

کاربرد روش پردازش تصاویر برای تعیین هاله آلودگی در محیط‌های متخلخل

محمد رضا فدائی تهرانی^۱، فرهاد شفیعی^۲، راحله فیضی^۳

۱- عضو هیئت علمی مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) mrft1359@gmail.com

۲- دانشجوی دکترای میکروبیولوژی، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران
۳- کارشناس ارشد رشته عمران گرایش مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

(دریافت ۹۵/۴/۳۰ پذیرش ۹۵/۵/۲۵)

چکیده

تعیین گستره و سرعت توسعه هاله آلودگی در منابع آب گامی اساسی در طراحی شیوه پاکسازی است. این فرایند به‌ویژه برای منابع آب زیرزمینی به دلیل دسترسی دشوار و تعدد متغیرها پیچیده است. در پژوهش حاضر، روش پردازش تصاویر برای تعیین ناحیه آلودگی و تحلیل میزان پخش مواد همراه جریان تراوش در محیط متخلخل پیشنهاد شده است. علاوه بر الگوریتم پردازش تصاویر در نرم‌افزار MATLAB، از تحلیل کمترین مجموع مربعات و حل معادله پخش نیز استفاده شد و ضرایب هیدرودینامیکی پخش در بسترهای متخلخل در محدوده وسیعی از زمان و مکان بدون ایجاد اغتشاش و با دقت قابل قبول محاسبه شد. تحلیل و راستی‌آزمایی نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب و محدود بودن خطا به کمتر از ۱۱ درصد بود، لذا این روش در مطالعه پدیده پخش از کارایی لازم برخوردار است. در این پژوهش تخمین ضریب پخش‌پذیری به‌عنوان تابعی از مشخصات محیط متخلخل و عدد پکله ارائه شد، به‌طوری که این ضریب در محیط با دانه‌بندی بین ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر در دامنه ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۲۸ متر به‌دست آمد که نشانگر تأثیر زیاد دانه‌بندی بر روی ضریب پخش‌پذیری است.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصاویر، ضرایب پخش، تصفیه درجا، آب زیرزمینی، هاله آلودگی، محیط‌های متخلخل

۱- مقدمه

و رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی مخارج سنگینی داشته و نیاز به روش‌های پیچیده است. یکی از روش‌های متداول قدیمی جهت رفع آلودگی موجود در منابع آب زیرزمینی، پمپاژ آن به سطح زمین و تصفیه می‌باشد که با مصرف انرژی و هزینه بالا و موفقیت محدود روبرو بوده است (Bailey et al. 1999; Thiruvengkatacharia et al. 2008).

در سال‌های اخیر روش‌های تصفیه درجا^۱ در حوزه محیط‌زیست به‌ویژه در پاکسازی^۲ منابع آب زیرزمینی توسعه یافته است. در این روش‌ها تعیین گستره و نحوه انتشار آلودگی (یا مواد عامل تصفیه که در ادامه از تکرار آن خودداری می‌گردد) از اقدامات اساسی بوده و در تعیین موفقیت عملیات پاکسازی به‌ویژه در کاهش هزینه‌ها و

امروزه با رشد جمعیت و فناوری، نیاز فزاینده به آب‌های زیرزمینی به‌وجود آمده است. رشد فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و از سوی دیگر عدم توجه به استانداردهای محیط‌زیست موجب ورود مقادیر زیادی از آلاینده‌های مختلف به منابع آب زیرزمینی و تخریب جدی آن شده است. به‌طوری که آلودگی خاک و آب زیرزمینی به‌وسیله آلاینده‌های آلی و معدنی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی قرن حاضر تلقی می‌شود (Lapworth et al. 2012). فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌های شهری باعث ورود انواع آلودگی‌ها به منابع آب زیرزمینی شده است که مهم‌ترین انواع آن شامل نیترات، مشتقات نفتی، شوینده‌ها، فلزات سنگین، کودها و آفت‌کش‌ها می‌باشد (Fadaei et al. 2014, 2015). احیاء

¹ In situ

² Remediation

غیررسمی تبدیل می‌کند (Fadaei et al. 2015). در موفقیت طرح‌های پاکسازی به روش PRB، تحلیل و محاسبه نحوه حرکت هاله آلودگی یا انتقال مواد در محیط متخلخل از نکات اساسی است. اهداف اصلی پژوهش حاضر شامل ۱- ساخت مدل فیزیکی دو بعدی محیط متخلخل شفاف جهت فراهم‌سازی تصاویر لازم از حرکت هاله آلودگی برای سرعت‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف، ۲- توسعه الگوریتم پردازش تصاویر و انطباق حداکثری ماتریس پخش به کمک کمترین مجموع مربعات، و ۳- مطالعه تأثیر مشخصه‌های جریان در محیط متخلخل بر ضرائب پخش و نحوه انتشار هاله آلودگی می‌باشد.

