نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال هفتم ، شماره سوم، بهار ۱۳۹۷

ISSN 2251-7480

تاثیر شکل ذرات محیط متخلخل بر انتشارپذیری طولی: انتقال آلاینده‌ها

قاسم میرزائی[1*]

۱*) کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های آبی؛ مربی؛ دانشکده کشاورزی مشگین شهر؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ اردبیل؛ ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: ghasem.mirzaei@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

چکیده:

شکل ذرات محیط متخلخل تاثیر بسزایی بر روی جریان و مخصوصاً انتشارپذیری طولی آن دارد. در تحقیق حاضر، طی آزمایش‌هایی بر روی سه ستون خاک حاوی ذرات شکسته و تیزگوش ، ماسه بستر رودخانه و ذرات کروی، تاثیر شکل ذرات محیط متخلخل بر روی انتشارپذیری طولی مورد بررسی قرار گرفت. با تزریق جریان و آلاینده (NaCl) در پنج سطح سرعت، منحنی رخنه در پنج نقطه در طول جریان به روش سلف پتانسیل استخراج و ضمن شبیه‌سازی نتایج با نرم افزار FEFLOW، و با حل تحلیلی معکوس با نرم‌افزار CXTFIT2، انتشارپذیری طولی تعیین گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد به ازای سرعت ثابت، محیط با ذرات کروی دارای انتشارپذیری طولی بیشتر از دو محیط دیگر و در خاکدانه ماسه‌ای بیشتر از ذرات شکسته است که این امر می‌تواند به دلیل افزایش سطح تماس و همچنین پیچ و خم مسیر با خارج شدن ذرات از شکل کروی اتفاق افتد. با افزایش سرعت، انتشارپذیری طولی در هر سه محیط کاهش می‌یابد همچنین هر چه خاکدانه‌ها به شکل کروی نزدیکتر باشند تاثیر عامل مقیاس بیشتر و با افزایش سرعت، کاهش انتشارپذیری طولی در این خاکدانه‌ها کمتر خواهد بود.

کلید واژه‌ها: روش سلف پتانسیل؛ شکل خاکدانه؛ منحنی رخنه؛ FEFLOW؛ CXTFIT

مقدمه

نفوذ مواد آلاینده به داخل سفره‌های آب شیرین در اثر ایجاد گرادیان هیدرولیکی به سمت این سفره‌ها به دلیل افت سطح آب‌های زیرزمینی و به تبع آن کاهش کیفیت آب استحصال شده، یکی از مهمترین چالش‌های فراروی مدیران بخش آب کشور است. با پیشرفت‌های صورت گرفته در علم دینامیک سیالات، ابزارهای مدیریتی بسیار توانمندی جهت پایش کیفی و کمی آب‌های زیرزمینی توسعه پیدا کرده‌اند که در تلفیق با یک مدیریت کارآمد می‌تواند متضمن تحقق اهداف ترسیم شده در راستای توسعه پایدار کشور باشد.

امروزه شاید مهمترین و اساسی‌ترین بحث در زمینه انتقال آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل نحوه تعیین پارامترهای موثر در معادلات حاکم بر آن می‌باشد. از اینرو جهت بررسی تاثیر عواملی نظیر دانه‌بندی محیط متخلخل، سرعت جریان، عامل مقیاس، نوع سیال، نوع آلاینده، دما و سایر عوامل نظیر آن بیشتر تلاش محققان برای بالابردن دقت در برآورد پارامترهایی نظیر فاکتور تاخیر، فاکتور تجزیه یا تولید، ضریب انتشار مولکولی، ضریب انتشار طولی و عرضی معطوف گردیده است (Delgado, 2005; Delgado, 2007; Porta *et al.*, 2012. Mehmani and Prodanovic, 2014).

Archive of SID

www.SID.ir

محققان عوامل موثر بر انتشارپذیری طولی را در دو دسته مورد بررسی قرار می‌دهند. دسته اول مربوط به خصوصیات سیال و دسته دوم مربوط به خصوصیات محیط متخلخل است. در دسته اول بطور عمده تاثیر ویسکوزیته، چگالی، سرعت و دمای سیال مورد بررسی قرار گرفته که در تحقیق پیشرو کلیه این فاکتورها ثابت در نظر گرفته شده است (Delgado, 2005; Delgado, 2007; Lehmann *et al*., 2008; Ginn *et al*., 2009; Grillo, 2010; Porter *et al*., 2010; Jamshidzadeh *et al*., 2013; Bandai *et al*., 2017; Perovic *et al*., 2017). در دسته دوم نیز تاثیر عوامل طول ستون خاک، نسبت طول و قطر ستون خاک به قطر ذرات خاک، توزیع اندازه ذرات خاک و شکل ذرات خاک یا محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد (Delgado, 2005; Delgado, 2007; Pugliese, 2012; Ikni *et al*., 2013; Pugliese and Poulsen, 2014; Bandai *et al*., 2017).

شکل ذرات محیط متخلخل تاثیر بسزایی بر روی جریان و مخصوصاً انتشارپذیری طولی آن دارد. از قدیمی‌ترین کارهای صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهشی از Carberry و Bretton (۱۹۵۸) اشاره کرد. در تحقیق آن‌ها نتایج برای ذرات با شکل‌های کروی، مکعبی، رینک شکل و ماسه در اندازه‌های مختلف ارائه شده است. علیرغم انجام آزمایش‌ها بر روی ذرات با شکل‌های مختلف، تاثیر سایر عوامل از جمله سرعت جریان و طول محیط متخلخل بر روی انتشارپذیری طولی، اثر شکل ذرات را به حاشیه برده است. در نهایت محقق با نتیجه‌گیری کیفی مبنی بر پر اهمیت بودن شکل ذرات بر ضریب انتشارپذیری طولی، تحقیق را به پایان می‌رساند (Carberry and Bretton, 1958). تحقیقاتی از این دست که در آن اثر شکل ذرات محیط متخلخل به حاشیه رفته است بسیار است (Ebach and White, 1958; Strang and Geankopolis, 1958; Hiby, 1962). یکی از تحقیقات مستمر که بخش قابل توجهی از آن به تاثیر شکل ذرات معطوف شده توسط Delgado (۲۰۰۷) صورت پذیرفته است. در این تحقیق دلقادو از داده‌های موجود در پژوهش‌های پیشین به انضمام آزمایشاتی که خود محقق انجام داده، برای بررسی میزان تاثیر عواملی از جمله سرعت، نسبت ابعاد مختلف ستون خاک، توزیع اندازه ذرات خاک، شکل ذرات خاک و همچنین خصوصیات مربوط به سیال بر روی انتشارپذیری طولی محیط متخلخل پرداخته است. هر چند که این تحقیق در بررسی سایر عوامل بخوبی عمل کرده ولی بدلیل اینکه داده‌های مربوط به عامل شکل ذرات بیشتر از منابع مختلف جمع آوری شده انسجام مناسبی بین داده‌ها وجود ندارد. نتایج این تحقیق نشان از کاهش نسبی ضریب انتشارپذیری طولی در ذرات گوشه دار و ماسه نسبت به ذرات کروی دارد با افزایش عدد پکله همگرایی در این اعداد دیده می‌شود ولی تلاش خاصی برای تفسیر نتایج صورت نگرفته است (Carvalho and Delgado, 2003; Delgado, 2005; Delgado, 2007). Pugliese و همکاران (۲۰۱۳) نیز در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر توزیع اندازه ذرات و شکل ذرات بر ضریب انتشار پذیری در گازها پرداخته است. در این تحقیق از سه شکل ذرات (گوشه-دار–ماسه‌ای–کروی) در اندازه‌های مختلف استفاده شده است. با اندازه‌گیری منحنی رخنه و حل معکوس معادله جابجایی–انتشار، ضرایب انتشارپذیری محاسبه و سعی شده است رابطه‌ای برای آن ارائه گردد (Pugliese, 2013). مشابه همین کار باز توسط Pugliese و Poulsen (۲۰۱٤) برای سرعت‌های پایین (کوچکتر از یک سانتی متر در دقیقه) و ذرات ریزتر (۱۲–۰/۰۸۸ میلی متر) نسبت به آزمایش پیشین انجام گرفته است. اصلی‌ترین نتیجه‌گیری تحقیق بر این دلالت دارد که رابطه سرعت و ضریب انتشارپذیری در کلیه محیط‌های آزمایش در سرعت پایین غیر خطی است. در نهایت با ارائه روابط تجربی بین ضریب انتشارپذیری و فاکتور توزیع اندازه ذرات تحقیق به پایان رسیده است (Pugliese and Poulsen, 2014).

