	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۲۴۶۶۷	۰/۰۱۵	۱۰۹	۵	۱/۰۷۳	۲۱/۴۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۵۲
۳	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۱۶۰۸۷	۰/۰۲۳	۳۶	۱۰	۵/۹۶	۵۹/۵۷	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۵۴
۴	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۲۴۶۶۷	۰/۰۱۵	۱۰۹	۱۰	۳/۸۹	۳۸/۹	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۸۵
۵	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۱۶۰۸۷	۰/۰۲۳	۳۶	۱۵	۹/۲۸۰	۶۱/۸۶	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۴۶
۶	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۲۴۶۶۷	۰/۰۱۵	۱۰۹	۱۵	۵/۹۸۳	۳۹/۸۸	۰/۰۰۱۳	۰/۰۵۲
۷	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۱۶۰۸۷	۰/۰۲۳	۳۶	۲۵	۱۷/۹۳۰	۷۱/۷۲	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۵۰
۸	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۲۴۶۶۷	۰/۰۱۵	۱۰۹	۲۵	۱۰/۹۷۰	۴۳/۸۸	۰/۰۰۱۳	۰/۰۵۲
۹	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۱۶۰۸۷	۰/۰۲۳	۳۶	۵۰	۴۸/۷۲۰	۹۷/۴۴	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۵۴
۱۰	۱/۱	۰/۳۷	۰/۰۲۴۶۶۷	۰/۰۱۵	۱۰۹	۵۰	۲۶/۰۵۰	۵۲/۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۵۶
۱۱	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۵	۱/۵۱۰	۳۰/۲	۰/۰۰۰۷۸	۰/۰۵۳
۱۲	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۲۲۲۲۲	۰/۰۱۱۷	۱۰۹	۵	۰/۸۷۶	۱۷/۵۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۷۲
۱۳	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۱۰	۴/۳۴۴	۴۳/۴۴	۰/۰۰۰۷۰	۰/۰۴۷
۱۴	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۲۲۲۲۲	۰/۰۱۱۷	۱۰۹	۱۰	۲/۹۸۲	۲۹/۸۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۵۴
۱۵	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۱۵	۷/۶۵۹	۵۱/۰۶	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۴۸
۱۶	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۲۲۲۲۲	۰/۰۱۱۷	۱۰۹	۱۵	۵/۳۷۵	۳۵/۸۳	۰/۰۰۱۱	۰/۰۴۹
۱۷	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۲۵	۱۷/۴۰۸	۶۹/۶۳	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۵۰
۱۸	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۲۲۲۲۲	۰/۰۱۱۷	۱۰۹	۲۵	۱۰/۵۸۱	۴۲/۳۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۵۴
۱۹	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۵۰	۴۶/۲۰۹	۹۲/۴۱	۰/۰۰۰۸۰	۰/۰۵۴
۲۰	۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۲۲۲۲۲	۰/۰۱۱۷	۱۰۹	۵۰	۲۷/۱۱۶	۵۴/۲۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۵۴

جدول ۲. ضرایب طولی بدست آمده از طریق روش گشتاورهای زمانی در شرایط مختلف آزمایشگاهی

