



دانشگاه تهران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره ششم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## برآورد ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه

جعفر چابک‌پور<sup>۱</sup>، \* ابراهیم امیری‌تکلدانی<sup>۲</sup> و محمد صدقی‌اصل<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، <sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران،

<sup>۳</sup> استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه یاسوج

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۴

### چکیده

**سابقه و هدف:** به دلیل این‌که رواناب خروجی از حوضه‌های آبریز همواره شامل مقدار زیادی از رسوبات ریزدانه و معلق می‌باشد کارایی سدهای سنگریزه‌ای که از مصالح سنگی درشت‌دانه ساخته می‌شوند برای تنظیم سیلاب‌های عبوری به مرور زمان و به دلیل ترسیب ذرات رسوبی در منافذ درشت‌دانه بدنه سد کاهش می‌یابد. به دلیل این‌که بخشی از سازه‌های ساخته شده با استفاده از مصالح سنگی درشت‌دانه جریان‌های حاوی رسوبات معلق را از خود عبور می‌دهند بنابراین فرایند ردیابی این نوع جریان‌ها از درون محیط‌های متخلخل مورد توجه قرار گرفته است. بررسی فرایند انتقال و انتشار رسوبات معلق از درون محیط‌های درشت‌دانه معمولاً با استفاده منحنی‌های رخنه انجام می‌گردد. این فرایند بیش‌تر برای آلودگی‌ها و در رودخانه‌ها، مجاری فاضلاب‌رو و محیط‌های متخلخل ریزدانه متداول بوده و پژوهشگران قبلی از تکنیک‌های زیادی از جمله حل تحلیلی، تکنیک تخمین پارامتر و روش‌های عددی برای مسائل فوق‌الذکر استفاده نموده‌اند ولی هنوز در رابطه با رسوبات معلق پژوهش متقنی انجام نشده است. منحنی‌های رخنه خروجی از محیط متخلخل در بسیاری از مواقع متقارن نبوده و دارای چولگی می‌باشد بنابراین تعدادی از پژوهشگران پس از برداشت داده‌های صحرائی پی به این مسأله برده و مدل جدیدتری را تحت عنوان مدل ذخیره موقت ارائه نمودند. بعضی از پژوهشگران با در نظر گرفتن مسأله عدم تقارن در منحنی‌های رخنه خروجی اقدام به ترکیب رابطه مرتبه اول تبادل جرم با معادلات انتقال و انتشار نموده و با اعمال شرایط اولیه و مرزی متنوع حل‌های تحلیلی خاصی را استخراج نموده‌اند. نکته مهم در این خصوص این است که در شرایط مشابهی از شرایط اولیه و مرزی می‌بایستی اقدام به استفاده از حل‌های تحلیلی نمود. به همین دلیل در بسیاری از موارد پژوهشگران اقدام به استفاده از روش‌های گشتاورهای زمانی و مکانی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده می‌نمایند. با تاکید بر موارد اشاره شده و نیز با توجه به این‌که تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی منسجم و کاملی در زمینه مطالعه رفتار رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه انجام نشده است در این پژوهش در این زمینه تمرکز گردید.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش با ساخت نمونه آزمایشگاهی از محیط متخلخل درشت‌دانه و استفاده از رسوبات ریزدانه در محدوده بار معلق سعی شد تا یک سری داده آزمایشگاهی به‌منظور ردیابی فرایند انتقال و انتشار طولی

\* مسئول مکاتبه: [amiri@ut.ac.ir](mailto:amiri@ut.ac.ir)

رسوبات معلق برداشت شود. در این پژوهش با انتخاب دو قطر سنگدانه، چهار دبی درون‌گذر، و با اعمال گرادیان‌های متفاوت بر روی محیط، منحنی‌های رخنه رسوبات معلق خروجی از بدنه سازه‌های سنگریزه‌ای استخراج گردید. روش استخراج منحنی‌های رخنه به‌صورت برداشت نمونه آب از انتهای محیط بوده و پس از رد نمودن از کاغذ صافی و خشک کردن رسوبات، منحنی‌های غلظت زمان استخراج گردید. همچنین با استفاده از تکنیک تخمین پارامتر برای معادله کلاسیک انتقال- انتشار و نیز روش گشتاورگیری زمانی ضریب انتشار طولی رسوبات معلق استخراج شد.

**یافته‌ها:** نتایج به‌دست آمده نشان داد که به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی منحنی رخنه خروجی از درون بدنه سنگدانه‌ای، روش گشتاورگیری زمانی دارای دقت بهتری نسبت به معادله کلاسیک انتقال- انتشار بوده و همچنین با استفاده از روش پارامترهای ابعادی یک رابطه برای تخمین ضریب انتشار طولی به‌دست آمد که متوسط خطای نسبی آن برای تخمین ضریب انتشار ۳۰ درصد می‌باشد و این مقدار در پژوهش‌های رسوبی قابل اطمینان می‌باشد. نتایج مربوط به آنالیز منحنی‌های رخنه خروجی از محیط متخلخل نیز نشان داد که منحنی‌های رخنه خروجی از محیط دارای دو بال صعودی و نزولی نامتقارن بوده که این به‌دلیل ذخیره موقت رسوبات درون محیط متخلخل درشت‌دانه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مصالح سنگریزه‌ای، رسوبات معلق، ضریب انتشار طولی، معادله کلاسیک انتقال- انتشار، گشتاورهای زمانی

## مقدمه

سدهای سنگریزه‌ای به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاص، به‌عنوان یکی از سازه‌های مفید به‌منظور کنترل رقوم کف رودخانه و نیز تنظیم دبی جریان در شرایط وقوع سیلاب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مصالح اصلی برای احداث این سدها، مصالح درشت‌دانه سنگی است که به‌دلیل دسترسی آسان و قیمت کم در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی احداث شده در داخل رودخانه، به طرق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که کارایی سدهای سنگریزه‌ای در تنظیم سیلاب‌های عبوری، به مرور زمان و به‌دلیل رسوب ذرات بار معلق و بستر در منافذ درشت‌دانه این نوع سدها کاهش می‌یابد و از طرف دیگر به‌دلیل این‌که رواناب خروجی از حوضه‌های آبریز همواره شامل مقدار زیادی از رسوبات ریزدانه و معلق می‌باشد در نتیجه لازم است تمهیداتی به‌منظور جلوگیری از ترسیب ذرات بار معلق و بار بستر در منافذ این سازه‌ها در نظر گرفته شود. در این راستا

لازم است مشخصه‌های نفوذ و ترسیب ذرات در داخل منافذ از جمله مقدار پخشیدگی مورد مطالعه قرار گیرد. اندازه‌گیری میزان پخشیدگی درون محیط‌های متخلخل به‌طور عام و سدهای سنگریزه‌ای به‌طور خاص از دیدگاه کمی و معادله‌های حاکم شبیه پدیده انتقال جرم در داخل رودخانه می‌باشد (۲). مهندسان هیدرولیک در بررسی فرایند اختلاط و انتقال آلودگی در رودخانه‌ها از دیرباز از دو واژه پخشیدگی مولکولی<sup>۱</sup> و پخشیدگی حاصل از گرادیان سرعت<sup>۲</sup> استفاده می‌نمایند. پخشیدگی مولکولی به‌دلیل اختلاف غلظت و بر اثر حرکت اتفاقی مولکول‌ها حاصل می‌شود ولی پخشیدگی نوع دوم حاصل از تنش و اختلاف سرعت در لایه‌های مختلف جریان می‌باشد. علاوه بر موارد مذکور در صورتی که دو پدیده فوق (انتقال به‌وسیله سرعت متوسط و حاکم جریان و انتشار توسط موارد مذکور) با مسائل هیدرودینامیکی