Archive of SID
www.SID.ir

علیرغم اینکه در تحقیقات صورت گرفته پیشین همزمان تاثیر سایر عوامل نظیر بافت خاک و اندازه ذرات و سایر عوامل بصورت همزمان با شکل ذرات مورد بررسی قرار گرفته است درتحقیق پیش‌رو با در نظر گرفتن محیطی همگن و اندازه ذرات یکنواخت تاثیر سایر عوامل بر انتشارپذیری طولی به حداقل رسیده است و تاثیر عامل شکل ذرات محیط متخلخل بر روی انتشارپذیری طولی با استفاده از فاکتور شکلی متمایز که خصوصیات محیط را دقیق‌تر و کامل‌تر منعکس می‌کند، مورد توجه قرار گرفته است و به موازات آزمایش‌ها صحت و دقت نتایج بدست آمده با نرم‌افزار FEFLOW نیز ارزیابی شده است. طراحی و ساخت ستون آزمایش توأم با تکنیک‌های اندازه‌گیری بکار رفته بدیع در این تحقیق به راحتی امکان بررسی ساز و کار تاثیر فاکتور شکل ذرات، نحوه تاثیر پیچ و خم مسیر، تاثیر سرعت جریان و همچنین اثر عامل شکل بر نحوه تاثیر عامل مقیاس بر روی انتشارپذیری طولی آلاینده‌ها را فراهم کرده است.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادله‌ی جابجایی-انتشار[1] بطور گسترده برای توصیف انتقال آلاینده‌ها در شرایط اشباع بکار رفته است. این معادله فرآیندهای جابجایی، پخشیدگی مولکولی و انتشار مکانیکی را شامل می‌شود. جابجایی در اثر اختلاف پتانسیل یا گرادیان هیدرولیکی، فرآیند پخشیدگی مولکولی ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها و انتشار مکانیکی در اثر تغییرات سرعت سیال در فضای منافذ محیط متخلخل اتفاق می‌افتد. مجموع فرآیندهای پخشیدگی مولکولی و انتشار مکانیکی، انتشار هیدرودینامیکی یا به اختصار انتشار نامیده می شود. شکل یک بعدی معادله جابجایی-انتشار برای آلاینده‌های محلول پایدار در محیط اشباع با شرایط جریان ماندگار به صورت زیر است (Bear, 1972):

$$\frac{\partial c(X,t)}{\partial t} = D_X \frac{\partial^2 c(X,t)}{\partial X^2} - V_X \frac{\partial c(X,t)}{\partial X} \qquad (۱)$$

که در این رابطه $c(X,t)$ غلظت آلاینده، (ML^{-3})، D_X ضریب انتشار طولی (L^2T^{-1})، V_X متوسط سرعت آب منفذی (LT^{-1})، X مختصات مکان (L) و t مختصات زمان (T) است. شرایط اولیه و مرزی نیز بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود (Leij *et al.*, 1991):

$$\begin{aligned} &c(0,t) = c_0 \\ &c(\infty,t) = 0 \\ &c(X,0) = 0 \end{aligned} \qquad (۲)$$

حل تحلیلی معادله جابجایی-انتشار نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Leij *et al.*, 1991):

$$c(X,t) = \frac{c_0}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{X - V_X t}{2\sqrt{D_X t}}\right) + \frac{c_0}{2}\exp\left(\frac{V_X X}{D_x}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{X + V_X t}{2\sqrt{D_X t}}\right) \qquad (۳)$$

برای مقادیر بزرگ $\left(\frac{V_X X}{D_X}\right)$، جمله دوم سمت راست معادله (۳) ناچیز است و می‌توان آنرا بصورت زیر نوشت.

$$c(X,t) = \frac{c_0}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{X - V_X t}{2\sqrt{D_X t}}\right) \qquad (٤)$$

در معادله‌های فوق، c_0 غلظت آلاینده‌های نقطه‌ای است که بصورت پیوسته در نقطه $X = 0$ به داخل محیط متخلخل تزریق می‌گردد. ضریب انتشار طولی عبارت از $D_X=\alpha_X V_X+D^*_X$ می‌باشد. در این رابطه α_X انتشارپذیری طولی (L) و D^* ضریب پخشیدگی مولکولی L^2T^{-1} است. نقش نسبی انتشار مکانیکی و پخشیدگی مولکولی در انتقال آلاینده با استفاده از عدد پکلت (Peclet) مشخص می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد (Delgado, 2005).

$$Pe = \frac{V_X d}{D^*} \qquad (۵)$$

در این رابطه d مربوط به کمیت قطر خاکدانه‌های محیط می‌باشد که دارای بعد طول (L) است. در اعداد

1- *Advection-Diffusion Equation*

Archive of SID

www.SID.ir

پکلت بزرگ ($Pe > 95$)، انتشار مکانیکی عامل کنترل کننده می‌باشد و در این حالت ضریب انتشار با استفاده از رابطه‌ی $D_X = \alpha_X V$ محاسبه می‌گردد (Bear and Verruijt, 1987; Delgado, 2005).

فاکتور شکل ذرات

از آنجائیکه ذرات خاک در محیط متخلخل در تماس سه بعدی با سایر ذرات قرار دارد، لذا محاسبه شکل ذرات درصورتیکه در ارتباط با سایر ذرات خاک باشد، خصوصیات محیط را دقیق‌تر و کامل‌تر منعکس خواهد کرد تا اینکه محاسبه این کمیت برای ذرات بصورت محض و تک به تک باشد. مطابق روش پیشنهادی Sperry و Peirce (۱۹۹۵) (شکل ۱) مقدار ۳۵۰ گرم از ذرات خاک بصورت یکنواخت در عرض سطح شیبدار با حجمی حدود ۱۰ گرم در ثانیه به درون جعبه طراحی شده ریخته می‌شود. در انتهای آزمایش سطح خاک ریخته شده بر اساس زاویه پایداری ذرات که متاثر از شکل یا گردی ذرات است در دو سمت دیواره زاویه a را با افق می‌سازد. این آزمایش ۱۰ بار برای هر نوع خاک تکرار شده و در نهایت میانگین زوایای اندازه‌گیری شده نماینده شکل ذرات خواهد بود. سادگی و قابلیت تکرار این روش از مهمترین مزیت‌های آن می‌باشد (Sperry and Peirce, 1995).

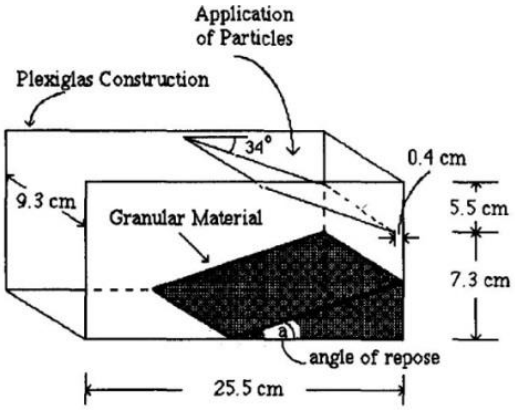
مدلسازی معادله جابجایی-انتشار

مدل حل تحلیلی CXTFIT2

یکی از مدل‌های حل تحلیلی معادله جابجایی-انتشار مدل CXTFIT است که اولین نسخه آن توسط Van Genuchten و همکارانش (۱۹۷۷) ارائه شد. مدل مورد استفاده در این تحقیق CXTFIT2 است که یکی از ابزارهای مجموعه نرم افزاری STANMOD نسخه ۲,۰۸,۱۱۳۰ می‌باشد. که از طریق حل معکوس معادله جابجایی-انتشار قادر است ضریب انتشار را با وارد کردن منحنی رخنه آزمایش ستون خاک محاسبه نماید (Toride *et al.*, 1995; Tang *et al.*, 2010).

مدل حل عددی FEFLOW

نام این شبیه‌ساز برگرفته از «سیستم شبیه‌سازی جریان زیرسطحی بر اساس المان‌های محدود» می‌باشد که انتقال جریان، جرم و گرما را بر اساس معادلات حاکم در محیط‌های متخلخل مدلسازی می‌کند و امروزه یکی از کارآمدترین نرم‌افزارها در زمینه آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. شبیه‌ساز FEFLOW با بکارگیری معادله جابجایی-انتشار در حالت سه بعدی قابلیت شبیه‌سازی یک، دو و سه بعدی جریان و آلودگی وگرما در محیط‌های متخلخل اشباع و غیر اشباع را دارا می‌باشد (Trefry and Muffels, 2007).



شکل ۱. نمای شماتیک از آزمایش تعیین فاکتور شکل ذرات (Sperry and Peirce, 1995)

Archive of SID
www.SID.ir

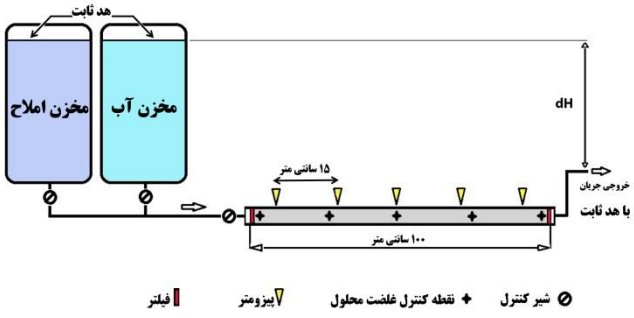
طراحی آزمایش

مشخصات ستون آزمایش

بر اساس پیشنهاد محققان مختلف (Choudhary, 1976; Delgado, 2007) جهت تشکیل پروفیل یکنواخت سرعت و تخلخل و همچنین جریان یک بعدی شبه بی‌نهایت در طول ستون باید نسبت قطر ستون به قطر متوسط ذرات بزرگتر از ۱۵ ($\frac{D}{d}>15$) و نسبت طول ستون به قطر ستون بزرگتر از ۲۰ ($\frac{L}{D}>20$) باشد. برای رعایت نسبت‌های فوق مطابق (شکل ۲)، آزمایش‌ها در ستونی از جنس پلی اتیلن با سطح مقطع دایره‌ای به قطر داخلی ٤/٥٥ سانتی متر و طول ۱۰۰ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر انجام می‌شود. طراحی ستون بگونه‌ای صورت گرفته است که اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در فواصل ۹، ۳۰، ۵۱، ۷۲، ۹۳ سانتی متری ورودی ستون با نصب الکترودهایی با پوشش سطحی از جنس Ag–AgCl از طریق هدایت سنجی املاح عبوری به روش جدید سلف پتانسیل انجام می‌گردد. اساس این روش اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی بسیار کوچک (در حد چند میلی ولت) ایجاد شده در سیال با غلظت متغیر در یک محیط پیوسته متخلخل است. تفاوت غلظت در محل الکترود در ستون خاک و الکترود مزدوج موجود در منبع تزریق تعیین کننده غلظت جریان عبوری است (Giampaolo, *et al.*, 2016).