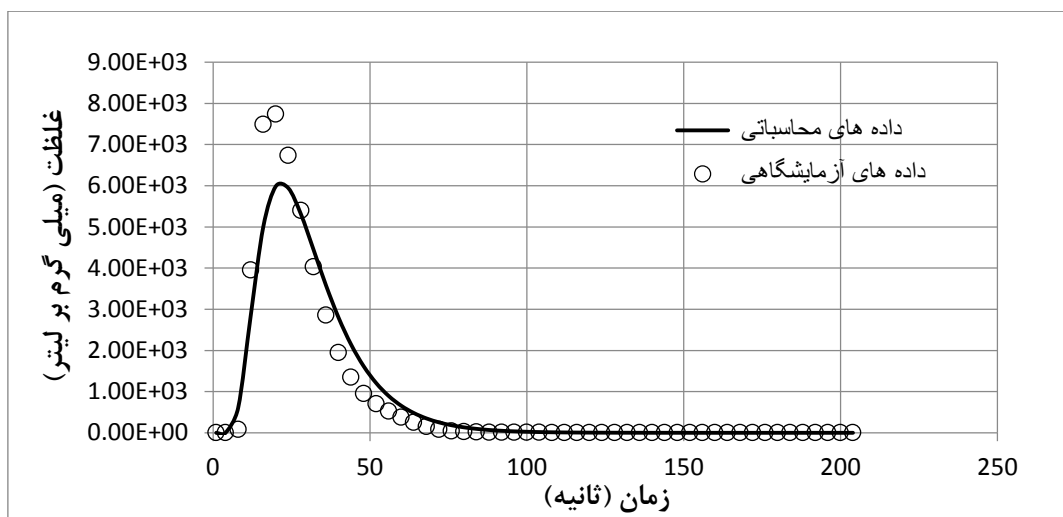
ردیف	قطر سنگدانه (cm)	دبی (L/s)	سرعت متوسط (m/s)	مساحت جریان (m <sup>2</sup> )	موقعیت سنسور (cm)	جرم نمک تزریق شده (gr)	جرم بازیابی شده (gr)	درصد بازیابی	ضریب انتشار طولی (m <sup>2</sup> /s)	قابلیت انتشارپذیری طولی (m)
۲۱	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۱۷۸۷۴	۰/۰۲۰۷	۳۶	۵	۱/۵۴۰	۳۰/۸	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۳۸
۲۲	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۲۷۴۰۷	۰/۰۱۳۵	۱۰۹	۵	۱/۱۰۳	۲۲/۰۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۵۸
۲۳	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۱۷۸۷۴	۰/۰۲۰۷	۳۶	۱۰	۴/۵۰۵	۴۵/۰۵	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۴۸
۲۴	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۲۷۴۰۷	۰/۰۱۳۵	۱۰۹	۱۰	۳/۵۹۵	۳۵/۹۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۴۳
۲۵	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۱۷۸۷۴	۰/۰۲۰۷	۳۶	۱۵	۷/۰۷۶	۴۷/۱۷	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۵۰
۲۶	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۲۷۴۰۷	۰/۰۱۳۵	۱۰۹	۱۵	۶/۳۰۵	۴۲/۰۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۴۷
۲۷	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۱۷۸۷۴	۰/۰۲۰۷	۳۶	۲۵	۱۴/۱۶۴	۵۶/۶۵	۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۴۴
۲۸	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۲۷۴۰۷	۰/۰۱۳۵	۱۰۹	۲۵	۱۱/۶۳۰	۴۶/۵۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۶
۲۹	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۱۷۸۷۴	۰/۰۲۰۷	۳۶	۵۰	۳۷/۰۱۵	۷۴/۰۳	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۵۰
۳۰	۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۲۷۴۰۷	۰/۰۱۳۵	۱۰۹	۵۰	۳۰/۱۳۵	۶۰/۲۷	۰/۰۰۱۲	۰/۰۴۳
۳۱	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۵	۱/۵۷۱	۳۱/۴۲	۰/۰۰۰۷۰	۰/۰۳۹
۳۲	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۲۲۸۰۷	۰/۰۱۱۴	۱۰۹	۵	۱/۷۲۳	۳۴/۴۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۶۵
۳۳	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۱۰	۴/۵۹۱	۴۵/۹۱	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۳۴
۳۴	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۲۲۸۰۷	۰/۰۱۱۴	۱۰۹	۱۰	۴/۳۳۸	۴۳/۳۸	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۳۰
۳۵	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۱۵	۷/۷۷۰	۵۱/۸	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۳۷
۳۶	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۲۲۸۰۷	۰/۰۱۱۴	۱۰۹	۱۵	۸/۳۱۹	۵۵/۴۶	۰/۰۰۳۸	۰/۱۳
۳۷	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۲۵	۱۷/۰۲۷	۶۸/۱۰۸	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۳۶
۳۸	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۲۲۸۰۷	۰/۰۱۱۴	۱۰۹	۲۵	۱۴/۲۵۵	۵۷/۰۲	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۳۵
۳۹	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۱۴۶۸۹	۰/۰۱۷۷	۳۶	۵۰	۴۶/۵۷۴	۹۳/۱۴	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۳۵
۴۰	۱/۵۸	۰/۲۶	۰/۰۲۲۸۰۷	۰/۰۱۱۴	۱۰۹	۵۰	۳۶/۸۲۰	۷۳/۶۴	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۶