1- Diffusion  
2- Dispersion

در صورتی که ضرایب پخشیدگی در جهت‌های مختلف متفاوت باشد، رابطه ۳ را می‌توان به فرم رابطه ۴ نوشت (فرنچ، ۱۹۸۷):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

برای رابطه ۴ در شرایط مختلف اولیه و مرزی جواب‌های متفاوتی وجود دارد. این رابطه در بسیاری از حالت‌ها (شرایط اولیه و مرزی مختلف) دارای حل تحلیلی می‌باشد. اگر در ابتدای گام زمانی جرم ثابتی  $(M)$  به صورت آنی در ابتدای بازه رها گردد. 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 مذکور به صورت رابطه ۵ ارائه شده است (۳).

$$c(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4Dt}} e^{-(x-vt)^2/4Dt} \quad (5)$$

رابطه ۵ به عنوان رابطه قوسی معروف بوده و در صورتی که جرم توزیعی زیر نمودار برابر با یک باشد منحنی نرمال نامیده می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های محاسبه ضریب انتشار رسوبات درون محیط‌های متخلخل، استفاده از روش گشتاورهای زمانی<sup>۱</sup> و مکانی<sup>۲</sup> بر روی منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی برداشت شده می‌باشد که در زیر به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. رابطه کلی برای محاسبه گشتاور مکانی مرتبه  $n$  ام به صورت رابطه ۶ نوشته می‌شود (۵):

همانند عدم پایداری مؤلفه‌های جریان و نوسان آن‌ها حول یک مقدار متوسط در طول زمان و ابعاد مختلف، ترکیب شوند پیچیدگی حاصل بیش‌تر می‌گردد. علاوه بر تشابه پدیده‌های انتقال و انتشار در محیط‌های متخلخل و رودخانه‌ها، معادله‌های حاکم بر جریان در محیط‌های متخلخل نیز شبیه رسوبات معلق، پیچیدگی مسأله دوچندان می‌شود (۴). در صورتی که دو فرآیند انتقال و پخشیدگی به صورت هم‌زمان در جریان وجود داشته باشند، اثر هم‌زمان پدیده‌های انتقال و انتشار به صورت دو عامل مجزا و هم افزا در نظر گرفته شده و طبق قانون اول فیک نرخ زمانی انتقال جرم مطابق رابطه ۱ است (۵).

$$\dot{m} = vc + \left( -D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

که در آن،  $v$  سرعت متوسط و حاکم در جریان،  $c$  غلظت آلودگی و  $D$  ضریب پخشیدگی می‌باشد. ترم اول این معادله معرف شار انتقال و ترم دوم آن معرف شار پخشیدگی است. پس از اعمال قانون اول فیک، رابطه ۱ در حالت یک‌بعدی به فرم رابطه ۲ نوشته می‌شود:

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

برای یک جریان سه‌بعدی، معادله کلاسیک انتقال و پخشیدگی که ADE نامیده می‌گردد به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

1- Temporal Moments

2- Spatial Moments

که در آن‌ها،  $D$  ضریب انتشار طولی،  $\bar{u}$  سرعت متوسط جریان و  $\bar{t}_1$  و  $\bar{t}_2$  مراکز زمانی منحنی‌های رخنه می‌باشند. برای محاسبه واریانس منحنی‌های رخنه در روش گشتاورهای زمانی از روی منحنی رخنه نیز از رابطه ۱۳ استفاده شد.

مرسوم است که برای محاسبه مرکز زمانی منحنی‌های رخنه نیز از رابطه ۱۴ استفاده شود (۶):

$$\bar{t}_1 = \frac{\int_0^{\infty} ct dt}{\int_0^{\infty} c dt} \quad (14)$$

مزیت این روش در آن است که تنها به دو منحنی رخنه در طول محیط متخلخل نیاز داشته و لزومی به دانستن شرایط محیطی و جریانی داخل محیط نمی‌باشد. در این پژوهش از طریق رابطه ۱۲ و منحنی‌های رخنه برداشتی از طریق آزمایش‌های انجام شده بر روی رسوبات معلق اقدام به برآورد میزان ضریب انتشار طولی محیط متخلخل گردید و خلاصه نتایج به دست آمده به همراه اطلاعات مربوط به آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

هارلمن و رومر (۱۹۶۳) در مورد ضریب پخشیدگی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار با استفاده از معادله‌های ناویر استوکس پژوهش‌هایی انجام داده و یک رابطه هم‌بستگی میان ضریب پخشیدگی طولی و سرعت نشت جریان درون محیط‌های متخلخل ارائه نمودند (۶).

بانکس و علی (۱۹۶۴) پدیده‌های پخش و جذب در جریان درون محیط‌های متخلخل را با استفاده از روش تحلیلی مورد بررسی قرار داده و به کمک داده‌های آزمایشگاهی اقدام به واسنجی روابط ارائه شده نمودند (۱). شامیر و هارلمن (۱۹۶۷) اقدام به بررسی پدیده پخشیدگی درون محیط‌های متخلخل لایه‌ای با ارائه یک روش تحلیلی نموده و مشابه

$$M_n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n c(x, t) dx \quad (6)$$

و به همین صورت گشتاور مرتبه صفرام نیز عبارت است از:

$$M_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} c(x, t) dx \quad (7)$$

میانگین و یا واریانس معادله توزیع نرمال و یا قوسی نیز از طریق گشتاورهای مکانی به صورت رابطه‌های ۷ و ۸ ارائه شده است (فرنچ، ۱۹۸۷):

$$\mu = \frac{M_1}{M_0} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{M_2}{M_0} - \mu^2 \quad (8)$$

که در آن‌ها،  $\mu$  میانگین و  $\sigma^2$  واریانس توزیع می‌باشد. در صورتی که توزیع نرمال باشد می‌توان آن‌ها را به صورت رابطه‌های ۹ و ۱۰ نوشت:

$$\mu = 0 \quad (9)$$

$$\sigma^2 = 2Dt \quad (10)$$

در مسائل کاربردی نیز معمولاً ضریب پخشیدگی محیط متخلخل از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$\frac{d\sigma^2}{dt} = D \quad (11)$$

و رابطه ۱۲ نیز حالت گسسته رابطه ۱۱ می‌باشد.

$$D = \frac{\bar{u}^2}{2} * \left( \frac{\sigma_{t2}^2 - \sigma_{t1}^2}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum c_i t_i^2}{\sum c_i} - \frac{\sum (c_i t_i)^2}{\sum c_i} \quad (13)$$

ریکرمن و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از داده‌های ردیابی به‌دست آمده از ۶۰ آزمایش انجام شده در اروپا و آمریکا مقایسه‌ای مابین روش‌های مختلف برآورد ضریب پخشیدگی در مجاری فاضلاب انجام دادند (۹).

دی‌اسمت و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از رابطه کلی انتقال-انتشار و با ترکیب آن با رابطه مرتبه اول تبادل جرم بین مناطق ذخیره‌ای و جریان اصلی اقدام به حل تحلیلی معادله ذخیره‌ای نمود. معادله‌های ترکیبی در پژوهش‌های ایشان برای حالت تزریق آبی جرم در داخل جریان یکنواخت و ماندگار انجام گردید و در نهایت معادله‌های حل شده قابلیت به‌دست آوردن منحنی‌های رخنه در فواصل و زمان‌های مختلف را حاصل نمود (۴).