مشخصات محیط متخلخل

مطابق (شکل ۳) و با توجه به اهداف تحقیق سه نوع محیط متخلخل برای آزمایش در نظر گرفته شده است که برای شکل‌دهی این سه محیط از ذرات شکسته و تیز گوش(A)، که از خرد کردن سنگ‌های بستر رودخانه خیاو چایی در محدوده پارک جنگلی شهرستان مشگین شهر بدست آمده است، خاکدانه‌های گردگوش (ماسه رودخانه خیاو چایی مشگین شهر) (B) و از جنس پلاستیک فشرده (C) استفاده شده است. جهت ایجاد سطحی زبر برای ذرات کروی، آنها را در استوانه‌ای پر از سنگریزه ریخته و استوانه را به گردش در آورده تا سطح صیقلی و صافشان از بین رفته و زبری این ذرات تقریبا برابر دو خاکدانه دیگر باشد. اندازه ذرات برای ایجاد بافتی همگن در ستون آزمایش از ذرات عبوری از الک استاندارد U.S شماره ١٦ و باقیمانده بر روی الک شماره ۲۰ (اندازه ذرات بین ۱/۲– ۰/۸۵ میلی متر) انتخاب شده است. برای زدودن ترکیبات احتمالی نمک موجود در خاکدانه‌ها، این ذرات به مدت ٢٤ ساعت در آب مقطر خوابانده و سپس با شستشوی مجدد با آب مقطر از آن استفاده می‌گردد تا وجود نمک در محیط متخلخل آزمایش را تحت تاثیر قرار ندهد.



شکل ۲. نمای شماتیک از آزمایش طراحی شده

Archive of SID
www.SID.ir

A B C

شکل ۳. شکل ذرات تشکیل دهنده محیط‌های متخلخل گوشه‌دار (A)، ماسه‌ای (B) و کروی (C)

برای ایجاد محیطی همگن پر کردن ستون بصورت لایه به لایه با ضخامت‌های ۳ سانتی متری و اعمال لرزش یکنواخت بر آن در هر مرحله صورت می‌گیرد. با توجه به متفاوت بودن شکل ذرات سعی شده است انرژی لرزشی بگونه‌ای اعمال گردد تا تخلخل حاصله در هر سه نوع خاک حتی الامکان یکسان و برابر ۰/۲۵ باشد. برای جلوگیری از حبس شدن هوا و همچنین ایجاد ساختمانی پایدار در محیط متخلخل، ارتفاع ۳ سانتی متری از آب در طول پروسه پر شدن ستون آزمایش همواره بر روی خاکدانه‌ها اعمال گردیده است (Kanzari, *et al.*, 2015).

اعمال جریان آب خالص و املاح در این آزمایش از طریق بار هیدرولیکی ثابت صورت می‌گیرد. با توجه به اهمیت سرعت و تاثیر بسزایی که بر روی نحوه پخش آلودگی در محیط متخلخل دارد، هر یک از محیط‌های متخلخل تحت اعمال پنج سرعت مورد آزمایش قرار می‌گیرند که تمامی سرعت‌ها در محدوده جریان آرام (دارسی) قرار دارند. بر اساس اندازه‌گیری‌ها هدایت هیدرولیکی محیط A برابر ۰/۲٦۸ سانتی‌متر بر ثانیه، محیط B، ۰/۳۲۲ سانتی‌متر بر ثانیه و محیط C برابر ۰/۵۱۳ سانتی‌متر بر ثانیه است. محلول بکار گرفته شده در این آزمایش محلول ۷ گرم بر لیتر نمک NaCl خالص است و دمای آب و محلول در کلیه آزمایش‌ها ۱۹ درجه سانتی گراد می‌باشد. برخی از مشخصات هیدرولیکی آزمایش در (جدول ۱. **مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها**) ارائه شده است.

اجرای آزمایش

با اعمال بار هیدرولیکی متناسب با دبی (سرعت) مورد نظر، بعد از حدود ٤ ساعت با اندازه‌گیری مکرر دبی جریان، ثبات جریان و تبدیل جریان به حالت ماندگار اتفاق افتاد. سپس در زمان t=0s تزریق املاح با همان دبی آغاز گردید. قطع جریان آب مقطر و تزریق املاح همزمان و بصورت آنی انجام پذیرفت تا در جریان ماندگار در ستون اخلال کمتری بوجود آید. در ادامه داده‌برداری از غلظت جریان در فواصل ۹، ۳۰، ۵۱، ۷۲، ۹۳ سانتی متری از محل تزریق در فواصل زمانی متغیر و متناسب با نمودار رخنه به روش سلف پتانسیل صورت گرفت (Giampaolo, *et al.*, 2016).

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها

متغییر	دبی $\left(\frac{ml}{s}\right)$	عدد رینولدز (–)	سرعت $\left(\frac{m}{s}\right)$
آزمایش ۱	۰/۱۸	۰/٤٥۱	۰/٤٤ ×۱۰$^{-۳}$
آزمایش ۲	۰/۲۵	۰/٦۳٦	۰/٦۲×۱۰$^{-۳}$
آزمایش ۳	۰/۳۰	۰/۷۵۷	۰/۷٤×۱۰$^{-۳}$
آزمایش ٤	۰/۳۵	۰/۸۸٤	۰/۸٦×۱۰$^{-۳}$
آزمایش ۵	۰/٤۰	۱	۰/۹۸×۱۰$^{-۳}$

Archive of SID
www.SID.ir

تزریق املاح با غلظت ۷ گرم در لیتر در کلیه آزمایشات به مدت ۱۷ دقیقه تداوم یافت و بلافاصله پس از قطع دوباره جریان آب مقطر برقرار گردید. زمانیکه املاح کاملاً از داخل ستون شسته شد و مقاومت جریان به مقاومت آب مقطر رسید آزمایش پایان یافت. با داده‌های بدست آمده منحنی رخنه قابل ترسیم است.

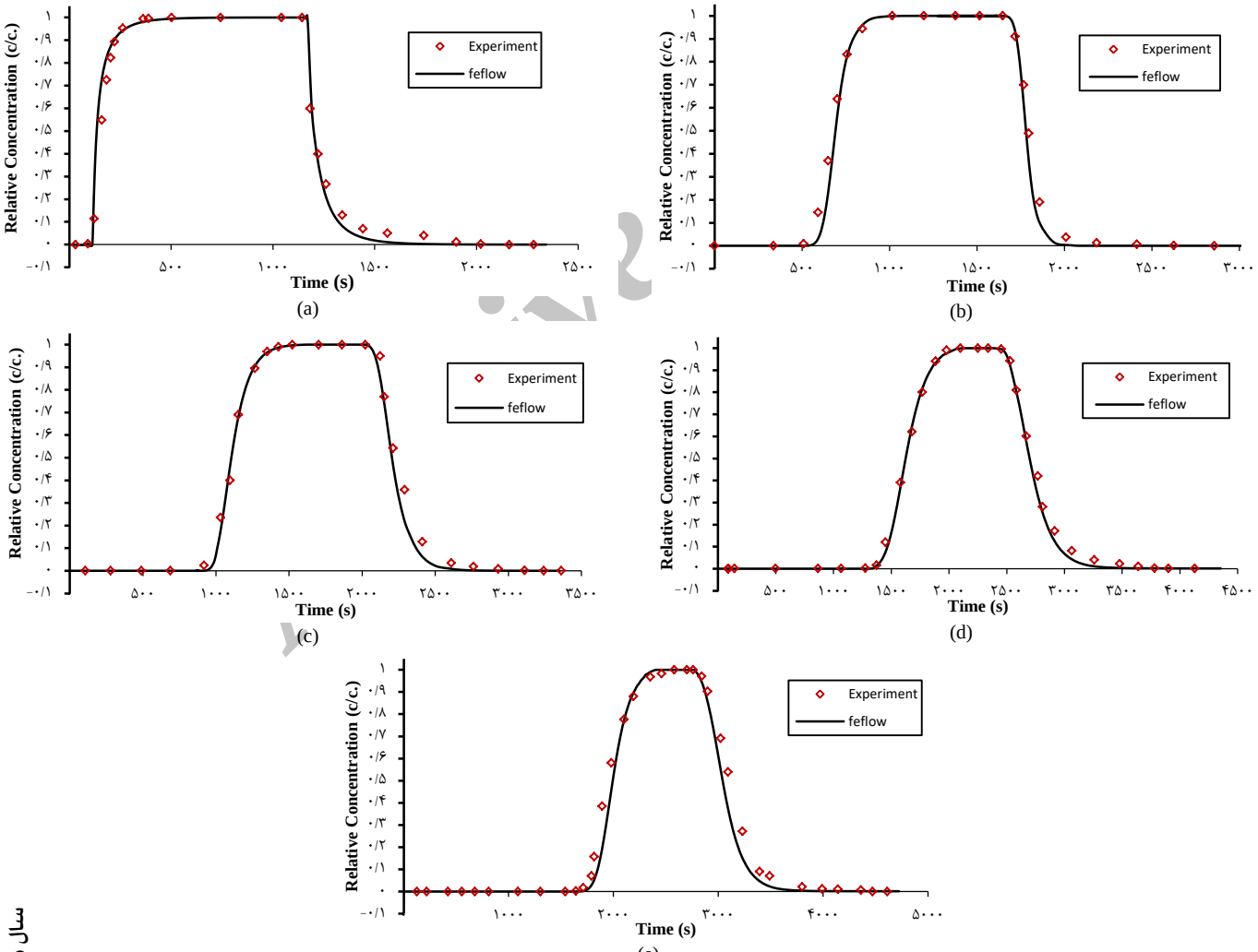
نتایج و بحث

فاکتور شکل ذرات

کمیت فاکتور شکل ذرات برای سه نوع محیط متخلخل بر اساس روش اسپری و پیرس محاسبه گردید که برای محیط A متوسط زاویه محاسبه شده برابر $\alpha_A = 41^o$ ، برای محیط B برابر $\alpha_B = 35^o$ و برای محیط C برابر $\alpha_C = 21^o$ بدست آمد.