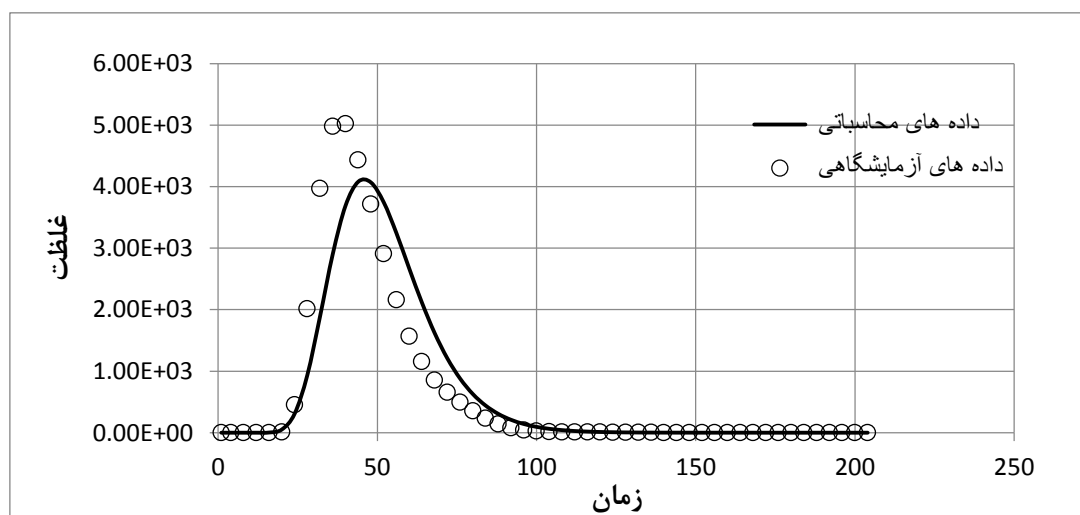
شکل ۱. نتایج داده‌های محاسباتی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای طول ۰/۴۶ متر و دبی ۰/۲۷ لیتر بر ثانیه، جرم تزریقی ۲۵ گرم و قطر سنگدانه ۱/۱ سانتی‌متر



شکل ۲. نتایج داده‌های محاسباتی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای طول ۱/۰۹ متر، دبی ۰/۳۷ لیتر بر ثانیه، جرم تزریقی ۲۵ گرم و قطر سنگدانه ۱/۱ سانتی‌متر



شکل ۳. نتایج داده‌های محاسباتی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای طول ۰/۳۶ متر، دبی ۰/۲۶ لیتر بر ثانیه، جرم تزریقی ۵۰ گرم و قطر سنگدانه ۱/۸ سانتی‌متر

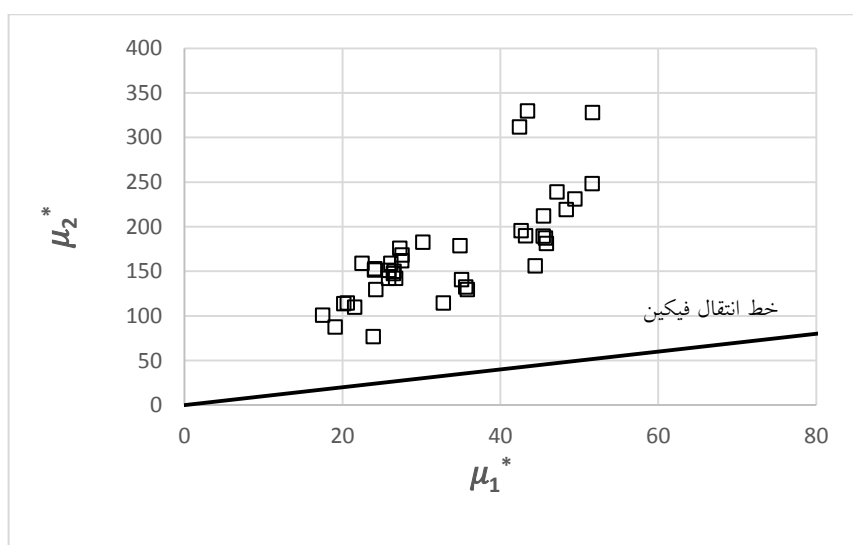


شکل ۴. نتایج داده‌های محاسباتی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای طول ۱/۰۹ متر، دبی ۰/۲۶ لیتر بر ثانیه، جرم تزریقی ۵۰ گرم و قطر سنگدانه ۱/۸ سانتی‌متر