در مطالعه حاضر به‌طور مشخص بر ارائه روش جدید جهت محاسبه شدت توسعه هاله آلودگی و همچنین انتقال مواد عامل تصفیه به محل آلودگی تمرکز شد و ترکیب روش پردازش تصاویر و کمترین مجموع مربعات به‌صورت نوآورانه در محاسبه ضرائب پخش به‌کار گرفته شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

تاکنون روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای شبیه‌سازی نحوه انتقال آلاینده‌ها و مواد در محیط متخلخل ارائه شده است که برخی از این مطالعات تنها شامل بررسی جریان‌های یک بعدی در محیط می‌شود و در برخی، تشکیل جریان در محیط دو یا سه بعدی بررسی شده‌اند (Oswald & Kinzelbach 2003). نتایج ارائه شده در تحقیقات مختلف نشان‌دهنده پیچیدگی شبیه‌سازی آزمایشگاهی جریان در محیط متخلخل است که بیشتر به‌علت عدم امکان شناخت و کنترل کامل شرایط مرزی مدل آزمایشگاهی ایجاد می‌شود. مدل‌های آزمایشگاهی متداولی که برای شبیه‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل به‌کار می‌روند، نظیر مدل هله شاو، مدل الکتریکی و مدل جعبه شنی، هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. استفاده از جعبه شنی برای مطالعه دینامیک جریان در محیط متخلخل، امکان تشکیل محیط ناهمگن یا ناهمسان را فراهم می‌آورد؛ اما انعطاف‌پذیری زیادی نداشته و اطلاعات پنهان در محیط قابل مشاهده و اندازه‌گیری نیست. در سال ۱۹۸۹ به‌منظور مطالعه اثر ناهمگنی محیط و الگوی جریان دوفازی در محیط

ریسک مخاطرات زیست محیطی حائز اهمیت است (Fadaei 2015).

در دو دهه گذشته در اکثر کشورهای پیشرفته دنیا بررسی مکان‌های آلوده و نشت آلاینده‌ها در آب زیرزمینی، رو به افزایش بوده است و مکان‌های زیادی نیازمند تصفیه هستند. در ایران آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات در مناطق کشاورزی یا مراکز پرجمعیت نظیر شهر مشهد، شهر بابل، دشت ایذه، شهر ارومیه و آبخوان شهرکرد گزارش شده است (Mahmoodian 1985; Mohseni 1986; Naseri & Alijani 2002; Nanbakhsh 2001; Lalezari 2008).

در مورد سایر آلاینده‌ها نیز مطالعات متعددی صورت گرفته است که می‌توان به مطالعه تویسرکانی درباره آلودگی آلی آب‌های زیرزمینی شهر تهران اشاره نمود که در آن مشخص شد که آب‌های زیرزمینی شهر تهران دارای میزان آلودگی بالایی هستند که علت آن به سامانه دفع فاضلاب در تهران و احتمال نشت از ایستگاه‌های پمپ بنزین نسبت داده شد (Toyserkani 2007). همچنین ناصری و همکاران آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از آلاینده‌های نفتی در منطقه صنعتی ری (جنوب تهران) را مورد بررسی قرار دادند (Naseri 2011). در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ در چین به این نتیجه رسیدند که ارزیابی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی یک ابزار ضروری برای حفاظت از این منابع و برنامه‌ریزی استفاده از سرزمین است (Zhao & Pei 2012). همچنین بنا بر اولویت‌های کلان سرمایه ملی آمریکا حدود ۱۳۰۰ مکان آلوده با خطر بالا در این کشور وجود دارد که در حال پاکسازی بوده یا در انتظار پاکسازی می‌باشند. به علاوه سازمان محیط‌زیست آمریکا تا سال ۲۰۱۴، تعداد ۴۵۰/۰۰۰ مکان آلوده رها شده اعلام نموده است (USEPA 2014).

اکثر آلاینده‌ها با عبور جریان تراوش از محل آن‌ها در آب زیرزمینی حل شده و یک پلوم، هاله یا دنباله آب زیرزمینی آلوده به وجود می‌آورند. این دنباله آلوده بسیار بزرگ‌تر از ناحیه منشأ اصلی، به‌صورت فزاینده‌ای رشد می‌نماید. برای نخستین بار در سال ۱۹۹۲، سامانه‌هایی با نام ناحیه واکنشی نفوذپذیر^۱ (PRB) ابداع شد. زمانی که آب زیرزمینی آلوده از میان PRB جریان می‌یابد، مواد شیمیایی با آلودگی‌ها واکنش داده و آن‌ها را به مواد

¹ Permeable Reactive Barrier (PRB)

لازم است طول بیشتری برای مدل اختیار شود. در نهایت محیط آزمایش در این پژوهش جعبه قائم به ابعاد $48 \times 19 \times 2/5$ سانتی متر و محیط جعبه افقی به ابعاد $4 \times 35 \times 45$ سانتی متر انتخاب شد. جریان عبوری از سیستم دارای سطح آزاد بوده و تراز جریان ورودی و خروجی به کمک سرریز تنظیم شد. این دو جعبه از دانه‌های شیشه‌ای یکنواخت و هم‌اندازه به‌عنوان محیط متخلخل با مشخصات جدول ۱ پر شد.