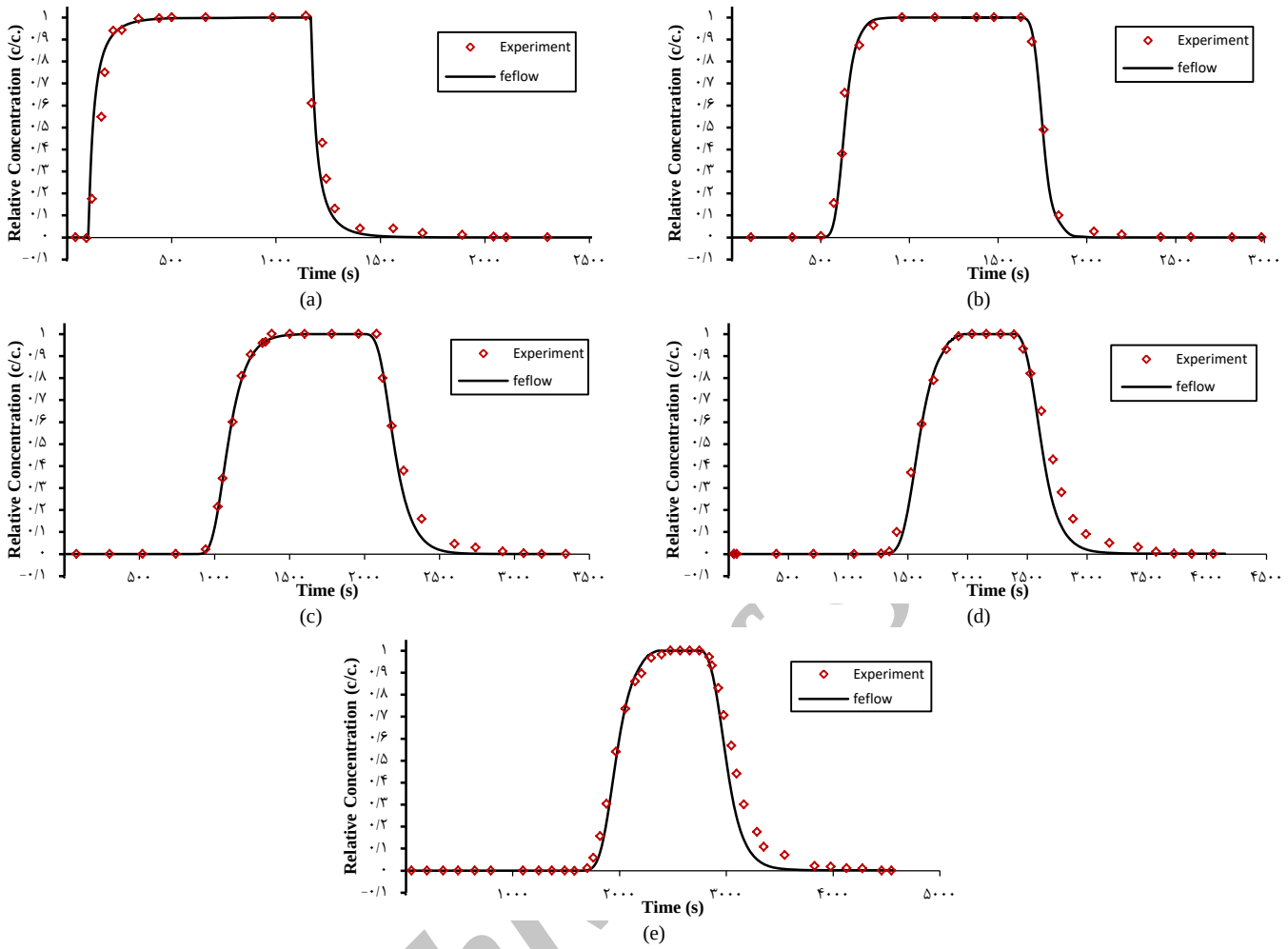
نتایج شبیه‌سازی آزمایش و مقایسه نتایج با داده‌های واقعی

با اجرای آزمایش تزریق محلول در سه ستون به ازای ۵ سطح سرعت و اندازه‌گیری غلظت در ۵ الکترود، ۷۵ منحنی رخنه قابل رسم است. برای تمامی ۷۵ مورد منحنی رخنه رسم و نتایج با داده‌های بدست آمده از آزمایش مورد مقایسه قرار گرفته است..



شکل ٤. منحنی رخنه برای محیط A در سرعت $۰/۷٤ \times ۱۰^{-۳}$ (m/s) در فواصل a ،۹cm b ،۳۰cm c ،۵۱cm d ،۷۲cm e ۹۳cm

www.SID.ir



شکل ۵. منحنی رخنه برای محیط B در سرعت $۰/۷٤ \times ۱۰^{-۳}$ (m/s)؛ در فواصل a) ۹cm، b) ۳۰cm، c) ۵۱cm، d) ۷۲cm، e) ۹۳cm

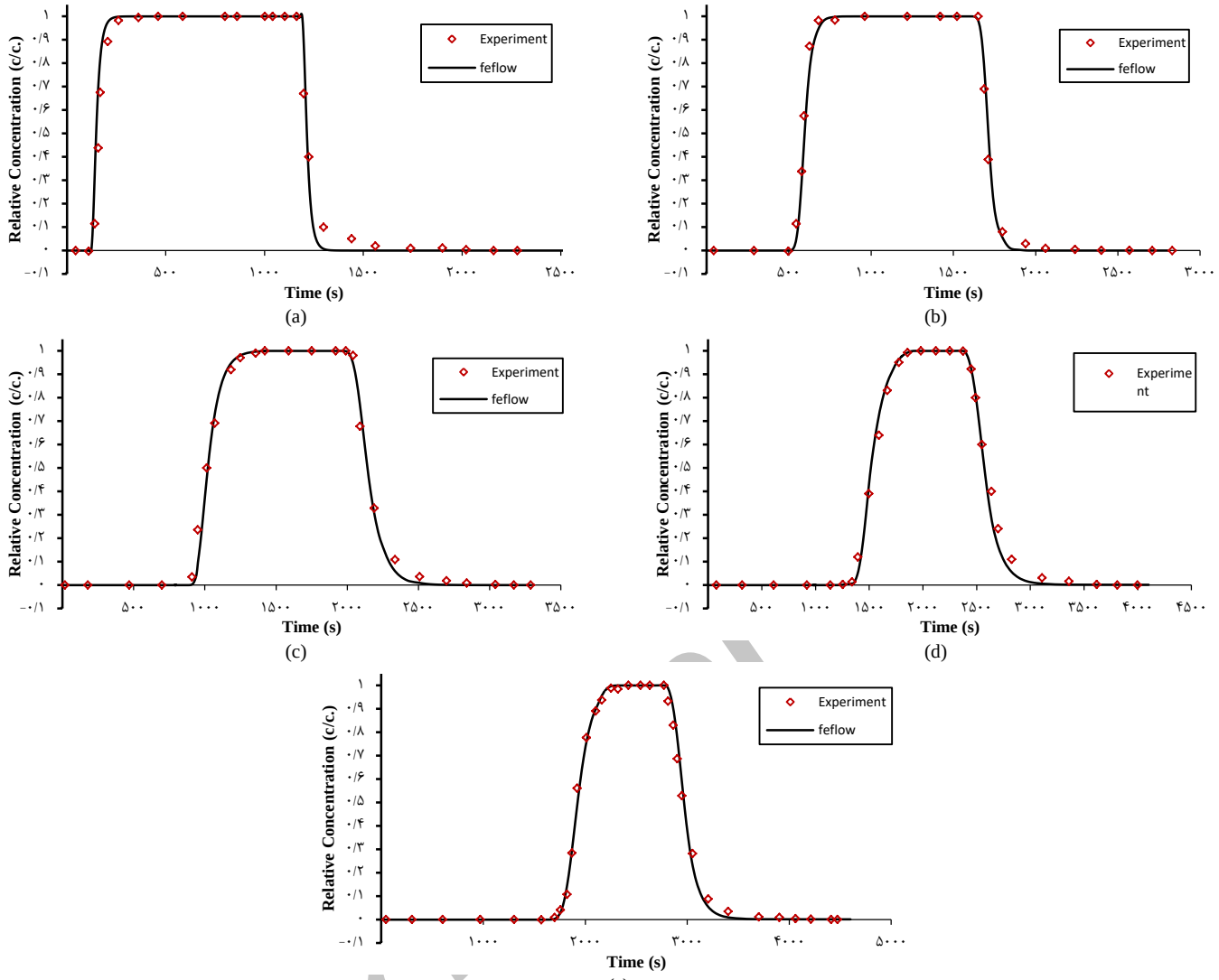
با توجه به محدودیت در نمایش کلیه منحنی‌های رخنه، ۱۵ منحنی به همراه داده‌های آزمایش برای سه محیط متخلخل و یک سطح سرعت و پنج الکترود اندازه‌گیری غلظت جریان در (شکل ٤، شکل ٥ و شکل ٦) و نیز شماتیک نحوه انتشار املاح برای محیط C در (شکل ۷) ارائه شده است. با بررسی نتایج می‌توان انطباق بالای داده‌های آزمایش و نتایج شبیه‌سازی را مشاهده کرد که با توجه به اعتبار شبیه‌ساز FEFLOW که بارها در تحقیقات معتبر پژوهشی به اثبات رسیده است می‌توان به صحت آزمایش‌ها و روش‌های اندازه‌گیری در آن پی برد (Trefry and Muffels, 2007)