صدقی‌اصل (۲۰۱۰) با انجام یک سری آزمایش به بررسی ضرایب انتشار طولی محیط‌های متخلخل درشت‌دانه در یک محیط متخلخل طولی نمود و با استفاده از روش‌های گشتاورهای زمانی و مکانی اقدام به محاسبه ضریب انتشار طولی نمود. وی نتایج داده‌های آزمایشگاهی را نیز با حل عددی معادله انتقال-انتشار مقایسه نمود (۱۲). با توجه به مطالعه‌های انجام شده می‌توان گفت که در مورد فرایند انتقال و انتشار آلودگی‌ها در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه تا کنون پژوهش‌های زیادی صورت گرفته ولی در مورد ضرایب انتشار محیط‌های متخلخل برای رسوبات معلق که از بسیاری جهات مشابه آلودگی عمل می‌کنند تاکنون مطالعه خاصی صورت نگرفته است.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۳ و در آزمایشگاه هیدرولیک و هیدرولیک رسوب گروه مهندسی آبیاری دانشگاه تهران انجام شد. در پژوهش حاضر برای

بانکس و علی، یک رابطه هم‌بستگی میان پخشیدگی و نفوذپذیری با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی ارائه نمودند (۱۳).

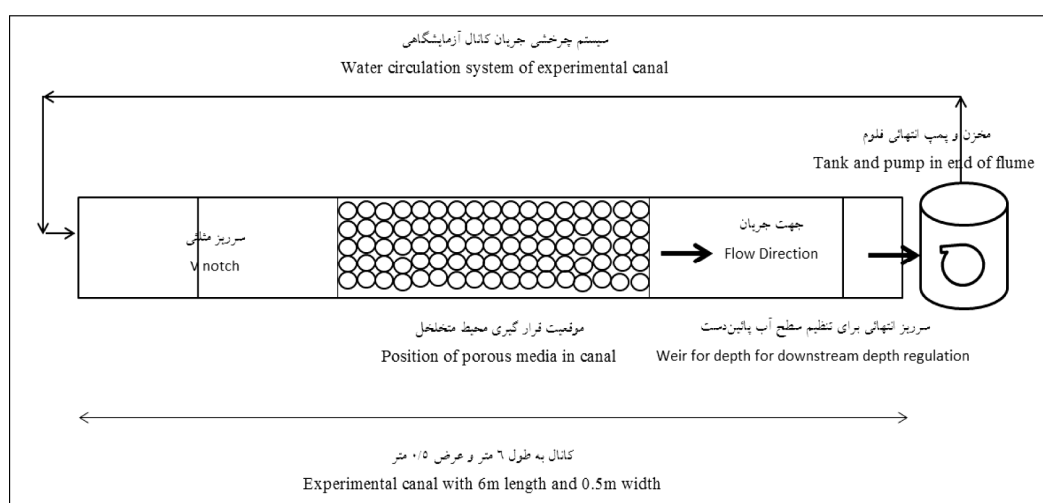
کوسیس و همکاران (۱۹۸۳) اقدام به مطالعه در خصوص روندیابی آلاینده‌ها در جریان‌های سطحی براساس شبیه‌سازی عددی پخشیدگی طولی آلاینده‌ها با فرض جریان یک‌بعدی و معادله انتقال-انتشار خطی با استفاده از مفاهیم پخشیدگی عددی و الگوبرداری از روندیابی سیلاب ماسکینگام نموده و با استفاده از داده‌های صحرائی مدل خود را واسنجی نمودند (۸).

هانت (۱۹۹۹) برای تحلیل پدیده پخشیدگی جریان در رودخانه‌های کوهستانی، یک مدل تحلیلی ارائه نمود (۷). سینگ (۲۰۰۲) ضریب پخشیدگی و تخلخل محیط متخلخل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تولید شده در پرمئامتر را به‌دست آورد (۱۴).

اشمید (۱۹۹۵) و (۲۰۰۳)، بر اساس پژوهش‌های صحرائی وجود چولگی زمانی بر روی منحنی‌های رخنه حاصل از انتقال و پخشیدگی آلودگی را در رودخانه‌ها گزارش کرد که مدل‌های پیشرفته‌تری نسبت به مدل‌های انتقال آلودگی در رودخانه‌ها را تحت عنوان مدل‌های ذخیره‌ای<sup>۱</sup> را مطرح می‌نمودند. وی در پژوهش‌های خود روابطی را که تحت آن‌ها چولگی منحنی رخنه برای انتقال آلودگی در جریان، به‌صورت ثابت و یا متغیر با زمان تغییر می‌نمود، مورد بررسی قرار داد و نتیجه‌گیری کرد که تغییر شرایط هیدرولیکی جریان در طول رودخانه در محل تقاطع با شاخه‌های دیگر عامل اساسی برای ایجاد چولگی ثابت و یا متغیر با زمان در منحنی رخنه آلودگی عبوری می‌باشد (۱۰، ۱۱).

تزریق می‌شد. تعداد کل آزمایش‌های انجام شده و متغیرهای در نظر گرفته شده برای آن‌ها و همچنین داده‌های جمع آوری شده از پژوهش‌های پیشین و شرایط انجام آن‌ها به تفصیل در ادامه بیان شده است. مدل آزمایشگاهی به کار رفته در انجام آزمایش‌ها: در شکل ۱ نمای کلی فلوم و تجهیزات استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.

جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، از یک فلوم آزمایشگاهی شیب‌پذیر به عرض ۰/۵، طول ۶ و ارتفاع ۰/۶۵ متر استفاده گردید. سیستم جریان ورودی به داخل فلوم به صورت جریان صاف یک‌طرفه بود که از یک منبع هوایی تامین شده و رسوبات معلق پس از اندازه‌گیری جرم و رقیق شدن در داخل ظرفی با حجم سه لیتر و سپس هم زده شدن و به دست آوردن غلظت یکنواخت، به طور آبی در بالادست فلوم آزمایشگاهی



شکل ۱- نمای عمومی از فلوم به کار رفته در انجام آزمایش‌ها.

Figure 1. Schematic of the flume which was used in the experiments.

به وسیله تکنسین‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. بدین صورت که هم‌زمان با شروع تزریق رسوبات، زمان صفر آزمایش ثبت شده و در فواصل زمانی یکسان اقدام به برداشت نمونه از پائین دست سازه سنگریزه‌ای می‌شد. حجم نمونه‌های برداشتی در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌لیتر متغیر بود و از طریق درصد بازیابی رسوبات نیز درصد رسوبات تله‌اندازی شده در محیط متخلخل محاسبه گردید همچنین فاصله زمانی برداشت نمونه‌های رسوبی در حدود ۴ ثانیه بود.

رسوبات معلق از نقطه‌ای بلافاصله در بالادست محیط متخلخل به طور یکنواخت در عرض فلوم به درون محیط متخلخل تزریق می‌شد (شکل ۲). به منظور جلوگیری از لخته شدن و ترسیب رسوبات در لحظه ورود به جریان آب، قبل از تزریق، آن‌ها در یک ظرف سه لیتری با آب مخلوط شده و مقداری به هم زده می‌شد تا یک مخلوط با غلظت یکنواخت برای تزریق تهیه گردد. این عمل باعث می‌شد که کم‌ترین ترسیب در بالادست ایجاد شود. برداشت نمونه‌های غلظت نیز از مقطع پائین دست محیط متخلخل توسط بشرهای پلاستیکی و با حالت دستی



شکل ۲- محل تزریق رسوبات معلق به درون محیط.