جدول ۱- مشخصات محیط متخلخل در مدل‌های مورد استفاده

Table 1. Characteristics of the porous medium in different models

No.	Type of medium	Grain diameter (mm)	Porosity (n)	Hydraulic conductivity (K) [cm/s]
1	Fine transparent medium (i)	0.5-0.7	0.40	0.45
2	Average transparent medium (ii)	1.7-2.4	0.38	1.8
3	Coarse transparent medium (iii)	2.4-3.4	0.36	5.6

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده محیط آزمایش در جعبه تاریکی قرار داده شد تا امکان ورود نور به آن تنها از وجه پشت (در مدل قائم) و وجه زیرین (در مدل افقی) امکان‌پذیر باشد. در تمامی مراحل نور به‌صورت یکنواخت از یک صفحه نیمه‌شفاف به داخل محفظه وارد شده و پس از عبور از جعبه شیشه‌ای متخلخل وارد دوربین عکسبرداری می‌شد.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- تحلیل معادله انتقال جرم در محیط متخلخل

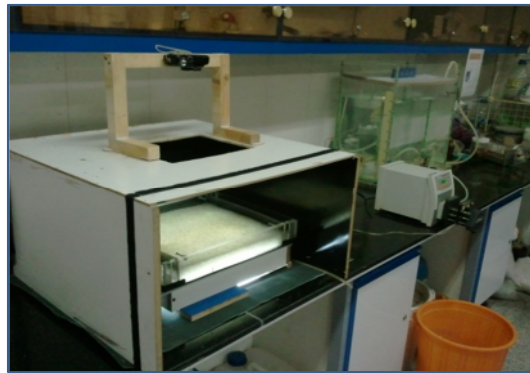
امروزه مدل‌سازی دو بعدی، پرکاربردترین ابزار برای تحلیل و پیش‌بینی انتقال محلول در شرایط میدانی بوده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای، مؤثرتر از مدل‌های یک بعدی است (Fadaei et al. 2015).

سامانه‌های طبیعی آب زیرزمینی در مشخصات هندسی، منشأ، بافت و تنش‌های وارد بر آن‌ها پیچیده و به‌طور گسترده‌ای در زمان و مکان متغیر هستند. از این رو بیشتر مسائل پیچیده عملکرد سامانه‌های طبیعی آب زیرزمینی را که راه‌حل تحلیلی ندارند، به کمک مدل‌های فیزیکی یا عددی تحلیل می‌نمایند (Bedient et al. 1994).

متخلخل از جعبه شنی استفاده شد. روشی که برای دستیابی بیشتر به نحوه جریان در داخل جعبه شنی وجود دارد، استفاده از دانه‌های شیشه‌ای شفاف به‌عنوان محیط متخلخل است؛ ورود ردیاب‌های رنگی می‌تواند نحوه پدیده پخش در این محیط نیمه‌شفاف را آشکار سازد (Kueper et al. 1989).

در مدل‌های از نوع جعبه شنی برای بررسی مسیر و نحوه حرکت مواد در محیط متخلخل روش‌های مختلف تعیین غلظت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از این روش‌ها نیاز به نمونه‌گیری داشته و در نقاط مختلف از مسیر باعث ایجاد اغتشاش در خطوط جریان و بهم خوردن مسیر حرکت محلول می‌شوند. در پژوهش حاضر برای رفع این مشکل، تعیین غلظت در نقاط مختلف به روش پردازش تصاویر پیشنهاد شده است. مزیت اصلی این روش عدم تداخل در محیط و حرکت سیال است. به‌علاوه نتایج را در گستره وسیعی از فضا در طول زمان با حداقل هزینه و اتلاف وقت حاصل می‌نماید.

یکی از نکات حائز اهمیت در ساخت مدل جریان آب در محیط متخلخل، حفظ شرایط جریان دوبعدی مسئله است. ضخامت بیش از اندازه محیط موجب تشکیل جریان‌های چند شاخه‌ای در بعد سوم محیط شده و نتایج را دچار خطا می‌نماید. ضخامت اندک محیط آزمایش نیز موجب تشکیل جریان‌های مرزی ناشی از اثرگذاری دیواره‌ها می‌شود. در پژوهش‌های قبلی ضخامت ایده‌آل جهت جلوگیری از وقوع این پدیده $1/5$ تا 2 سانتی متر در نظر گرفته شده است (Kueper et al. 1989). البته مطالعات آن‌ها مربوط به جریان دوفازی در محیط متخلخل بوده است. ابعاد دیگر محیط آزمایش بر این اساس تعیین شده‌اند که امکان تشکیل جریان یکنواخت در سراسر محیط و عبور هاله (پلوم) آلودگی بدون برخورد با کناره‌های مدل وجود داشته باشد. حد فاصل حرکت پلوم از ورودی تا خروجی باید به اندازه‌ای باشد که در حداقل سه گام زمانی امکان عکسبرداری از آن وجود داشته باشد و مسیر حرکت آلاینده به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتوان پدیده پخش را مشاهده نمود. اگرچه هنگامی که جریان با سرعت پایین‌تر از 20 متر بر روز برقرار است، حرکت هاله پراکندگی کند بوده و طول افقی زیاد برای مدل مورد نیاز نمی‌باشد؛ اما در سرعت‌های بالا، بیش از 30 متر بر روز، هاله پراکندگی سریع‌تر از مدل خارج می‌شود و شکل آن کشیده‌تر خواهد بود. لذا



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Deployment of lab models inside the dark box

شکل ۱- نحوه استقرار مدل‌های آزمایشگاهی داخل جعبه تاریک

$$C(x, y, t) = \frac{m'}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \exp\left[-\frac{(x-v_t)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} - \lambda t\right] \quad (1)$$