گشتاور مرتبه دوم ترسیم گردد و نقاط بالاتر از خط ۴۵ درجه باشند، انتقال املاح غیرفیکتی می‌باشد. شکل (۵) نشان می‌دهد که نقاط مربوط به گشتاورهای بی‌بعد مرکزی محاسبه شده مطابق با رابطه (۱۰) بالاتر از خط تطابق (خط ۴۵ درجه) است و این امر انتقال غیر فیکتی را به اثبات می‌رساند.

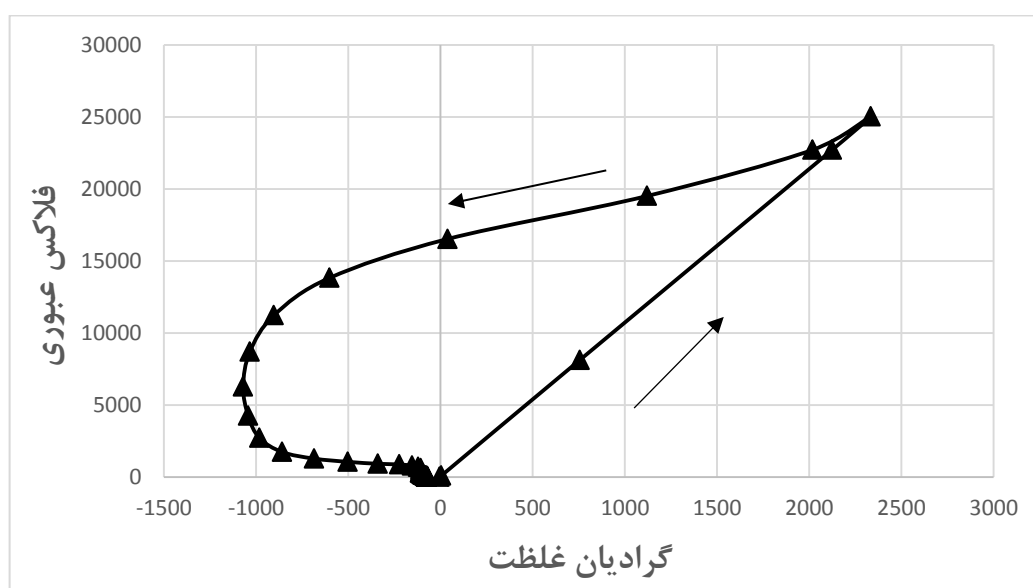
در حالت کلی، نتایج این تحقیق مبین این است که انتقال املاح از درون محیط‌های سنگدانه‌ای غیرفیکتی (Non-Fickian) است. از روش گشتاورگیری زمانی بدین منظور استفاده می‌شود که فیکتی بودن و یا غیرفیکتی بودن انتقال نیز تشخیص داده شود. در صورتی که گشتاور زمانی و مرکزی مرتبه اول در مقابل



شکل ۵. گشتاور مرکزی مرتبه اول در مقابل گشتاور مرکزی مرتبه دوم و خط ۴۵ درجه که مبین انتقال فیکین است

در این تحقیق برای آزمون نمودن نوع انتقال از درون محیط سنگدانه‌ای، نمونه‌ای از این منحنی نیز ترسیم شده و همان طوری که از روش گشتاورگیری زمانی نیز به اثبات رسید، نتایج مبین این نکته است که حلقه تشکیل شده نزدیک به یک خط صاف نیست و لذا انتقال از نوع غیر فیکتی می‌باشد.

یکی دیگر از روش‌های تشخیص اینکه انتقال از نوع فیکتی می‌باشد، استفاده از قانون اول فیک می‌باشد که در آن در صورتیکه گرادیان مکانی غلظت در مقابل فلاکس املاح عبوری ترسیم شده و نتیجه کار یک حلقه نزدیک به خط صاف باشد در این صورت می‌توان گفت که انتقال از نوع فیکتی است.