تغییرات انتشارپذیری طولی به ازای فاکتور شکل ذرات

نتایج محاسبه ضرایب انتشارپذیری طولی از طریق مدل حل تحلیلی CXTFIT به همراه دقت محاسبات در (جدول ۲) ارائه شده که برای هر سه محیط خطای بسیار اندک محاسبات مشهود است. برای مشاهده تاثیر فاکتور شکل ذرات بر انتشارپذیری طولی، نمودار دو متغیر رسم شده است که در (شکل ۸) به نمایش در آمده است.

با توجه به (شکل ۸) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاکتور شکل ذرات، انتشارپذیری طولی کاهش می‌یابد. فاکتور شکل ذرات بکار رفته همانطور که قبلاً اشاره شد متاثر از زبری و شکل خاکدانه‌هاست که با تمهیداتی که در آزمایش در نظر گرفته شده، زبری خاکدانه‌ها در هر سه خاکدانه با هم برابر است لذا می‌توان نتیجه گرفت هر چه شکل ذرات به حالت کروی نزدیکتر باشند انتشارپذیری طولی محیط افزایش خواهد یافت.

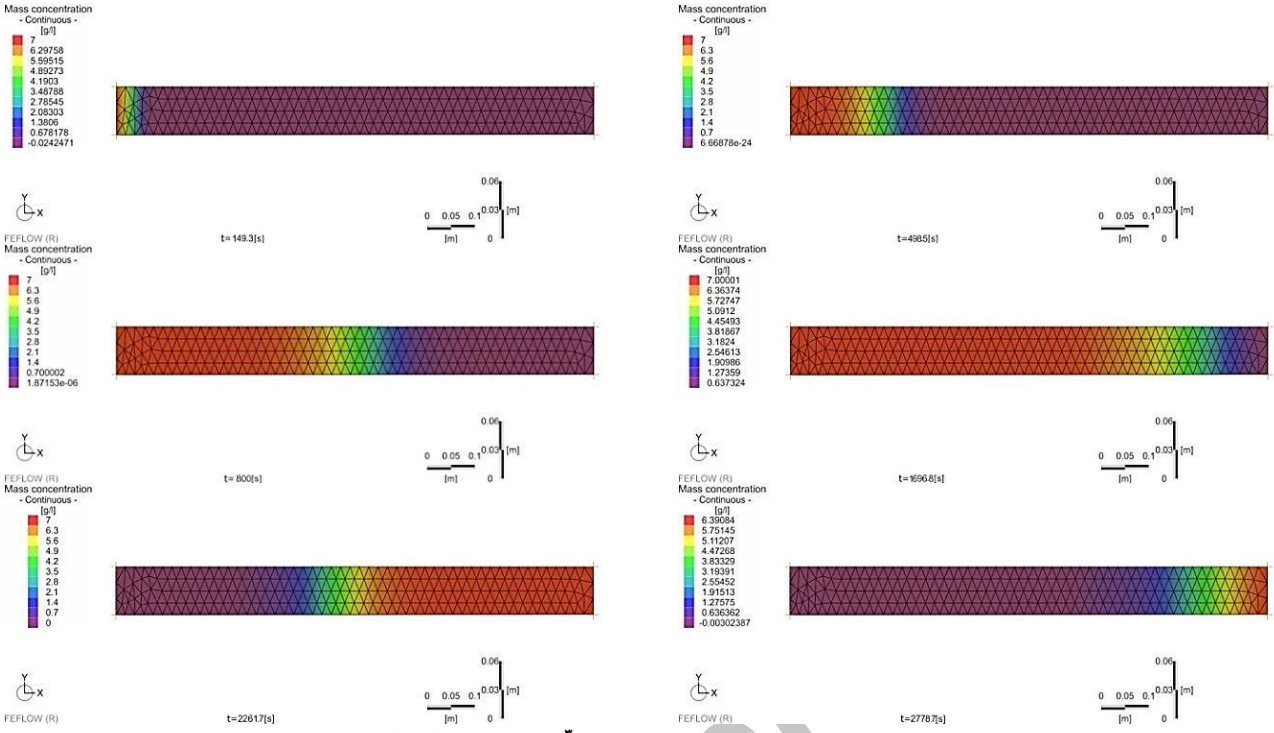
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ٦. منحنی رخنه برای محیط C در سرعت $^{-3}$ ۱۰ × ۰/۷٤ (m/s)؛ در فواصل a) ۹cm، b) ۳۰cm، c) ۵۱cm، d) ۷۲cm، e) ۹۳cm

تقریباً تمامی نمودارهای شکل ۸ یک روند را در تغییرات انتشارپذیری طولی به ازای تغییر فاکتور شکل ذرات نشان می‌دهد. تحقیقات صورت گرفته توسط Pugliese و همکاران (۲۰۱۳) و Delgado، (۲۰۰۷) نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. کاهش انتشارپذیری طولی از محیط C به B دارای شیب بیشتری نسبت به تغییرات این کمیت از B به A است. بهترین تابع برای تخمین رابطه بین اکثر نقاط بدست آمده یک سه جمله‌ای درجه دو با ضریب تعیین برابر یک است. در واقع با خارج شدن شکل ذرات از حالت کروی اولاً سطح تماس املاح با محیط افزایش می‌یابد و ثانیاً املاح با طی مسیر پر پیچ و خم‌تری از محیط متخلخل خارج می‌گردند. با توجه به شکل ذرات محیط A، که از ذرات تیزگوش و شکسته تشکیل شده است می‌توان پیش بینی نمود که املاح در ارتباط بیشتر با سطح محیط قرار گرفته و جذب سطحی و تنش بین سطوح محیط و املاح مانع انتشار سریع آن می‌گردد و علاوه بر آن فضای خالی بین ذرات بسیار پیچیده و نامنظم است و در بسیار موارد بعضی حفرات در بارهای هیدرولیکی بالا قادر به انتقال املاح از خود می‌باشند. برای محیط با ذرات کروی دقیقاً عکس موارد فوق صادق است.