ب- منبع تزریق پیوسته

در سال ۱۹۷۲ راه حلی به صورت رابطه ۲ برای حالتی که شرایط پایداری نسبت به زمان حاکم باشد و توده آلاینده نیز پایدار شده باشد (ردیاب غلظت C_0 با نرخ تزریق Q) ارائه شد. این راه حل نیازمند به کارگیری K_0 است که به صورت تابع بسط تغییر یافته نوع دوم و از مرتبه صفر تعریف می‌شود (Bedient et al. 1994).

$$C(x, y) = \frac{C_0 Q}{2\pi \sqrt{D_x D_y}} \exp\left(\frac{v_x^2}{2D_x}\right) K_0 \left\{ \frac{v_x^2}{4D_x} \left(\frac{x^2}{D_x} + \frac{y^2}{D_y} \right)^{1/2} \right\} \quad (2)$$

۲-۲-۲- الگوریتم پردازش تصاویر

پردازش تصاویر عبارت از فرایندی است که به کمک آن می‌توان اطلاعات مطلوب ثبت شده در تصاویر را استخراج نمود. به عبارت

استراتژی این پژوهش نیز معادل سازی سامانه محیط متخلخل زیرزمین توسط مدل فیزیکی دوبعدی و آنگاه حل تحلیلی معادلات دیفرانسیلی حاکم و در نهایت تعیین متغیرهای حاکم و تعمیم آن بر رفتار انتقال در محیط متخلخل واقعی خاک و سنگ می‌باشد. در ادامه حل تحلیلی معادله پخش برای شرایط مشابه مدل‌های فیزیکی این پژوهش ارائه شده است.

الف- منبع تزریق آبی

برای یک منبع آبی و یا یک تزریق پیوسته کوتاه مدت، غلظت C در هر نقطه در صفحه X و Y را می‌توان به کمک رابطه ۱ پیش‌بینی نمود. λ نرخ تجزیه از مرتبه اول می‌باشد. فرض می‌شود مولفه سرعت در جهت Y ، صفر و در جهت X ، هم راستا با جهت حرکت جریان باشد و آلاینده به صورت یکپارچه و در راستای محور عمودی تزریق شود. سرعت جریان نیز باید با استفاده از پایش میدانی یا تحلیل عددی به دست آید (Bedient et al. 1994)

نرم افزار MATLAB می باشد. چنانچه اشاره شد، تصاویر از یک محیط نیمه شفاف تهیه شده اند که نور به طور یکنواخت از پشت محیط آزمایش به داخل آن تابانده می شود. الگوریتم پردازش تصاویر مورد استفاده در این پژوهش را می توان در سه بخش مجزا در نظر گرفت، بخش اول پردازشی است که تصویر پایه آزمایش را به فرم استاندارد تبدیل می کند. بخش دوم پردازشی است که بر تصویر آزمایش اعمال شده و بخش سوم شامل حذف تصویر پایه از تصویر آزمایش و استخراج نتایج نهایی است (شکل ۲).

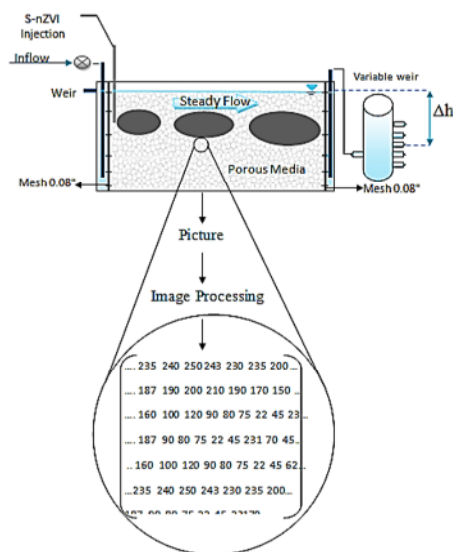


Fig. 2. Schematic view of the transparent box model and its image processing

شکل ۲- شماتیک مدل جعبه شفاف و تحلیل پردازش تصاویر

۲-۲-۳- الگوریتم کمترین مجموع مربعات^۱

روش کمترین مجموع مربعات روشی در آمار است که بیشتر برای حل دستگاه معادلاتی به کار می رود که در آن تعداد معادله ها بیش از تعداد مجهول ها است. این روش برای نخستین بار در سال ۱۷۹۴ میلادی ارائه شد و بیشتر در تحلیل رگرسیون کاربرد دارد. کمترین مربعات در واقع روشی برای برازش^۲ داده ها است. در روش کمترین مربعات، بهترین مدل برازش شده بر مجموعه ای از داده ها مدلی است که در آن مجموع مربع باقی مانده ها کمینه باشد. منظور از باقی مانده ها، اختلاف بین داده مشاهده شده و مقداری است که از مدل به دست می آید.