Figure 2. Position of sediment injection to the porous media.

سانتی متر در نظر گرفته شد. در طی آزمایش ارتفاع محیط متخلخل طوری تنظیم گردیده بود که جریان عبوری به طور کامل به صورت جریان درون گذر از محیط باشد. چهار دبی ۱/۳۶، ۲/۰۴، ۲/۸۳ و ۳/۴۹ لیتر بر ثانیه که در هر قطر سنگدانه و طول محیط، گرادیان‌های مختلفی را تولید می‌نمودند در نظر گرفته شد. سه جرم مختلف از رسوبات معلق که در محدوده بار شسته<sup>۱</sup> (کم تر از ۵۰ میکرون) قرار داشتند نیز به ترتیب برابر با ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ گرم برای بررسی تأثیر غلظت در میزان ضریب انتشار محیط متخلخل برای تزریق به داخل محیط به کار گرفته شد. و نمونه‌های برداشت شده مربوط به مقطع خروجی از محیط متخلخل می‌باشند

### نتایج و بحث

برآورد میزان ضرایب انتشار با استفاده از روش معادله کلاسیک انتقال- انتشار: در این پژوهش از رابطه ۵ برای برآورد میزان ضریب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه استفاده شد. به منظور ترسیم نمودارهای مربوطه، از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Mathcad نمودارها

به دلیل این‌که فرآیند خارج ساختن ذرات معلق از درون نمونه برداشت شده زمان بر می‌باشد و لازم بود که ابتدا نمونه برای چندین ساعت به صورت آرام قرار گرفته و سپس با استفاده از کاغذ صافی مناسب که قادر به تله‌اندازی تمام ذرات معلق نمونه باشد، اقدام به جداسازی ذرات شود، بنابراین در این پژوهش از ترکیب دستگاه پمپ خلا و قیف بوختر استفاده شد. بدین صورت که با قرار دادن کاغذ صافی در کف قیف بوختر و روشن نمودن پمپ خلا اقدام به ریزش نمونه بر روی کاغذ صافی شده و سپس با ایجاد مکش در کف قیف به دلیل چسبیدن کاغذ به آن در حالت مرطوب خود، آب نمونه از ذرات رسوبی جداسازی شد. در مرحله بعد نمونه‌ها به ترتیب بر روی طبقات آون ۱۰۵ درجه قرار گرفته و پس از خشک شدن کامل از آون بیرون آورده شده و با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن می‌شدند.

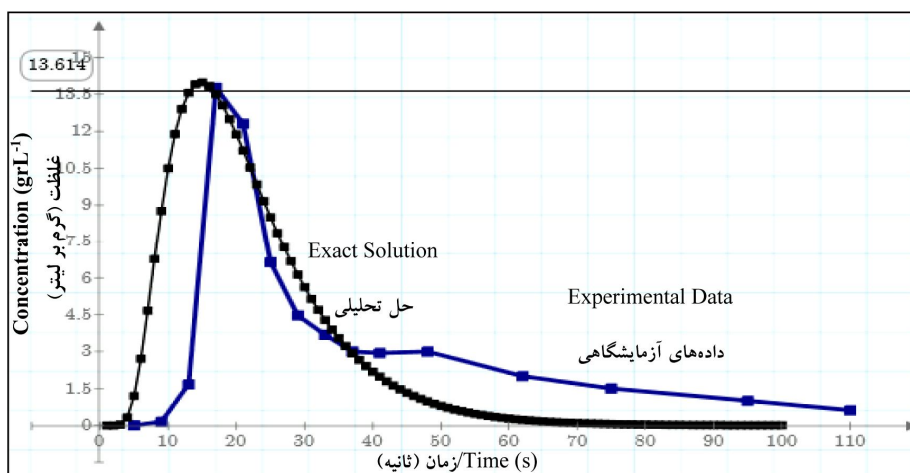
متغیرهای به کار رفته در انجام آزمایش‌ها: در انجام این پژوهش از دو قطر سنگدانه رودخانه‌ای شکسته شده با اندازه متوسط ۱۶ و ۳۰ میلی‌متر که با استفاده از الک تهیه گردیده و تخلخل آن‌ها به ترتیب ۴۳ و ۴۷ درصد بود، استفاده گردید. به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی نیز طول محیط متخلخل ۱۰۰ و ۱۹۳

1- Wash Load

افزایشی و یا کاهش‌ی دارای اوج‌های فرعی بر روی منحنی رخنه باشد. این موضوع به این دلیل است که رسوبات در مسیر عبور خود از درون منافذ محیط متخلخل بعضی مواقع در منافذ بین محیط گیر نموده و یا مجبور به پیمایش مسیر طولانی‌تری می‌گردند بنابراین نوعی خاصیت احتمالاتی نیز در پیمایش مسیر بین منافذ وجود دارد.

در جدول ۱ ضرایب انتشار طولی و قابلیت انتشارپذیری رسوبات معلق  $\delta = D/v_{ave}$  متخلخل که بر اساس حل معادله کلاسیک انتقال و انتشار حاصل گردیده است، برای تمامی آزمایش‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل این که در آزمایش‌های انجام شده در طول محیط متخلخل عمق جریان متفاوت بوده و عملاً به جای عمق ثابت جریان پروفیل جریان وجود دارد، بنابراین سرعت متوسط وارد شده در حل معادله انتقال-انتشار از طریق تقسیم طول محیط به مدت زمان اوج منحنی رخنه برداشت شده از آزمایش‌ها محاسبه گردید.

ترسیم گردیدند. در شکل ۳ نمونه‌ای از این نمودارها ارائه شده است. همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود با این که حل معادله کلاسیک ADE (Advection-Dispersion Equation) قادر است به خوبی نقطه اوج منحنی رخنه<sup>۱</sup> ترسیمی را مدل‌سازی نماید ولی در مدل‌سازی ابتدا و انتهای منحنی غلظت برداشت شده پس از محیط متخلخل، به دلیل وجود تاخیر در آزادسازی رسوبات معلق عبوری از درون محیط متخلخل، دارای خطا می‌باشد. به عبارت دیگر از آنجا که رسوبات معلق عبوری از درون محیط متخلخل درشت‌دانه به صورت موقت درون محیط ذخیره‌سازی شده و پس از طی مدت زمانی با تاخیر از محیط متخلخل خارج می‌شدند بنابراین منحنی‌های برداشت شده دارای بازوی بالارونده با شیب بسیار زیاد بوده ولی دارای شیب بسیار ملایم در بازوی پائین‌رونده می‌باشند. علاوه بر این، انتقال رسوبات معلق از درون این محیط‌ها دارای خاصیت تصادفی نیز می‌باشد به این صورت که ممکن است در طول زمان بر خلاف روند



شکل ۳- نمونه‌ای از نمودارهای رخنه برای داده‌های آزمایشگاهی در مقابل حل تحلیلی معادله (ADE).

خط آبی داده‌های آزمایشگاهی و خط سیاه داده‌های حل تحلیلی بوده و همچنین محور افقی زمان بر حسب ثانیه و محور عمودی غلظت بر حسب گرم بر لیتر می‌باشد).

Figure 3. A sample of breakthrough curve for experimental data versus exact solution of ADE equation (blue line is showing experimental data and black line is illustrating exact solution, horizontal axis is in term of second (s) and the vertical axis is concentration (gr/L)).