www.SID.ir

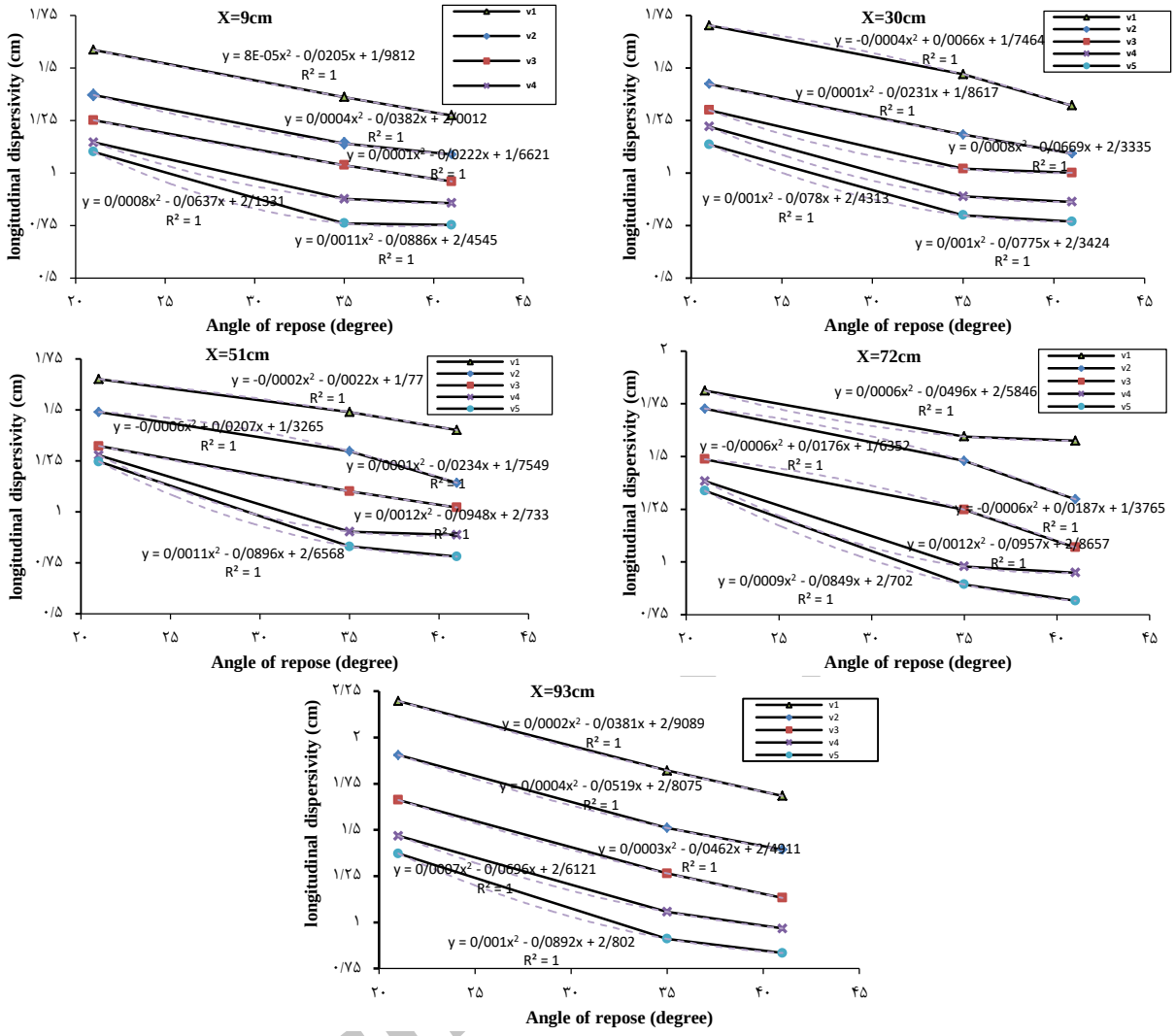


شکل ۷. شماتیک نحوه انتشار املاح با سرعت جریان $۰/۷٤ \times ۱۰^{-۳}$ (m/s) برای محیط C

جدول ۲. انتشارپذیری طولی و دقت محاسبات

نوع محیط	X (cm)	$V_1 = 0.44\times10^{-3}\left(m/s\right)$			$V_2 = 0.62\times10^{-3}\left(m/s\right)$			$V_3 = 0.74\times10^{-3}\left(m/s\right)$			$V_4 = 0.86\times10^{-3}\left(m/s\right)$			$V_5 = 0.98\times10^{-3}\left(m/s\right)$		
		α_x (cm)	RMSE (cm)	R^2 (–)	α_x (cm)	RMSE (cm)	R^2 (–)	α_x (cm)	RMSE (cm)	R^2 (–)	α_x (cm)	RMSE (cm)	R^2 (–)	α_x (cm)	RMSE (cm)	R^2 (–)
A	۹	۱/۲۷٤	۰/۰۵۷	۰/۹٦۰	۱/۰۸۹	۰/۰۹۲	۰/۹۳۲	۰/۹٦۰	۰/۰٤۵	۰/۹۷۵	۰/۸۵۷	۰/۰۹۳	۰/۹۳۱	۰/۷۵۳	۰/۰۸٤	۰/۹٤۳
	۳۰	۱/۳۲۱	۰/۰۷۳	۰/۹٤٦	۱/۰۹۳	۰/۰٦۲	۰/۹۷۵	۰/۰۰۱	۰/۰٦۲	۰/۹۵۹	۰/۸٦۳	۰/٤۹	۰/۹۷٦	۰/۷٦۹	۰/۱۰۱	۰/۹۱۹
	۵۱	۱/٤۰۱	۰/۰۸۸	۰/۹٤٤	۱/۱٤۲	۰/۰۵۹	۰/۹٦۳	۱/۰۲۲	۰/۰۵۷	۰/۹٦۱	۰/۸۸۸	۰/۰۹٤	۰/۹۳۱	۰/۷۸۱	۰/۰۵۸	۰/۹٦۷
	۷۲	۱/۵۷۵	۰/۰۸۵	۰/۹٤۱	۱/۲۹۷	۰/۰۹۱	۰/۹۳٦	۱/۰٦۹	۰/۰۸۳	۰/۹۳۸	۰/۹٤۹	۰/۰۸٤	۰/۹٤۱	۰/۸۱٦	۰/۰۹۹	۰/۹۲۲
	۹۳	۱/٦۸٤	۰/۰٦۷	۰/۹۵۳	۱/۳۹۳	۰/۰۵۲	۰/۹۷۱	۱/۱۳۳	۰/۰۵۰	۰/۹٦۸	۰/۹٦۷	۰/۰۷۳	۰/۹٤۹	۰/۸۳٤	۰/۰۷۳	۰/۹۵۱
B	۹	۱/۳٦۱	۰/۰۸۳	۰/۹٤۱	۱/۱٤۱	۰/۰۷۷	۰/۹٤٤	۱/۰۳۷	۰/۰۹۲	۰/۹۳٤	۰/۸۷۷	۰/۰۷۵	۰/۹٤۹	۰/۷٦۱	۰/۰۵۹	۰/۹٦۲
	۳۰	۱/٤۷۰	۰/۰۷٤	۰/۹٤۸	۱/۱۸۳	۰/۰۹۳	۰/۹۳۱	۱/۰۲۰	۰/۰۵۱	۰/۹٦۹	۰/۸۸۹	۰/۰٦۰	۰/۹٦۳	۰/۷۹۹	۰/۰٤۳	۰/۹۷۹
	۵۱	۱/٤۹۰	۰/۱۰۷	۰/۹۱٤	۱/۲۹۸	۰/۰٦٤	۰/۹۵۵	۱/۱۰۱	۰/۰۷٤	۰/۹٤٦	۰/۹۰۳	۰/۱۱۲	۰/۹۱۱	۰/۸۳۱	۰/۰۷۲	۰/۹۵۲
	۷۲	۱/۵۹۵	۰/۰۹۲	۰/۹۳۲	۱/٤۷۹	۰/۰۵۲	۰/۹۷۳	۱/۲٤۸	۰/۰۵۰	۰/۹۷۸	۰/۹۷۹	۰/۰۹٤	۰/۹۳۱	۰/۸۹۳	۰/۰۸۹	۰/۹٤۳
	۹۳	۱/۸۲۱	۰/۰٦٤	۰/۹٦۰	۱/۵۱۱	۰/۰۸۹	۰/۹۳۵	۱/۲٦۵	۰/۰۸۱	۰/۹٤۳	۱/۰۵۷	۰/۰۹۷	۰/۹۲۲	۰/۹۱۱	۰/۰۹۱	۰/۹۳۵
C	۹	۱/۵۸٦	۰/۰٦۸	۰/۹٤۵	۱/۳۷۱	۰/۰٦۸	۰/۹۵٤	۱/۲۵۱	۰/۰۸۰	۰/۹٤٤	۱/۱٤٦	۰/۰۸۷	۰/۹۳۷	۱/۱۰۱	۰/۱۱۰	۰/۹۱۲
	۳۰	۱/۷۰۲	۰/۱۰۵	۰/۹۱۷	۱/٤۲۳	۰/۰۷۲	۰/۹٤۹	۱/۲۹۹	۰/۰۸۱	۰/۹٤٤	۱/۲۲۱	۰/۰۸۸	۰/۹۳۵	۱/۱۳٦	۰/۰۹۵	۰/۹۳۰
	۵۱	۱/٦۵۱	۰/۰۷۵	۰/۹٤۷	۱/٤۹۰	۰/۰۹۲	۰/۹۳۲	۱/۳۲۳	۰/۰۵۱	۰/۹۷۵	۱/۲۷۸	۰/۰۷٤	۰/۹٤۹	۱/۲٤۷	۰/۰۸٤	۰/۹٤۳
	۷۲	۱/۸۱۲	۰/۰۵۹	۰/۹٦۱	۱/۷۲۷	۰/۰٦۱	۰/۹٦۰	۱/٤۸۷	۰/۰۹٤	۰/۹۳۱	۱/۳۸۳	۰/۰۹۱	۰/۹۳۲	۱/۳۳۸	۰/۱۰۵	۰/۹۱۷
	۹۳	۲/۱۹۷	۰/۰۷۸	۰/۹٤٦	۱/۹۰۵	۰/۰۵۲	۰/۹۷٦	۱/٦٦۲	۰/۰۸۵	۰/۹٤۱	۱/٤٦۸	۰/۰٦۷	۰/۹۵٤	۱/۳۷۲	۰/۰۵۰	۰/۹۷۹

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸. تاثیر فاکتور شکل ذرات بر انتشارپذیری طولی املاح

تغییرات انتشارپذیری طولی به ازای تغییرات سرعت

با توجه به (شکل ۹) در کلیه سطوح سرعت در تمامی فواصل از محل تزریق انتشارپذیری طولی به ازای افزایش سرعت کاهش یافته است. تحقیقات صورت گرفته توسط Delgado، (۲۰۰۷) نیز مؤید این موضوع است. اصلی‌ترین عامل در کاهش انتشارپذیری طولی با افزایش سرعت، این است که با افزایش بار هیدرولیکی خلل و فرج بسیار ریز محیط نیز مجبور به شرکت در انتقال جریان هستند، در واقع به ازای افزایش سطح تماس بسیار زیاد مشارکت کمی در انتقال املاح ایجاد می‌گردد. در شیب ملایم کاهش ابتدایی در نمودارهای (شکل ۹) ابتدا خلل و فرج بسیار ریز محیط نقشی در انتقال املاح ندارند. با افزایش بار فشار هیدرولیکی و شرکت حفرات ریز محیط در پدیده انتقال شیب منفی افزایش می‌یابد و در انتهای نمودار با به حداکثر رسیدن مشارکت خلل و فرج در انتقال جریان و املاح دوباره شیب منفی کاهش می‌یابد. با این استدلال انتظار می‌رود با افزایش سرعت جریان (جریان غیر دارسی) حتی ممکن است شاهد افزایش انتشارپذیری طولی نیز باشیم. بدلیل وجود حفرات بسیار نامنظم و ریز در محیط A، سهم این محیط در شیب کلی کاهش انتشارپذیری طولی بیشتر از محیط B، و در محیط B، بیشتر از محیط C است.