شکل ۶. گرادیان غلظت در مقابل فلاکس عبوری از محیط متخلخل

روابط (۱۹) تا (۲۲) استخراج گردید. با استفاده از رابطه (۱۷) و گشتاورهای مرکزی حول زمان متوسط ماندگاری، ضریب

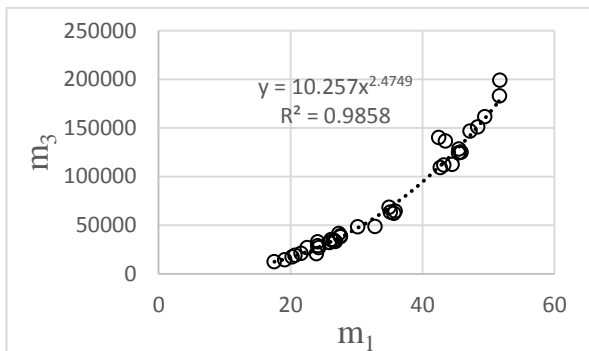
گشتاورهای نرمال شده مرتبه اول تا سوم نیز در مقابل یکدیگر ترسیم (شکل ۷) و روابط رگرسیونی آن‌ها مطابق با

محیط متخلخل به طور طبیعی  $x$  و  $u$  افزایش پیدا خواهند کرد، در نتیجه ضریب انتشار محیط متخلخل بایستی با شدت بیشتری نسبت به جریان‌های یکنواخت افزایش پیدا نماید. نتایج حاصله از این تحقیقات نیز مؤید این موضوع می‌باشد. با دقت در ضرایب انتشار استخراج شده نتیجه‌گیری می‌شود که حسگر دوم که در فاصله طولانی‌تری نسبت به حسگر اول قرار گرفته، دارای ضریب انتشار بزرگتری می‌باشد. با دقت در بحث بالا همچنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پارامترهای انتشار تا حدودی متأثر از ابعاد است. در صورتیکه ضریب چولگی صفر فرض گردد، در این صورت بازوهای بالارونده و پائین‌رونده منحنی‌های رخنه خروجی از محیط متخلخل کاملاً متقارن خواهد بود؛ ولی چون این گونه محیط‌ها کاملاً غیرهمگن هستند آلودگی‌های وارد شده به آن‌ها درون محیط ذخیره می‌شوند و به صورت موقت از آن خارج می‌گردند. این پدیده باعث ایجاد شیب بسیار ملایم در بازوی پائین‌رونده منحنی رخنه می‌شود و همین مورد دلیل ایجاد چولگی در منحنی است. قابل ذکر است که وجود چولگی در منحنی‌های رخنه استخراج شده از جریان‌های روباز معمولی همانند رودخانه‌ها نیز گزارش شده است ولی میزان آن در محیط‌های سنگ‌دانه‌ای بیشتر است.

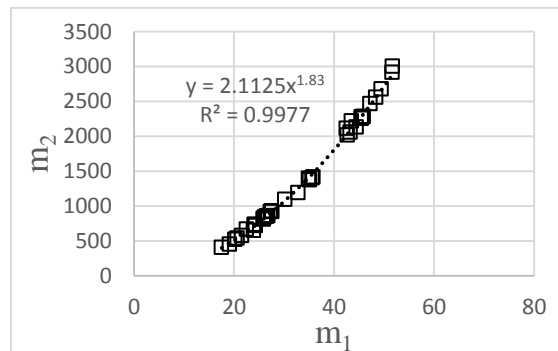
چولگی منحنی‌های رخنه برابر با  $2/18$  و با حدود اطمینان  $95\%$  (۱/۸۹-۲/۴۷) بدست آمد. با دقت در رابطه (۱۷) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در توزیع گوسین آلودگی، رابطه (۱۸) مابین ضریب چولگی و عدد پکلت که حاصل تقسیم قدرت انتقال به انتشار است وجود دارد.

$$CSK = \frac{3\sqrt{2}}{\sqrt{Pe}} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