- 1- Break Through
- 2- Dispersivity



نتایج نشان می‌دهند که مشخصه‌های جریان در داخل محیط متخلخل درشت‌دانه با تغییر شرایط آزمایش‌ها به‌طور معناداری تغییر نموده و ضرایب انتشار متفاوتی به‌دست آمده است. از جمله عوامل بسیار مؤثر در این خصوص سرعت جریان داخل منافذ محیط می‌باشد. به‌دلیل این‌که جریان عبوری از این محیط‌ها عمق یکنواختی ندارد بنابراین سرعتی که برای انجام محاسبات در نظر گرفته شد حاصل تقسیم طول محیط بر مدت زمان اوج منحنی رخنه خروجی از محیط متخلخل می‌باشد. با این روش می‌توان سرعت متوسطی را به‌دست آورد که علاوه بر در نظر گرفتن پیچیدگی‌های مسیرهای جریان درون سنگدانه‌ها که مبهم می‌باشد از خطاهای حاصل از به‌کارگیری رابطه پیوستگی می‌کاهد. بنابراین استفاده از روش ردیابی نسبت به روش پیوستگی از خطای کم‌تری برخوردار می‌باشد زیرا در داخل محیط متخلخل اندازه ذرات، فاکتور شکل و آرایش منافذ در میزان سرعت متوسط تأثیرگذار می‌باشد و به‌دلیل عبور جریان از درون محیط متخلخل، همه عوامل اثر خود را بر روند انتقال اعمال نموده و اثر آن‌ها بر مقدار سرعت انتقالی ظاهر می‌شود. در صورتی که در رابطه پیوستگی تنها پارامتر تأثیرگذار در محاسبه سرعت متوسط، تخلخل می‌باشد.

با افزایش دبی و در نتیجه افزایش گرادیان هیدرولیکی اعمال شده بر روی محیط سنگدانه‌ای، سرعت منفذی جریان افزایش یافته و ضریب انتشار محیط متخلخل نیز افزایش می‌یابد. تغییر قطر سنگدانه‌ها نیز باعث تغییر در میزان تخلخل محیط گردیده و لوله‌های جریان با قطرهای مختلفی حاصل می‌شود. به همین دلیل با افزایش قطر سنگدانه نیز ضریب انتشار محیط افزایش می‌یابد. افزایش طول محیط متخلخل اگر هم‌زمان با افزایش گرادیان

هیدرولیکی باشد (به این معنی که در یک دبی یکسان سرعت‌های منفذی یکسانی در دو محیط با طول‌های مختلف ایجاد شود) باعث افزایش ضریب انتشار محیط می‌گردد. ولی اگر دبی یکسانی بر روی دو محیط با قطر سنگدانه‌های یکسان و طول متفاوت اعمال شود به‌دلیل این‌که افزایش طول باعث افزایش زبری معادل کل محیط شده و سرعت منفذی تشکیل شده در داخل محیط را کاهش می‌دهد، کاهش سرعت ایجاد شده موجب کاهش ضریب انتشار طولی محیط می‌گردد.

یکی از تفاوت‌های مهم میان فرآیند انتقال - انتشار رسوبات معلق و آلودگی‌ها در داخل محیط متخلخل درشت‌دانه، درصد بازیابی آلودگی و رسوبات معلق می‌باشد. بدین صورت که زمانی که یک آلودگی به داخل محیط متخلخل تزریق می‌گردد، درصد بازیابی مقدار جرم عبوری از درون محیط متخلخل (در صورتی‌که منحنی رخنه عبوری به‌طور کامل برداشت گردد) می‌تواند نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد ولی در این پژوهش مشاهده گردید که روند انتقال و انتشارپذیری رسوبات معلق از درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه یک روند کاملاً تصادفی می‌باشد. در فرآیند تزریق آبی رسوبات معلق به ورودی جریان در داخل محیط مقداری از رسوبات در مخزن پخش شده و با تاخیر از محیط عبور می‌کردند. هم‌چنین مقدار دیگری از رسوبات در بالادست ترسیب نموده در حالی‌که بخش دیگری از رسوبات در داخل محیط متخلخل ذخیره گردیده و با تاخیر زمانی به پائین‌دست منتقل می‌شدند. به همین دلیل در برداشت منحنی‌های رخنه رسوبات عبوری باید دقت کامل صورت می‌گرفت تا اثر پخشیدگی رسوبات درون مخزن از اثرات محیط متخلخل تمیز داده شود. به بیان دیگر به‌دلیل این‌که رسوبات پخش شده درون مخزن

شده مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور جرمی که از طریق منحنی رخنه آزمایشگاهی با در نظر گرفتن ملاحظه‌های لازم در انجام آزمایش‌ها و حذف اثر پخشیدگی ثانویه رسوبات در حجم آب درون مخزن حاصل شده است مورد نظر قرار گرفت.

ممکن بود تا دقایقی درون حجم آب درون مخزن وجود داشته باشند، سعی گردید تا زمان انجام آزمایش‌ها طوری تنظیم شود تا اثر پخشیدگی ثانویه رسوبات درون مخزن لحاظ نگردد. برای حل تحلیلی معادله‌های کلاسیک انتقال- انتشار نیز جرم بازیابی

جدول ۱- مشخصه‌های آزمایش‌ها و ضرایب انتشار طولی به دست آمده از طریق حل معادله کلاسیک انتقال- انتشار و روش گشتاورگیری زمانی.

**Table 1. The properties of experiments and the magnitudes of longitudinal dispersion coefficient from solving of ADE equation versus the same results from temporal moments method.**

قابلیت انتشارپذیری طولی با روش گشتاورگیری زمانی Longitudinal Dispersivity (temporal moments method) (m)	ضریب انتشار طولی به دست آمده با روش گشتاورگیری زمانی Longitudinal Dispersion coefficient (temporal moments method) (m <sup>2</sup> /s)	قابلیت انتشارپذیری طولی با روش معادله کلاسیک Longitudinal Dispersivity (ADE method) (m)	ضریب انتشار طولی به دست آمده با روش معادله کلاسیک Longitudinal Dispersion coefficient (ADE method) (m <sup>2</sup> /s)	درصد بازیابی رسوب <sup>۱</sup> Sediment recovery percentage (%)	طول محیط Media length (cm)	قطر سنگدانه Rock diameter (cm)	دبی Discharge (L s <sup>-1</sup> )
0.0551	0.0037	0.0419	0.0028	44.4	193	3	3.49
0.1145	0.0112	0.1026	0.01	63.2	100	3	3.49
0.0705	0.0047	0.0451	0.003	54.4	193	3	2.83
0.0688	0.0055	0.0413	0.0033	74.4	100	3	2.83
0.0540	0.0034	0.0482	0.003	48.4	193	3	2.04
0.0950	0.0070	0.0410	0.003	68.2	100	3	2.04
0.0430	0.0023	0.0377	0.002	42.4	193	3	1.36
0.0868	0.0058	0.0270	0.0018	59.2	100	3	1.36
0.0844	0.0062	0.0435	0.0032	55	193	3	3.49
0.1019	0.0081	0.0467	0.0037	68.8	100	3	3.49
0.0801	0.0056	0.0471	0.0033	48	193	3	2.83
0.0841	0.0064	0.0472	0.0036	75	100	3	2.83
0.0565	0.0034	0.0419	0.0025	47.8	193	3	2.04
0.1422	0.0102	0.0560	0.004	66.2	100	3	2.04
0.0832	0.0049	0.0651	0.0038	40	193	3	1.36
0.0917	0.0056	0.0525	0.0032	56	100	3	1.36
0.1484	0.0113	0.0854	0.0065	57	193	3	3.49
0.1582	0.0137	0.1619	0.014	57.4	100	3	3.49
0.1013	0.0064	0.1113	0.007	70	193	3	2.83
0.1165	0.0091	0.0561	0.0044	75.5	100	3	2.83
0.0917	0.0055	0.0796	0.0048	50	193	3	2.04
0.1048	0.0066	0.0442	0.0028	67.5	100	3	2.04
0.0898	0.0050	0.0712	0.004	40.3	193	3	1.36
0.1039	0.0060	0.0589	0.0034	64.4	100	3	1.36
0.0716	0.0046	0.0653	0.0042	40.4	193	1.6	3.49
0.0823	0.0051	0.0512	0.0032	56.4	100	1.6	3.49