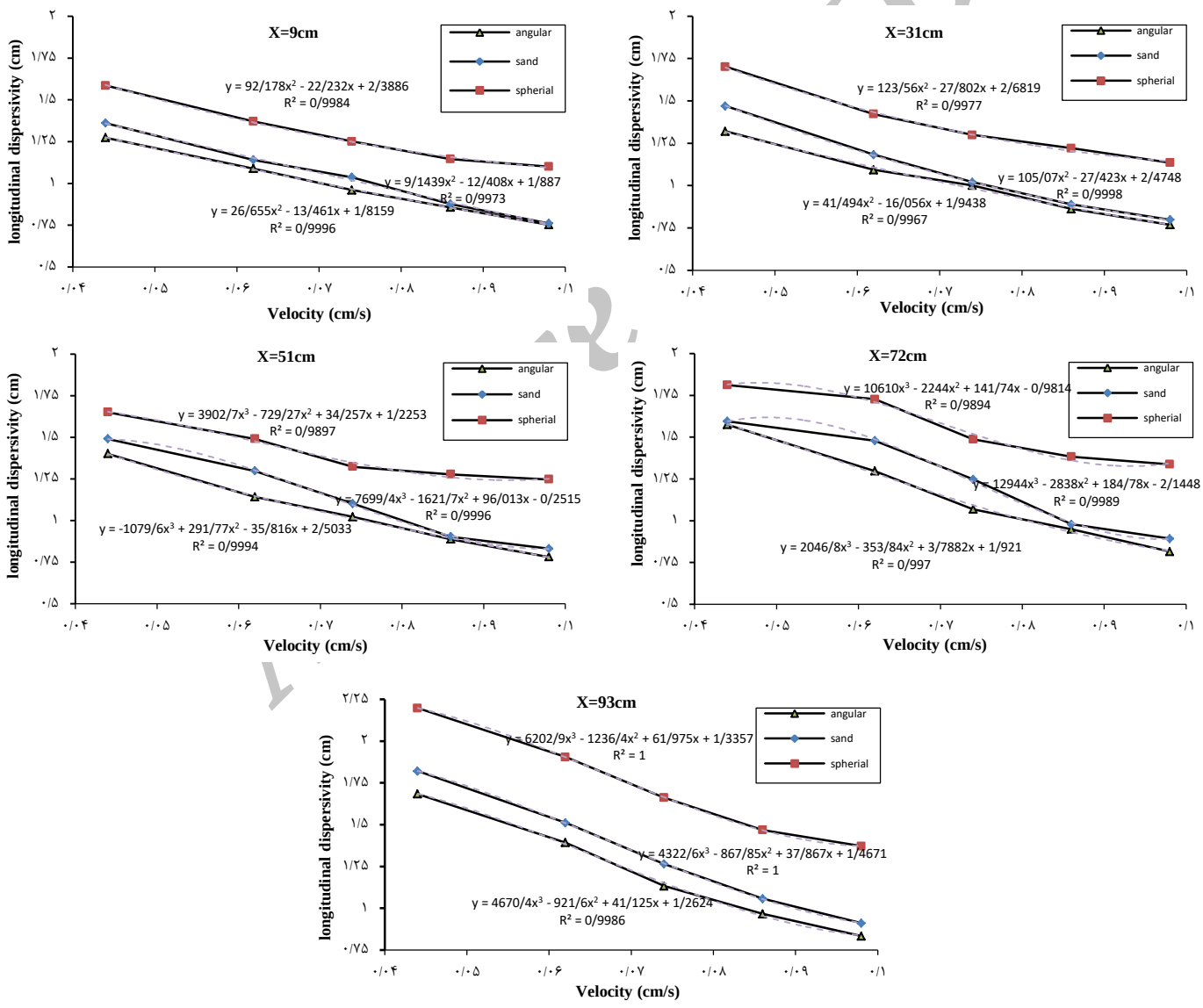
نکته دیگر در نمودارهای (شکل ۹) این است که در کلیه سطوح سرعت، انتشارپذیری طولی محیط C نسبت

www.SID.ir

به دو محیط دیگر با فاصله نسبتاً زیادی بزرگتر است که نشان می‌دهد با خروج شکل ذرات از حالت کروی به شدت انتشارپذیری طولی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در تمامی نمودارها بهترین برازش تابع چهار جمله‌ای از درجه سه یا تابع سه جمله‌ای از درجه دو است.

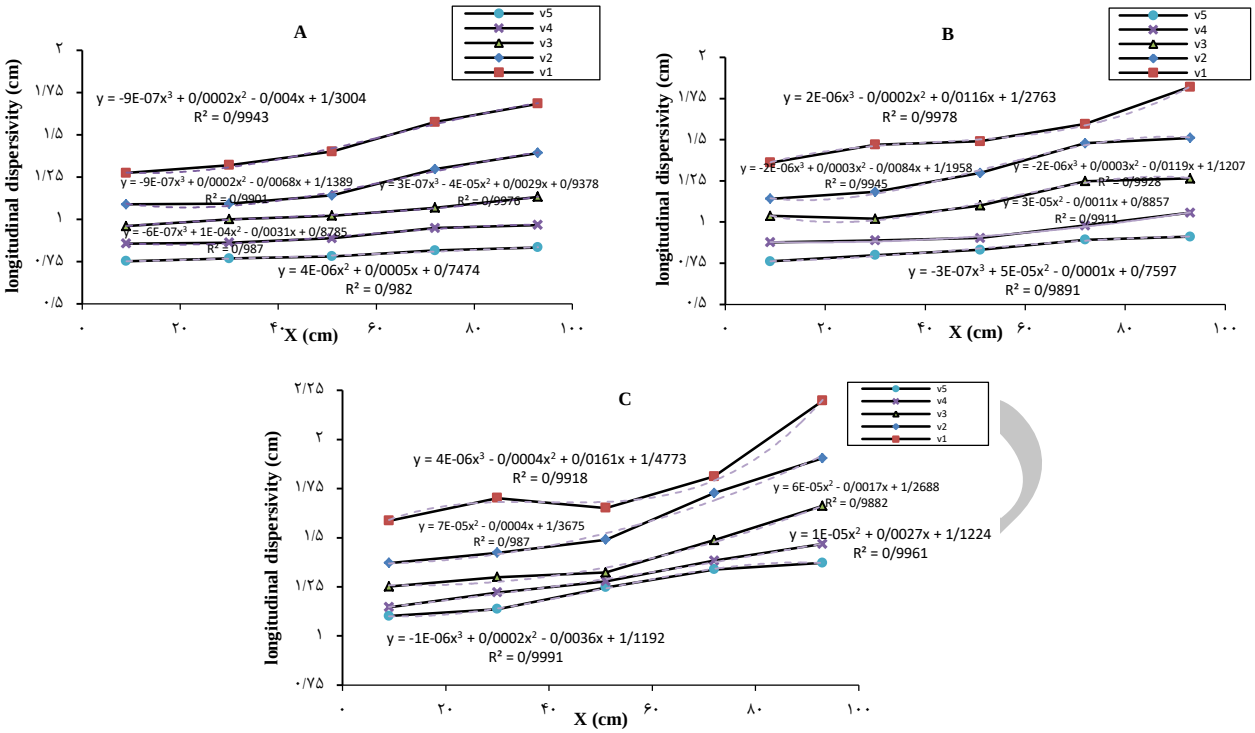
تاثیر متقابل فاکتور شکل و عامل مقیاس بر انتشارپذیری طولی

با توجه به (شکل ۱۰) می‌توان به وضوح افزایش انتشارپذیری طولی با فاصله گرفتن از منبع تزریق را برای هر سه محیط A، B و C مشاهده کرد. با این تفاوت که میزان تغییرات انتشارپذیری طولی ($\Delta\alpha_x$) برای محیط C بیشتر از B و برای محیط B، بیشتر از A است. بنابراین در محیط‌هایی که شکل خاکدانه‌ها به حالت کروی متمایل‌تر است تاثیر عامل مقیاس بیشتر است و انتشارپذیری طولی در انتهای ستون افزایش بیشتری خواهد داشت. بهترین برازش برای نمودارهای مربوطه غالباً تابع چهار جمله‌ای از درجه سه است.