¹ Least Squares Sum Method (LSM)

² Fitting

دیگر به کمک این روش تصاویر تهیه شده از محیط مورد نظر، توسط یک الگوریتم یا نرم افزار کامپیوتری به صورت مقادیر عددی مورد تحلیل قرار می گیرد. این روش در علوم مختلف مانند علم نجوم، الکترونیک، کامپیوتر، مکانیک، علم مواد، مهندسی نفت و محیط زیست کاربرد دارد (Shafiefar & Ataei 2005; Schincariol et al. 1993) هر چند علی رغم قابلیت های این شیوه در افزایش سرعت و دقت و کاهش هزینه ها، هنوز به جایگاه مناسب خود نرسیده است. مزیت اصلی استفاده از این روش در مطالعه آزمایشگاهی جریان در محیط های متخلخل، نسبت به نمونه برداری از محیط آزمایش، آن است که بدون ایجاد اغتشاش در محیط، نتایج را با دقت مناسب در گستره وسیع تری از مکان و زمان به دست می آورد (Inoue et al. 2009)

هدف از اعمال الگوریتم پردازش تصاویر ارائه شده در این پژوهش، تعیین خطوط هم غلظت در هر یک از عکس های به دست آمده از آزمایش ها به عنوان پایه الگوریتم مجموع کمترین مربعات است. کاربرد این روش در مطالعه آزمایشگاهی جریان در محیط های متخلخل، در گذشته معرفی شده است (Shafiefar & Ataei. 2006) محققان در پژوهش خود توانستند خطای اندازه گیری ها را به کمتر از ۱۰ درصد برسانند (Schincariol et al. 1993; Rolle et al. 2012; Carlos et al. 2015) الگوریتم پردازش تصاویری که در پژوهش های بالا به کار برده شده، در ۸ گام تفکیک می شود:

- ۱- اسکن کردن نگاتیوها به کمک یک دستگاه اسکنر
 - ۲- تهیه منحنی استاندارد چگالی نوری-شفافیت
 - ۳- چرخاندن و تبدیل اندازه تصاویر به اندازه استاندارد
 - ۴- یکنواخت کردن تصاویر با استفاده از یک فیلتر همسانگر
 - ۵- حذف تصویر پایه از تصاویر آزمایش
 - ۶- یکنواخت کردن تصاویر با استفاده از یک فیلتر همسانگر
 - ۷- محاسبه منحنی چگالی نوری-غلظت ماده رنگی
 - ۸- تبدیل چگالی نوری به غلظت ماده رنگی
- اساس مدل پردازش تصاویری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته نیز با کمی تغییر، مشابه مدل پژوهش های قبلی و براساس الگوریتم ارائه شده توسط شفیعی فر و همکاران در محیط

۳-۲- محدودیت‌ها و فرض‌ها

به دلیل پیچیدگی و تعداد زیاد متغیرهای تأثیرگذار، به طور معمول مدل‌سازی پدیده‌های مرتبط با پخش در محیط متخلخل با فرض‌های متعدد و خطای زیاد همراه است. از جمله مهم‌ترین این محدودیت‌ها عدم امکان مشاهده پخش در محیط خاک و سنگ و همچنین اغتشاشات جریان ناشی از برداشت نمونه از جریان تراوش است. در مطالعه حاضر بجای استفاده از محیط واقعی خاک از دانه‌های شفاف شیشه‌ای استفاده شد و این فرض از جمله مهم‌ترین عوامل خطا در نتایج بود. البته با توجه به شفاف بودن محیط و استفاده از روش پردازش تصاویر، نیاز به برداشت نمونه از محیط برطرف شد و لذا خطای مربوط به آن به حداقل کاهش یافت.

۴-۲- مشخصات آزمایش‌ها

شرایط و مشخصات آزمایش‌های صورت گرفته به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. این چیدمان

آزمایش‌ها براساس یک سری پیش‌آزمایش به نحوی طراحی شد تا با حداقل تعداد آزمایش، بتوان نتایج را در محدوده گسترده‌ای منطبق بر شرایط واقعی به دست آورد.

۳- نتایج و بحث

قبل از بحث روی مقادیر به دست آمده برای پارامترهای انتقال‌پذیری، نسبت به دقت نتایج به دست آمده اعتبارسنجی شد و با مقایسه مطالعات مشابه، صحت نتایج، مورد ارزیابی قرار گرفت. این اعتبارسنجی، از روش مقایسه حجم ماده تزریقی و مجموع حجم ماده موجود در پلوم در تعیین میزان خطای مدل و شناسایی عکس‌های مخدوش استفاده شد. برای این منظور در کلیه تصاویر مورد پردازش، حجم ماده موجود در تصاویر محاسبه و در مقایسه با حجم ماده تزریقی به عنوان شاخصی از خطای مدل ارائه شد. به این ترتیب از سری خطاهای به دست آمده، خطای کل مدل تخمین زده شد. بر اساس این نتایج حداکثر خطای قابل قبول در نتایج مدل

جدول ۲- مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

Table 2. Specifications of the experiments conducted

Injection type	Model type	Medium type	Seepage velocity (m/d)	Experiment Code
Pulse injection	Vertical transparent box	Fine transparent medium (i)	4	001
			9	002
			17	003
			31	004
			64	005
			86	006
		8	007	
		16	008	
		34	009	
		66	010	
		85	011	
		8	012	
	16	013		
	32	014		
	65	015		
	85	016		
	Horizontal transparent box	Average transparent medium (ii)	4	017
			9	018
17			019	
8			020	
16			021	
34			022	
Coarse transparent medium (iii)		8	023	
		16	024	
		32	025	
		8	026	
		16	027	
		8	028	
Continuous injection	Vertical transparent box	medium (i)	16	029
		medium (ii)	8	030
		16	031	
		8	032	
		16	033	
		8	034	
	Horizontal transparent box	medium (i)	16	035
		8	036	
		16	037	
		8		
		16		
		8		