1- Sediment Recovery Percentage

## ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

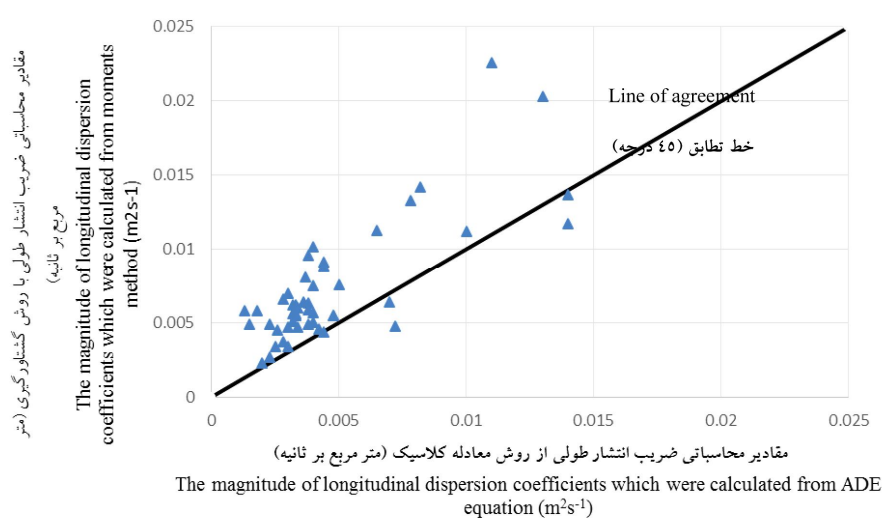
قابلیت انتشارپذیری طولی با روش گشتاورگیری زمانی Longitudinal Dispersivity (temporal moments method) (m)	ضریب انتشار طولی به دست آمده با روش گشتاورگیری زمانی Longitudinal Dispersion coefficient (temporal moments method) (m <sup>2</sup> /s)	قابلیت انتشارپذیری طولی با روش معادله کلاسیک Longitudinal Dispersivity (ADE method) (m)	ضریب انتشار طولی به دست آمده با روش معادله کلاسیک Longitudinal Dispersion coefficient (ADE method) (m <sup>2</sup> /s)	درصد بازیابی رسوب Sediment recovery percentage (%)	طول محیط Media length (cm)	قطر سنگدانه Rock diameter (cm)	دبی Discharge (L s <sup>-1</sup> )
0.0744	0.0047	0.0535	0.0034	51.6	193	1.6	2.83
0.1005	0.0049	0.0308	0.0015	48.8	100	1.6	2.83
0.0958	0.0057	0.0672	0.004	46.4	193	1.6	2.04
0.1395	0.0058	0.0313	0.0013	61.2	100	1.6	2.04
0.0629	0.0027	0.0545	0.0023	61.2	193	1.6	1.36
0.1030	0.0049	0.0483	0.0023	61.2	100	1.6	1.36
0.0719	0.0045	0.0418	0.0026	49.2	193	1.6	3.49
0.2785	0.0203	0.1783	0.013	60.2	100	1.6	3.49
0.1030	0.0062	0.0547	0.0033	52.4	193	1.6	2.83
0.2940	0.0226	0.1430	0.011	48.6	100	1.6	2.83
0.1085	0.0063	0.0651	0.0038	40	193	1.6	2.04
0.2135	0.0133	0.1248	0.0078	50.8	100	1.6	2.04
0.0938	0.0044	0.0928	0.0044	40	193	1.6	1.36
0.1759	0.0088	0.0880	0.0044	49.2	100	1.6	1.36
0.0941	0.0059	0.0611	0.0038	54.8	193	1.6	3.49
0.1631	0.0117	0.1947	0.014	62	100	1.6	3.49
0.1168	0.0075	0.0622	0.004	60	193	1.6	2.83
0.1530	0.0096	0.0603	0.0038	54.4	100	1.6	2.83
0.1054	0.0055	0.0918	0.0048	40	193	1.6	2.04
0.1289	0.0076	0.0849	0.005	61.3	100	1.6	2.04
0.1115	0.0048	0.1682	0.0072	40	193	1.6	1.36
0.2419	0.0142	0.1395	0.0082	55.3	100	1.6	1.36

طی مسیرهای متفاوتی درون محیط متخلخل به پائین دست محیط متخلخل منتقل و به دلیل اختلاف‌هایی که در سرعت‌های طی شده در داخل محیط وجود داشت پخش می‌شوند و به دلیل این که روند معناداری مابین جرم رسوب تزریقی به محیط متخلخل و ضریب انتشار محیط متخلخل مشاهده نگردید نتیجه‌گیری می‌شود که میزان جرم تزریقی به درون محیط اثر معناداری بر ضریب انتشار رسوبات ندارد.

بعد از محاسبه درصد بازیابی رسوبات از منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی مشاهده شد که درصد بازیابی با ضریب انتشار نسبت مستقیم داشته و با افزایش ضریب بازیابی رسوبات، ضریب انتشار محیط متخلخل نیز افزایش پیدا می‌کند. این به این معنی است که در آزمایش‌هایی که به واسطه شرایط جریان درون محیط متخلخل سرعت منفذی بیش‌تری به دست می‌آمد ذرات رسوبات معلق توسط همین سرعت بالا پس از

منحنی رخنه منتقل شده ولی مقداری از جرم انتقالی به دلیل درگیر شدن در مناطق چرخشی جریان درون محیط و یا به دلیل داشتن مسیری طولانی‌تر نسبت به مسیر مستقیم با تاخیر زمانی منتقل می‌گردند. این پدیده‌ها عموماً اثر خود را در بازوی پائین‌رونده منحنی رخنه نشان می‌دهند. در روش حل معادله‌های کلاسیک ADE جرم رسوبات بازیابی شده طوری بر روی منحنی قوسی توزیع می‌گردد که غلظت اوج را پوشش داده و تقارن در آن وجود داشته باشد که این وضعیت از موارد عدم تطابق این معادله با منحنی‌های برداشت شده آزمایشگاهی می‌باشد. در روش کلاسیک عملاً جرم بازیابی شده از بازوی پائین‌رونده منحنی روی قسمت قوسی و قسمتی از بازوی بالارونده توزیع می‌گردد که این در تناقض با داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی می‌باشد ولی در روش گشتاورگیری زمانی به دلیل گسسته کردن منحنی و استفاده از روش ذوزنقه‌ای برای محاسبه جرم توزیعی، جرم برداشت شده از بازوی پائین‌رونده منحنی، دیگر بر روی قسمت بازوی بالارونده منحنی توزیع نمی‌شود. مقادیر ضریب انتشار طولی برای هر دو روش در شکل ۴ آورده شده است.