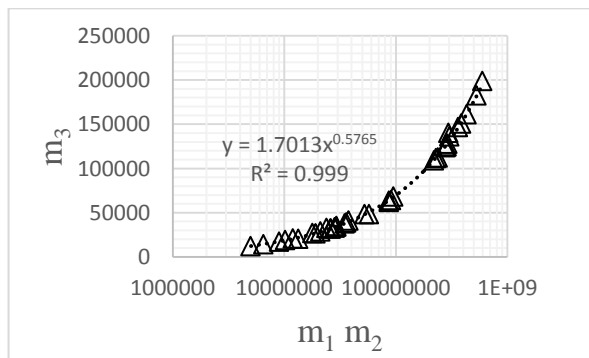
با توجه به رابطه عدد پکلت و با فرض یک مقدار ثابت برای ضریب چولگی، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در جریان‌های ماندگار در صورتیکه سرعت در طول ثابت بماند، کسر  $(\frac{x}{D})$  نیز باید ثابت باشد و به دلیل اینکه با افزایش طول، ناگزیر  $x$  افزایش پیدا خواهد کرد پس در نتیجه مقدار ضریب انتشار طولی نیز بایستی افزایش پیدا نماید تا نسبت ثابت کسر حفظ گردد. البته قابل ذکر است که پروفیل جریان مشاهده شده در این آزمایش‌ها از نوع M2 بود و با افزایش فاصله طولی به طور طبیعی اندازه سطح مقطع عبوری جریان نیز کاهش پیدا نموده و سرعت افزایش می‌یابد. با ثابت فرض نمودن ضریب چولگی در این آزمایش‌ها می‌توان گفت که کسر  $(\frac{xu}{D})$  که برابر با عدد پکلت است، نیز باید ثابت باشد و چون با حرکت در مسیر



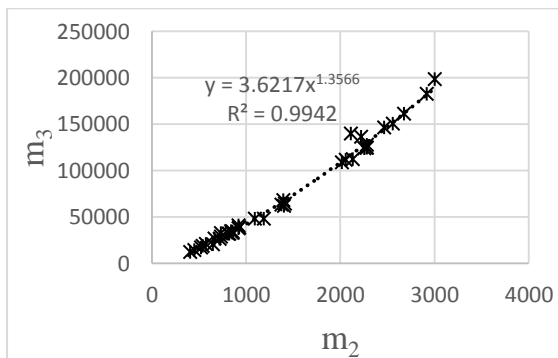
(ب)



(الف)



(ث)



(پ)

شکل ۷. الف) گشتاور مرتبه اول در مقابل گشتاور مرتبه دوم، ب) گشتاور مرتبه اول در مقابل گشتاور مرتبه سوم، پ) گشتاور مرتبه دوم در مقابل گشتاور مرتبه سوم و ث) گشتاور مرتبه سوم در مقابل حاصل ضرب گشتاورهای اول در دوم

$$RMSE = \frac{100}{m} \sqrt{\frac{1}{n} \sum (C_{exp} - C_{cal})^2} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (C_{exp} - C_{exp}^-)(C_{cal} - C_{cal}^-))^2}{\sum_{i=1}^n (C_{exp} - C_{exp}^-)^2 \sum_{i=1}^n (C_{cal} - C_{cal}^-)^2} \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n C_{exp} - \sum_{i=1}^n C_{cal}}{\sum_{i=1}^n C_{exp}} \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

در روابط فوق،  $C_{exp}$  و  $C_{cal}$  به ترتیب مربوط به مقادیر غلظت آزمایشگاهی و مقادیر برآورد شده است.  $C_{exp}^-$  و  $C_{cal}^-$  به ترتیب میانگین مقادیر آزمایشگاهی غلظت و مقادیر محاسباتی غلظت هستند. و  $n$  تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد.  $m$  نیز برابر میانگین داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

نتایج حاصل برای ارزیابی فاکتورهای مهم تأثیرگذار در تخمین ضرایب انتشار طولی در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه با استفاده از پارامترهای آماری میان داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی در جدول (۳) آورده شده است.

$$\ln(m_2) = 0.7478 + 1.83 \times \ln(m_1) \quad R^2 = 0.9977 \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$\ln(m_3) = 2.3279 + 2.474 \times \ln(m_1) \quad R^2 = 0.9858 \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$\ln(m_3) = 1.287 + 1.3566 \times \ln(m_2) \quad R^2 = 0.9942 \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$\ln(m_3) = 0.5314 + 0.5765 \times \ln(m_1 \times m_2) \quad R^2 = 0.999 \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

**پارامترهای آماری بررسی شده برای برآورد دقت منحنی‌های رخنه تحلیلی**

برای ارزیابی فاکتورهای مهم تأثیرگذار در تخمین ضرایب انتشار طولی در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی، از پارامترهای آماری شامل ریشه‌ی میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب باقی‌مانده‌ی جرمی ( $crm$ ) استفاده گردید (روابط ۲۳ تا ۲۵).