است. لازم به ذکر است در محیط درشت دانه و ریزدانه به خاطر یکدست نبودن رنگ دانه‌ها، دشواری و خطای بیشتری در پردازش تصاویر وجود داشت. علاوه بر مقایسه حجم ماده تزریقی و محاسبه جرم هاله آلودگی، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات مشابه نشان‌دهنده همخوانی و سازگار بودن با یافته‌های تحقیقات مشابه است (Branko & Martin 2007; Robert & Paul 1991)

مقایسه این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌دهنده نزدیکی مقادیر پیشنهادی برای شرایط مشابه و یکسان بودن روند تغییرات متغیرهاست. در شکل ۴ نمونه‌ای از خروجی نهایی اعمال الگوریتم کمترین مربعات بر ماتریس خروجی پردازش تصاویر ارائه شده است. این فرایند برای تمامی خروجی‌های به دست آمده از پردازش تصاویر انجام و متغیرهای روابط تحلیلی

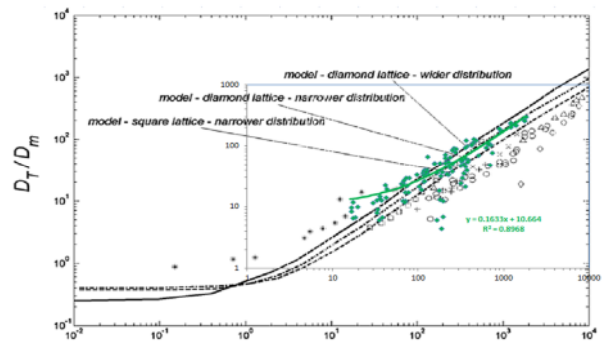


Fig. 3. Comparison of the values of D_T/D_m for different Péclet numbers obtained in the present study with those reported by Branko et al. 2007

شکل ۳- مقایسه D_T/D_m در اعداد پکله مختلف در پژوهش حاضر و نتایج پژوهش Branko و همکاران در سال ۲۰۰۷

دوبعدی شفاف در محیط ریزدانه معادل ۱۱ درصد و در محیط متوسط دانه معادل ۷ درصد و درشت دانه بر هاله ۸ درصد بوده

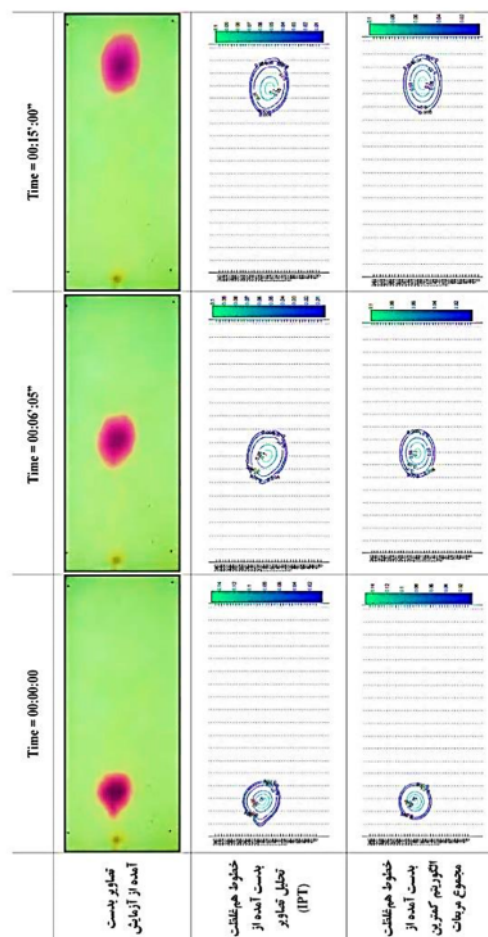


Fig. 4. Sample final result of the least squares algorithm applied to the image processing output matrix

شکل ۴- نمونه‌ای از خروجی نهایی اعمال الگوریتم کمترین مربعات بر ماتریس خروجی پردازش تصاویر