محاسبه میزان ضریب انتشار طولی از طریق روش گشتاورگیری: مقادیر مربوط به ضریب انتشار طولی محیط متخلخل از طریق گشتاورگیری زمانی (رابطه‌های ۶ تا ۱۴) نیز محاسبه گردید و مشاهده گردید که مقادیر به دست آمده برای ضریب انتشار طولی از روش گشتاورهای زمانی قادر به پوشش بهتر منحنی رخنه آزمایشگاهی نسبت به روش معادله کلاسیک انتقال-انتشار می‌باشد. این نتیجه به دلیل محاسبه درست‌تر واریانس منحنی رخنه آزمایشگاهی برداشت شده از روی مقادیر آزمایشگاهی و به دست آوردن صحیح موقعیت مرکز زمانی منحنی می‌باشد. در حالت کلی درستی بیشتر در محاسبه واریانس منحنی رخنه مشاهداتی، به دلیل محاسبه از طریق گسسته کردن داده‌های منحنی با استفاده از رابطه ۱۳ می‌باشد. مقادیر به دست آمده برای ضریب انتشار محیط متخلخل از طریق روش گشتاورهای زمانی عموماً کم‌تر از مقادیر به دست آمده نسبت به روش معادلات کلاسیک ADE می‌باشد (شکل ۴). تفاوت اصلی دو روش در وضعیت بازوی پائین‌رونده منحنی رخنه است. بدین صورت که جبهه انتقال رسوبات با شیب بالا در بازوی بالارونده



شکل ۴- مقادیر ضریب انتشار طولی بر اساس معادله کلاسیک انتقال-انتشار در مقابل گشتاورگیری زمانی.

Figure 4. The magnitude of longitudinal dispersion coefficient which were calculated from ADE equation versus the same variable that were calculated from temporal moments method.

به منظور تعیین ضرایب در رابطه ۱۷، از ۷۰ درصد داده‌های به دست آمده از طریق روش گشتاورهای زمانی استفاده شده و در نهایت ضرایب مطابق رابطه ۱۸ به دست آمده و سپس توسط ۳۰ درصد باقی مانده داده‌ها صحت‌سنجی انجام شد.

$$\left(\frac{D}{vd}\right) = 93.21 n^{7.52} \left(\frac{h}{d}\right)^{-0.68} \quad (18)$$

$$\left(\frac{d}{L}\right)^{0.08} \left(\frac{ud}{g}\right)^{0.034} \left(\frac{m}{m_0}\right)^{-0.95}$$

با توجه به مقدار به دست آمده برای ضرایب رابطه (۱۷) مشاهده می‌شود که پارامترهای تخلخل، نسبت جرم‌ها و نسبت طول  $\left(\frac{h}{d}\right)$  به ترتیب تأثیر بیشتری بر تخمین مقدار عدد بدون بعد انتشار نسبت به پارامترهای دیگر دارند. در شکل ۵ مقادیر محاسبه شده ضریب انتشار با استفاده از رابطه ۱۸ در برابر مقادیر آزمایشگاهی ارائه گردیده است.

رابطه فوق دارای میانگین خطای نسبی ۳۰ درصد برای تخمین ضریب انتشار طولی محیط متخلخل بوده که در پژوهش‌های رسوبی این میزان خطا قابل اعتماد می‌باشد. رابطه مربوط به محاسبه خطای نسبی نیز مطابق رابطه ۱۹ می‌باشد.

$$ave\left(\frac{\left(\frac{D}{vd}\right)_{obs} - \left(\frac{D}{vd}\right)_{calc}}{\left(\frac{D}{vd}\right)_{obs}}\right) \quad (19)$$

که در آن،  $\left(\frac{D}{vd}\right)_{obs}$  عدد بدون بعد انتشار مشاهداتی،  $\left(\frac{D}{vd}\right)_{calc}$  عدد بدون بعد انتشار محاسباتی است.

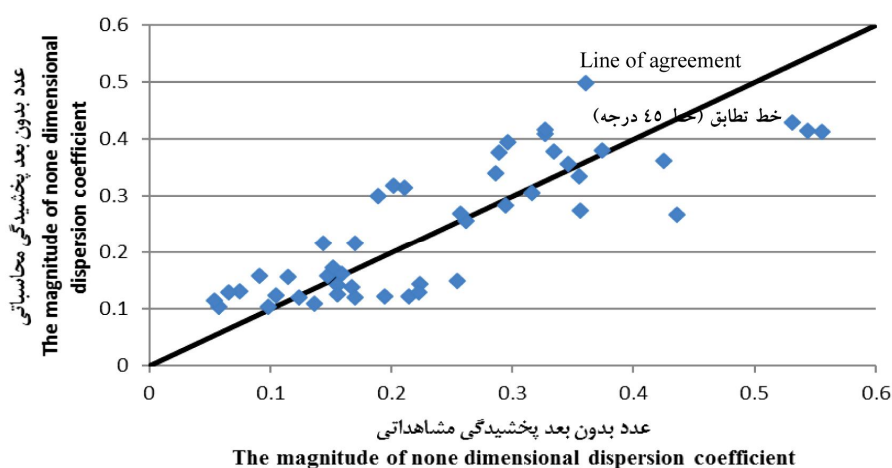
توسعه یک رابطه برای تخمین مقدار ضریب انتشار طولی محیط متخلخل بر اساس نتایج روش گشتاورگیری زمانی: به منظور توسعه یک رابطه بدون بعد برای تخمین میزان انتشار طولی محیط متخلخل بر اساس تئوری پای باکینگهام، در ابتدا باید پارامترهای دخیل در پدیده تعیین شده و سپس اعداد بدون بعد با استفاده از تئوری مذکور تعیین گردند. در فرآیند انتشار طولی رسوبات معلق در محیط متخلخل، عوامل مؤثر عبارتند از قطر ذرات محیط متخلخل ( $d$ )، ضریب انتشار طولی محیط ( $D$ )، سرعت متوسط جریان از درون محیط ( $v$ )، ارتفاع متوسط جریان از درون محیط ( $h$ )، ویسکوزیته آب ( $g$ )، تخلخل محیط متخلخل ( $n$ )، طول محیط متخلخل ( $L$ )، جرم رسوب تزریقی ( $m$ ) و جرم رسوب بازیابی شده ( $m_0$ ) به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$D = f(d, v, h, g, n, L, m, m_0) \quad (15)$$

$$f\left(\frac{d, v, h, g, n, L, m, m_0}{m_0, D}\right) = 0 \quad (16)$$

با توجه به تعداد پارامترهای دخیل (۹ عدد) و وجود سه پارامتر پایه‌ای طول، زمان و جرم، لازم است به تعداد ۶ عدد بدون بعد تولید شود. اعداد بدون بعد تولید شده پس از استفاده از تئوری پای باکینگهام عبارتند از تخلخل ( $n$ )، نسبت طول  $\left(\frac{h}{d}\right)$ ، عدد رینولدز محیط متخلخل  $(ud)/g$ ، نسبت طول  $\left(\frac{d}{L}\right)$ ، عدد بدون بعد انتشار  $D/(vd)$  و نسبت جرم‌ها  $(m/m_0)$  در نتیجه رابطه کلی ارائه شده برای تخمین ضریب انتشار طولی مطابق زیر است:

$$\left(\frac{D}{vd}\right) = \alpha n^\beta \left(\frac{h}{d}\right)^\gamma \left(\frac{d}{L}\right)^\delta \left(\frac{ud}{g}\right)^\epsilon \left(\frac{m}{m_0}\right)^\zeta \quad (17)$$



شکل ۵- عدد بدون بعد انتشار مشاهداتی در مقابل عدد بدون بعد انتشار محاسباتی.