جدول ۳. پارامترهای آماری میان داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی

ردیف	جرم تزریقی	قطر متوسط محیط	$crm(2)$	$R^2(2)$	$RMSE(2)$ (ppm)	$crm(1)$	$R^2(1)$	$RMSE(1)$ (ppm)
۱	۵	۱/۸	۰/۰۰۱۲	۰/۵۴	۱۴۵/۵	-۰/۰۰۰۰۳	۰/۷۲	۱۳۳/۵۹
۲	۱۰	۱/۸	۰/۰۰۰۱	۰/۷۱	۱۱۷/۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۲	۷۴/۵۵
۳	۱۵	۱/۸	۰/۰۰۰۲	۰/۶۹	۱۲۶/۸	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۸۷	۸۵/۷۶
۴	۲۵	۱/۸	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۶۱	۱۱۰/۹	۰/۰۰۰۲	۰/۷۵	۹۵/۸۶
۵	۵۰	۱/۸	-۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۷۸	۹۳/۱۶	-۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۸۹	۷۵/۹۲
۶	۵	۱/۱	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۷۶	۹۳/۵۰	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۸۹	۷۷/۰۶
۷	۱۰	۱/۱	۰/۰۰۰۰۲۶	۰/۷۶	۱۱۶/۰۵	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۹۲	۷۵/۸۶
۸	۱۵	۱/۱	۰/۰۰۰۰۳۳	۰/۸۴	۷۴/۳۸	-۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۹۴	۵۲/۷۸
۹	۲۵	۱/۱	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۹۲	۵۳/۱۶	-۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۹۴	۵۴/۶۲
۱۰	۵۰	۱/۱	۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۹۲	۵۱/۲۴	-۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۹۴	۵۵/۶۳

حاکی از آن است که در محیط با قطر متوسط ۱/۱ سانتی‌متر و جرم تزریقی بالا، منحنی رخنه‌ی محاسباتی با استفاده از حل تحلیلی معادله کلاسیک و انتشار و با ضرایب انتشار حاصل از روش گشتاورگیری زمانی بدست آمده تطابق بهتری با منحنی رخنه‌ی آزمایشگاهی دارد.

### نتیجه‌گیری کلی

محیط‌های سنگدانه‌ای در سازه‌های مختلف هیدرولیکی اعم از سدهای سنگریزه‌ای و نهشته‌های طویل سنگی وجود دارند. لذا بررسی فرآیندهای انتقال و انتشار آلاینده‌ها در اینگونه محیط‌ها حائز اهمیت است. در این تحقیق با استفاده از برداشت

مطابق نتایج جدول (۳) در حسگر اول که در فاصله‌ی ۰/۳۶ متر از محل تزریق آلاینده قرار گرفته است، بهترین حالت تطابق در جرم‌های تزریقی ۱۵، ۲۵ و ۵۰ گرم و در محیط با قطر سنگدانه متوسط ۱/۱ سانتی‌متر رخ داده است که ضریب تعیین آن ( $R^2$ ) برابر با ۰/۹۴ و مقدار  $RMSE$  به ترتیب برابر با ۵۲/۷۸، ۵۴/۶۲ و ۵۵/۶۳ (ppm) می‌باشد. همچنین در محیط با قطر متوسط ۱/۸ سانتی‌متر بهترین برآورد در غلظت ۱۰ گرم با مقدار  $R^2$  و  $RMSE$  به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۵۵/۷ (ppm) است. در سنسور دوم که در فاصله‌ی ۱/۰۹ از محل تزریق قرار گرفته در جرم تزریقی برابر با ۵۰ گرم مقادیر  $R^2$  و  $RMSE$  به ترتیب ۰/۹۲ و ۵۱/۲۴ می‌باشد. نتایج ارائه شده در جدول (۳)