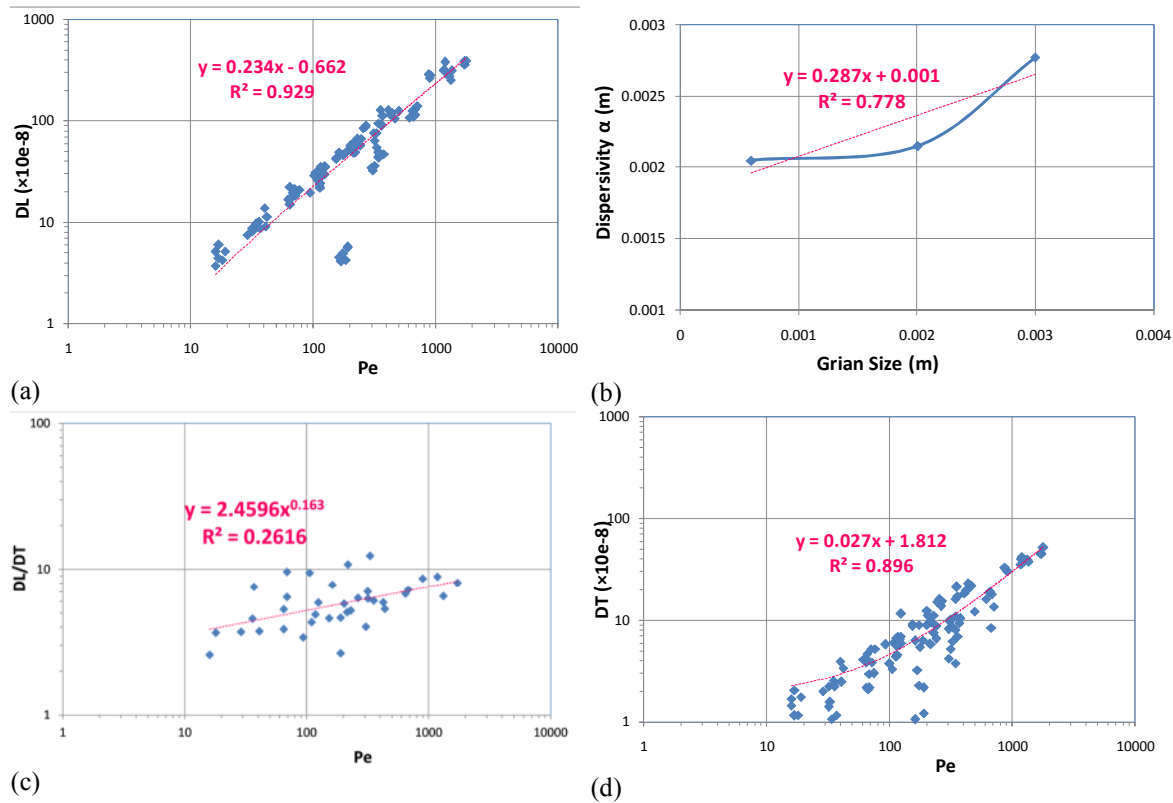


Fig. 5. Analysis of the results obtained for diffusivity coefficients

شکل ۵- تحلیل نتایج مربوط به ضرایب پخش

$$\alpha_L = 0.287d + 0.001 \quad (3)$$

۳-۲- ضرایب پخش طولی و عرضی

ضریب پخش طولی به صورت $D_L = D_m + |V| \times \alpha_L$ و عرضی به صورت $D_T = D_m + |V| \times \alpha_T$ (Rolle et al. 2012; Carlos et al. 2015) تعریف می‌شود.

بر اساس نتایج به دست آمده این ضریب علاوه بر بستگی به عوامل تأثیرگذار روی پخش پذیری، تابعی از مشخصات جریان در محیط متخلخل نیز می‌باشد به طوری که با افزایش مقدار سرعت بر آن افزوده می‌شود. در این مطالعه تغییرات این پارامتر به صورت تابعی از عدد بدون بعد پکله^۱ مورد بررسی قرار گرفت که براساس نتایج نمایش داده شده در شکل ۵-ب و ج معادلات ۴ و ۵ پیشنهاد شده است

$$D_L = 0.23Pe - 0.662 \quad (4)$$

پخش نظیر ضرایب هیدرودینامیکی پخش ضریب تاخیر برای هر یک از آزمایش‌ها به دست آمد که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

از تفسیر تحلیل‌های عددی و همچنین نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی نتایج زیر قابل ذکر است:

۳-۱- ضریب پخش پذیری طولی

ضریب پخش پذیری طولی (α_L) تابعی از مشخصات محیط متخلخل نظیر اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، تخلخل و همچنین ابعاد مدل است. در این مطالعه مشاهده شد با افزایش ابعاد دانه‌های تشکیل دهنده بستر متخلخل، مقدار ضریب پخش پذیری زیادتر می‌شود. همچنین ضریب پخش پذیری تابع نوع ماده تزریق شونده یا غلظت آن نیست. بر اساس شکل ۵-الف رابطه بین قطر دانه‌های بستر (d) با ضریب پخش پذیری طولی (α_L) مطابق معادله ۳ پیشنهاد می‌شود

¹ Peclet Number

از نوع محیط متخلخل و اندازه دانه‌های تشکیل دهنده خاک است و مقدار آن متناسب با افزایش اندازه حفرات واقع در محیط خاک، افزایش می‌یابد که می‌توان آن را به قطر کانال‌های جریان در محیط متخلخل نسبت داد. ضریب پخش‌پذیری عرضی علاوه بر وابستگی به مشخصات محیط متخلخل، تابع مشخصات جریان نیز می‌باشد. لذا در بررسی آن لازم است از عدد بدون بعد پکله استفاده کرد و محدوده تغییرات آن برای دانه‌بندی ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر در دامنه ۰/۰۲ تا ۰/۰۲۸ متر می‌باشد. مطابق نتایج این پژوهش با افزایش مقدار عدد پکله، میزان پخش‌پذیری عرضی نیز افزایش پیدا می‌کند.

در نهایت باید توجه داشت که نتایج مدل‌های تجربی مشابه مطالعه حاضر را نمی‌توان به طور مستقیم برای تحلیل پدیده پخش در آبخوان‌های با مقیاس واقعی مورد استفاده قرار داد و لازم است تأثیر مقیاس به کمک مطالعات میدانی یا تحلیل‌های عددی در نظر گرفته شود.