Figure 5. The magnitude of observed none-dimensional longitudinal dispersion versus the magnitude of computed none-dimensional longitudinal dispersion.

پائین‌رونده منحنی رخنه) با درستی بیشتری ارائه می‌نمایند بنابراین کارایی بهتری در تخمین ضریب انتشار طولی نسبت به روش معادله کلاسیک انتقال و انتشار از خود نشان می‌دهند. از طریق شناسایی پارامترهای دخیل و استخراج پارامترهای بدون بعد برای محاسبه ضریب انتشار طولی به روش پای باکینگهام، رابطه‌ای برای تخمین ضریب انتشار طولی محیط‌های متخلخل ارائه شد که میانگین خطای نسبی آن در پیش‌بینی مقدار ضریب انتشار طولی ۳۰٪ برآورد شد. همچنین مشخص شد که عواملی که باعث افزایش سرعت منفذی جریان و کاهش زبری محیط می‌گردند، بیش‌ترین تأثیر را در مقدار ضریب انتشار طولی دارند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از برداشت منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی اقدام به مقایسه دو روش معادله کلاسیک انتقال- انتشار و گشتاورگیری زمانی برای تخمین پارامتر ضریب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه گردید. محدوده ضرایب انتشار طولی به‌دست آمده برای محیط‌های متخلخل درشت‌دانه در این پژوهش بین  $m^2/s$  (۰/۰۰۲-۰/۰۲) بوده و به‌طور متوسط ضرایب به‌دست آمده از طریق گشتاورهای زمانی مقادیر کم‌تری نسبت به روش حل معادله کلاسیک ADE می‌باشند. با توجه به این‌که روش گشتاورگیری زمانی بعضی از مشخصه‌های منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی برداشت شده را (همانند عدم تقارن در بازوهای بالارونده و

### منابع

1. Banks, R.B., and Ali, J. 1964. Dispersion and Adsorption in Porous Media Flow. J. Hydr. Div. 90: 13-31.
2. Chabokpour, J. 2014. The investigation of the behavior of sediment contained flow through the large porous media. Ph.D. Thesis. Irrigation and reclamation department. University of Tehran. (In Persian)
3. Chanson, H. 2004. Environmental hydraulics of open channel flows. First Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. Jordan Hill. Oxford. 483p.

4. De Smedt, F., Brevis, W., and Debels, P. 2005. Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage. *J. Hydrol.* 315: 25-39.
5. French, R. 1987. *Open channel hydraulics*. 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company. New York. 705p.
6. Harleman, D., and Rumer, R. 1963. Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media. *J. Fluid Mech.* 16: 385-394.
7. Hunt, B. 1999. Dispersion model for mountain streams. *J. Hydr. Engin. ASCE.* 125: 2. 99-105.
8. Koussis, A.D., Melio, A., and Ioannis, G.T. 1983. Pollution Routing in Streams. *J. Hydr. Engin. ASCE.* 109: 12. 1636-1651.
9. Rieckermann, J., Neumann, M., Ort, C., Huisman, J.L., and Gujer, W. 2004. Dispersion coefficients of sewers from tracer experiments. *Water Science and Technology.* 52: 5. 123-13.
10. Schmid, B.H. 1995. On the transient storage equations for longitudinal solute transport in open channels: Temporal moments accounting for the effects of first-order decay. *J. Hydr. Res.* 33: 595-610.
11. Schmid, B.H. 2003. Temporal moments routing in rivers and streams with transient storage. *Advances in Water Resources.* 26: 9. 1021-1027.
12. Sedghi Asl, M. 2010. Investigation of the Limits of the Dupuit Analogue for Steady Gradually Varied Flow through Coarse Porous Media. Ph.D. Thesis. Irrigation and reclamation department. University of Tehran. (In Persian)
13. Shamir, U., and Harleman, D.R.F. 1967. Numerical solution for dispersion in porous mediums. *Water Resources Research.* 3: 2. 557-581.
14. Singh, S.K. 2002. Estimating dispersion coefficient and porosity from soil-column tests." *J. Environ. Engin. ASCE.* 128: 1. 1095-1099.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(6), 2017*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Estimation of longitudinal dispersion coefficient of suspended sediments through the large porous Medias**

**J. Chabokpour<sup>1</sup>, \*E. Amiri Tokaldany<sup>2</sup> and M. Sedghi Asl<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Faculty of Agriculture, University of Maragheh, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Yasouj

Received: 06/16/2015; Accepted: 02/22/2017

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Applicability of rockfill dams which has been made from large rock materials for purpose of flood detention reduces over the time because of siltation of pore system with sediment contained basin outflow. Since some of structures which were built with large rock materials should convey suspended sediment contained flows therefore routing process of these type flows have been investigated. The investigation around advection and dispersion of sediments particles through the large porous media usually is being done with breakthrough curve. This investigation is usually common for pollutants in rivers, sewer system and fine porous media. Previous researchers used from various techniques like numerical solving, parameter estimation and exact solution for solving of above mentioned problems. However unfortunately any general inquiry about suspended sediments was not accomplished yet. The exit breakthrough curves in many cases are asymmetrical and have skewness in their falling limbs. Therefore some researchers after collecting the series of field data have discovered it and have presented a new model named transient storage model. Some investigators by considering Asymmetry in exit breakthrough curve have joined first order mass transfer equation with ADE equations and have extracted exact solutions with various primary and boundary conditions. The important criterion in this regard is to use them in similar primary and boundary conditions. Therefore in many cases the investigators are using from temporal and spatial moment technique according to experimental data series. By emphasis to above mentioned criteria and as regards to this fact that any coherent research in the investigation of behavior of suspended sediments through the large porous media were not accomplished yet therefore in this research tried to focus on it.

**Materials and Methods:** In this research by creating a laboratory model of large porous media and employing suspended sediment particles, tried to acquire an experimental data series in order to investigate longitudinal convection and dispersion phenomenon of suspended sediments through the large porous media. In this investigation by application of 2 media diameters, 4 inflow discharges and different hydraulic gradients over the media, the breakthrough curves of suspended sediments were extracted. The BC curves were extracted with water sampling from media end and then the samples have been passed from filter paper and dried. The concentration-time graphs were extracted after weighting of dried sediment particles. Also by using of parameter estimation technique for classical advection dispersion equation and temporal moments method, the longitudinal dispersion coefficients were extracted.

**Results:** The results showed that due to the inherent properties of exit breakthrough curve, the temporal moments method has a better estimation accuracy rather than classical advection dispersion equation. Additionally by dimensional analysis method, a relationship has been acquired for estimation of longitudinal dispersion coefficient with average relative error of 30%, which is reliable in sediment transport studies. Furthermore, the results of analysis of BC curves exhibited that the curve has an Asymmetric limbs in rising and falling stages, which this observation is because of temporary storage of sediments and gradual release of them through the downstream flow.

**Keywords:** Rockfill materials, Suspended sediments, Longitudinal dispersion coefficient, Classical advection-dispersion equation, Temporal moments

---

\* Corresponding Author; Email: [amiri@ut.ac.ir](mailto:amiri@ut.ac.ir)