اطلاعات اضافی تری بر اساس گشتاورهای مرتبه اول تا سوم اعم از متوسط مدت زمان ماند درون محیط متخلخل، واریانس (که از روی آن ضریب انتشار معین می‌شود) و ضریب چولگی (که از روی آن وجود یا عدم وجود تقارن در منحنی‌های رخنه بررسی می‌شود) می‌باشد. به دلیل اینکه جریان‌های عبوری دارای عمق ثابتی از درون محیط نبودند، اطلاعات بدست آمده از گشتاور-های مرتبه مختلف، مقادیر متوسط و در عین حال دقیقی را در مورد پارامترهای انتقال و انتشار ارائه نمودند. در نهایت می‌توان گفت که با انجام این تحقیق، کارائی این روش برای بررسی جریان‌های غیرداری عبوری از محیط‌های متخلخل درشت‌دانه مورد اثبات قرار گرفت.

## REFERENCES

- Bear, J., (1972), Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier Sciencel, New York.
- Chabokpour, J., (2013), Investigation of the behavior of suspended sediment through coarse porous medium, Ph.D Thesis, Irrigation and reclamation department, University of Tehran, Iran. (In Farsi)
- Chabokpour, J., Amiri Tokaldany, E., Sedghi asl, M. (2016). Estimation of longitudinal dispersion coefficient of suspended sediments through the large porous media. Soil and water researches journal, 23(6):317-332. (In Farsi)
- Chanson, H., (2004), Environmental hydraulics of open channel flows, Frist Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- French, R. (1987). Open channel hydraulics, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Gonzalez-Pinz, R., Haggerty, R. and Dentz, M. (2013). Scaling and predicting solute transport processes in streams. Water resources research, 49, 4071-4088.
- Harvey, J. W. and K. E. Bencala, (1993). The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. Water resources research. 29(1), 89-98.
- Izadinia, E. and Abedi-Koupai, J., (2011), Investigation of Longitudinal Dispersion Coefficient in rivers. *Iran Water Resources Research*. 7(1):59-66. (In Farsi)
- Kashefipour, S. M. and Falconer, A. (2002). Longitudinal dispersion coefficients in Natural channels. *Water resources research*, 36, 1596-1608.
- Mahmoudian shoostari, M. (2008). Principles of flow in open channels. Shaid Chamran University Press.
- Pang, L., Goltz, M. and Close, M. (2003). Application of the method of temporal moments to interpret solute transport with sorption and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*. 60 (2003) 123-134.
- Parsaei A, and Haghiahi, A. H. (2015). Calculation of longitudinal dispersion coefficient and modeling the pollution transmission in rivers (Case studies in Severn and Narew Rivers). *Journal of Water and Soil*. 29(5):1070-1085. (In Farsi)
- Riahi-Madvar, H. and Ayyoubzadeh, S. A. (2007). Estimating Longitudinal Dispersion Coefficient of Pollutants Using daptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Isfahan Journal of Water and Wastewater*. 19(3):34-46. (In Farsi)
- Schmid, B. H. (2002). Persistence of skewness in longitudinal dispersion data: Can the dead zone model explain it after all?, *Journal of hydraulic engineering*. 128(9), 848-854.
- Sedghi Asl, M. (2010). Investigation of the Limits of the Dupuit Analogue for Steady Gradually Varied Flow through Course Porous Media. Ph.D. Thesis. Irrigation and reclamation department. University of Tehran. (In Farsi)
- Seo, I. W., and Baek, K. O. (2004). Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams. *Journal of hydraulic engineering*. 130(3): 227-236.
- Seo, I. W., and Cheong, T. S. (1998). Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of hydraulic engineering*. 124(1): 25-32.
- Soltangerdfaramarzi, S., Taghizade, R., Ghasemi, M., (2015), estimation of dispersion coefficient in rivers with different data mining methods. *Iranian water and soil research journal*. 46 (3): 385-394. (In Farsi)
- Taylor G. and Singh, V. P. (2005). Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural stream by artificial neural network. *Journal of hydraulic engineering*. 131 (11): 991-1000.