References

- Bailey, S.E., Olin, T.J., Bricka, R.M. & Adrian, D.D., 1999, "A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals", *Journal of Water Research*, 33, 2469-2479 .
- Bedient, P. B., Rifai, H. S. & Newell, C. J., 1994, *Groundwater contamination: Transport and remediation*, Prentice-Hall Publishing Co., Englewood Cliffs, 140-310.
- Branko B. & Martin J. B., 2007, "Pore-scale modeling of transverse dispersion in porous media", *Journal of Water Resources Research*, 43, 1-12.
- Carlos, G., Sergio, A. & Raúl, O., 2015, "Effective mass diffusion and dispersion in random porous media", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(4), 756-765.
- Fadaei, M., Shamsaei, A. & Vossoughi, M., 2015, "Experimental investigation of nano zero-valent iron mobility in porous media", *Journal of Scientia Iranica*, 22(3), 1346-1356.
- Fadaei, M., Vossoughi, M. & Shamsaei, A., 2014, "In-situ nitrate remediation using nano iron/nickel particles" *Journal of Environment Protection Engineering*, 40(3), 75-86.
- Fadaei, M., Vossoughi, M. & Shamsaei, A., 2015, "In-situ Pb²⁺ remediation using nano iron particles", *Journal of Environment Health Science and Engineering*, 13(1), 1-11.
- Inoue, K., Takenouti, R., Tanaka, T. & Matsunaga, N., 2009, "Non-intrusive technique for identifying solute dispersion in porous media using image analysis", *International Offshore and Polar Engineering Conference Osaka, Japan*.
- Kueper, B.H., Abbot, W. & Farquhar, G., 1989, "Experimental observation of multiphase flow in heterogenous porous Media", *Journal of Contaminant Hydrology*, 5, 83-95.

$$D_T = 0.027Pe + 1.812 \quad (5)$$

همچنین ارتباط بین ضرائب پخش طولی و عرضی را از شکل ۵-د می‌توان به صورت معادله ۶ پیشنهاد داد

$$D_L / D_T = 2.141P_e^{0.189} \quad (6)$$

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای جهت بررسی کارایی الگوریتم پردازش تصاویر و کمترین مجموع مربعات جهت تعیین هاله آلودگی در محیط متخلخل شفاف انجام گرفت. از نتایج به دست آمده مشخص شد روش پیشنهادی به صورت موفقیت‌آمیز با خطای کمتر از ۱۱ درصد توانایی تخمین ضرائب پخش را دارد که این خطا در مقایسه با روش‌های مشابه رضایت‌بخش است. بر اساس نتایج به دست آمده ضریب پخش‌پذیری طولی تابعی

- Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M.E. & Ward, R.S., 2012, "Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence", *Journal of Environmental Pollution*, 163, 287-303.
- Lalezari, R., 2008, "The effect of sewage-fed aquifer old with the release of nitric using MT3D", MSc Thesis, Shahrekord University, Iran. (In Persian)
- Mahmoodian, A., 1985, "The situation in Iran and the pollution caused by the discharge of wastewater into water sources", *Iranian Journal of Water*, 10, 43-53. (In Persian)
- Mohseni, O., 1986, "Babol zone to nitrate contamination of groundwater", MSc Thesis, Tarbiat Modarres University in Tehran, Iran.
- Nanbakhsh, H., 2001, "Evaluation of nitrate and nitrate concentrations in drinking water wells in Urmia", *Research Report*, 98-103. (In Persian)
- Naseri, H. & Alijani, F., 2002, "Study the plain-ize Hydrogeochemistry and groundwater pollution", Research Unit and Water Engineering Standards, Khuzestan Water and Power Authority. (In Persian)
- Naseri, H., 2011, "Groundwater pollution caused by oil pollution: Case study: Industrial Zone Ray", *Journal of Islamic Azad University*, 21(81), 11-22. (In Persian)
- Oswald, S.E. & Kinzelbach, W., 2003, "Three dimensional physical benchmark experiments to test variable-density flow models", *Journal of Hydrology*, 290, 22-42.
- Robert A. J. & Paul V. R., 1991, "A solute transport model for channelized flow in a fracture", *Journal of Water Resources Research*, 27(8), 1797-1808.
- Rolle, M., Hochstetler, D., Chiogna, G., Kitanidis, P. K. & Grathwohl, P., 2012, "Experimental investigation and pore-scale modeling interpretation of compound-specific transverse dispersion in porous media", *Journal of Transport in Porous Media*, 93(3), 347-362.
- Schincariol R.A., Hederick E.E., & Schwartz F.W., 1993, "On the application of image analysis to determine concentration distributions in laboratory experiments", *Journal of Contaminant Hydrology*, 12(3), 197-215.
- Shafiefar, M., 2006, "Check condensate flow in porous media." MSc Thesis, Sharif University of technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Thiruvengkatacharia, R., Vigneswarana, S. & Naidub, R., 2008, "Permeable reactive barrier for groundwater remediation", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(2), 145-156.
- Toyserkani, Z., 2007, "Organic contamination of groundwater in Tehran", MSc Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- USEPA., 2014, *Office of solid waste and emergency response, brown fields and land revitalization programs: Changing American Land and Lives*. Report number: EPA 560-F-08-241.
- Zhao, Y. & Pei, Y., 2012, "Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: A short review", *Journal of Procedia Environmental Sciences*, 13, 1739-1747.