شکل ۹. تاثیر سرعت جریان بر انتشارپذیری طولی

www.SID.ir



شکل ۱۰. تاثیر عامل مقیاس بر انتشارپذیری طولی املاح در محیط‌های متخلخل A، B و C

نتیجه‌گیری

فاکتور شکل ذرات محیط متخلخل تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر انتشارپذیری طولی آلاینده‌ها دارد. هر چه ذرات یک محیط متخلخل کروی‌تر باشند سطح تماس جریان و آلاینده‌ها با محیط متخلخل به حداقل مقدار خواهد رسید و علاوه بر آن خلل و فرج پیوسته‌ای که در انتقال املاح نقش موثری ایفاء می‌کنند از پیچ و خم کمتری برخوردار خواهد بود.

با افزایش سرعت جریان در محدوده جریان دارسی انتشارپذیری طولی آلاینده‌ها در محیط کاهش می‌یابد و این کاهش در محیط دارای ذرات شکسته و تیز گوش بیشتر است و دلیل آن ساختمان نامرتب ذرات شکسته و تشکیل خلل و فرج در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف است که در سرعت‌های بالا مشارکت خلل و فرج بسیار ریز محیط در انتقال جریان و آلاینده، انتشارپذیری طولی را کاهش می‌دهد. حال آنکه در محیط با ذرات کروی، مجاری عبور جریان یک دست‌تر است و تغییرات انتشارپذیری طولی با افزایش سرعت کمتر می‌باشد.

تاثیر مقیاس بر افزایش انتشارپذیری طولی بار دیگر در این تحقیق به اثبات رسید و علاوه بر آن مشاهده شد که با افزایش فاکتور شکل ذرات نرخ افزایش انتشارپذیری طولی کاهش می‌یابد. یا به عبارت دیگر در ذرات کروی تاثیر عامل مقیاس در افزایش انتشارپذیری طولی بیشتر است.

منابع مورد استفاده

Bandai, T., Hamamoto, S., Rau, G.C., Komatsu, T., and Nishimura, T. 2017. The effect of particle size on thermal and solute dispersion in saturated porous media. International Journal of Thermal Sciences, 122: 74–84.

Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover civil and mechanical engineering Series, New York, 764 pp.

Archive of SID
www.SID.ir

Bear, J, and Verruijt, A. 1987. Modelling Groundwater flow and Pollution. McGraw-Hill. Book Company. 414 pp.
Carberry, J.J, and Bretton, R.H. 1958. Axial dispersion of mass inflow through fixed beds. American Institute of Chemical Engineers Journal, 4:367–375.
Carvalho, J.R.F., and Delgado, J.M.P.Q. 2003. Effect of Fluid Properties on Dispersion in Flow through Packed Beds. American Institute of Chemical Engineers Journal, 49(8): 1980-1985.
Choudhary, M., Szekely, J., and Weller, S.W. 1976. The effect of flow maldistribution on conversion in a catalytic packed bed reactor. American Institute of Chemical Engineers, 22(6):1021−1032.
Delgado, J.M.P.Q. 2005. A critical review of dispersion in packed beds. Heat and Mass Transfer, 42(4): 279–310.
Delgado, J. M. P. Q. 2007. Longitudinal and Transverse Dispersion in Porous Media, Chemical Engineering Research and Design., 85(9): 1245–1252.
Ebach, E.A, and White, R.R. 1958. Mixing of fluids flowing through beds of packed solids. AIChE J, 4:161-169.
Giampaolo, V., Calabrese, D., and Rizzo, E. 2016. Transport Processes in Porous Media by Self-Potential Method. Applied and Environmental Soil Science, 2016:1-12.
Ginn, T.R., Tartakovsky, D.M., and Wood, B.D. 2009. Special issue on fundamental advances in modeling dispersion in porous media. Advances in Water Resources, 32(5): 633–634.
Grillo, A., Logashenko, D., Stichel, S., and Wittum, G. 2010. Simulation of density-driven flow in fractured porous media. Advances in Water Resources, 33(12): 1494–1507.
Hiby, J.W. 1962. Longitudinal dispersion in single-phase liquid flow through ordered and random packing. Interact between Fluid and Particles, (London Institute of Chemical Engineers):312–325
Ikni, T., Benamar, A., Kadri, M., Ahfir, N.D., and Wang, H.Q. 2013. Particle transport within water-saturated porous media: Effect of pore size on retention kinetics and size selection. Comptes Rendus Geoscience, 345(9-10): 392–400.
Jamshidzadeh, Z., Tsai, F.T.C., Mirbagheri, S.A., and Ghasemzadeh, H. 2013. Fluid dispersion effects on density-driven thermohaline flow and transport in porous media. Advances in Water Resources, 61: 12–28.
Kanzari, S., Hachicha,, M., and bouhlila R .2015 .Laboratory method for estimating solute transport parameters of an unsaturated soil. Geochemistry Geophysics Geosystems, 1(4):151-156.
Lehmann, P., Berchtold, M., Ahrenholz, B., Tölke, J., Kaestner, A., Krafczyk, M., and Künsch, H.R. 2008. Impact of geometrical properties on permeability and fluid phase distribution in porous media. Advances in Water Resources, 31(9): 1188–1204.
Leij, F. J., Skaggs, T. H., and Van Genuchten, M. T. 1991. Analytical Solutions for Solute Transport in Three-Dimensional Semi-infinite Porous Media. Water Resources Research, 27(10): 2719–2733.
Mehmani, A., and Prodanović, M. 2014. The effect of micro porosity on transport properties in porous media. Advances in Water Resources, 63(1): 104–119.
Perovic, N., Frisch, J., Salama, A., Sun, S., Rank, E., and Mundani, R. P. 2017. Multi-scale high-performance fluid flow: Simulations through porous media. Advances in Engineering Software, 103: 85–98.
Porta, G.M., Riva, M., and Guadagnini, A. 2012. Up scaling solute transport in porous media in the presence of an irreversible bimolecular reaction. Advances in Water Resources, 35(1): 151–162.
Porter, M.L., Valdés-Parada, F.J., and Wood, B.D. 2010. Comparison of theory and experiments for dispersion in homogeneous porous media. Advances in Water Resources, 33(9): 1043–1052.
Pugliese, L., Poulsen, T.G., and Andreasen, R.R. 2012. Relating Gas Dispersion in Porous Media to Medium Tortuosity and Anisotropy Ratio. Water, Air, and Soil Pollution, 223(7): 4101–4118.
Pugliese, L., Poulsen, T.G., and Straface, S. 2013. Gas–Solute Dispersivity Ratio in Granular Porous Media as Related to Particle Size Distribution and Particle Shape. Water Air and Soil Pollution, 224(9): 1691-1702.
Pugliese, L., and Poulsen, T.G. 2014. Estimating Solute Dispersion Coefficients in Porous Media at Low Pore Water Velocities. Soil Science, 179(4):175-181.
Sperry, J.M., and Peirce, J.J. 1995. A Model for Estimating the Hydraulic Conductivity of Granular Material Based on Grain Shape, Grain Size, and Porosity. Ground Water, 33(6): 892–898.
Strang, D.A., and Geankopolis, C.J. 1958. Longitudinal diffusivity of liquids in packed beds. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 50:1305–1308.
Tang, G., Mayes, M., Parker, J., and Jardine, P. 2010. CXTFIT/Excel–A modular adaptable code for parameter estimation, sensitivity analysis and uncertainty analysis for laboratory or field tracer experiments. Computers and Geosciences, 36(1): 1200-1209.
Toride, N., Leij, F.J., and van Genuchten, M.T.h. 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Version 2.0. U.S. Salinity Laboratory. Agricultural Research Services, U. S. Department of Agriculture, Riverside, 121pp.

Archive of SID
www.SID.ir

Trefry, M.G., and Muffels, C. 2007. FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. Ground Water, 45(5): 525–528.

Van Genuchten, M.Th., Wierenga, P.J., and O'Connor, G.A. 1977. Mass transfer studies in sorbing porous media: III. Experimental evaluation with tritium. Soil Science Society of America Journal. 41(2), 272–278.

Archive of SID

www.SID.ir

ISSN 2251-7480

The effect of particle shape of porous media on the longitudinal dispersivity: contaminant transport

Ghasem Mirzaei[1*]

1[*]) MSc of Water Structure Engineering, Instructor, Meshgin Shahr Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran
[*]Corresponding author email: ghasem.mirzaei@uma.ac.ir

Received: 10-12-2017 Accepted: 04-03-2018

Abstract

One of the most challenging quantities in analyzing the transfer of contaminant in the porous medium is the determination of longitudinal dispersivity. In this research, the effects of the porous media particle shape on the longitudinal dispersivity were investigated by experiments on three column of soil (broken texture, river sand, spherical texture). Flow and contaminant (NaCl) were injected at five levels of velocities and the Breakthrough curve was extracted at five points along the column by Self-Potential Method, Then, by simulating the results with FEFLOW software and the inverse analysis with CXTFIT2 software, longitudinal dispersivity was determined. The results indicate that, for constant velocity, the medium with spherical texture has a longitudinal dispersivity greater than the other two medium and in the sandy medium it is more than the broken texture. This can be due to the increase in the contact surface as well as the path's tortuosity, with the particle coming out of the spherical shape. With increasing velocity, the longitudinal dispersivity decreases in all three medium. Also, as the particles are closer to the spherical shape, the scale effect will be greater, and with increasing velocity, the decrease in the longitudinal dispersivity in these medium will be less.

Keywords: breakthrough curve, CXTFIT, FEFLOW, particle shape, self-potential method

Archive of SID
www.SID.ir