

مقایسه دو مدل برای انتقال برمایند در ستون‌های خاک دست نخورده با مدل کسری انتقال-پخش

شهرام شاه‌محمدی کلالق¹، حسین بابازاده و سولماز بهاری

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی، گروه علوم و مهندسی آب، تبریز، ایران؛ shahmohammadi_sh@yahoo.com

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ h_babazadeh@hotmail.com

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز؛ solmaz_bahari@yahoo.com

دریافت: 91/12/15 و پذیرش: 92/7/22

چکیده

امروزه استفاده از مدل‌های ریاضی به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات و مدیریت انتقال جرم در محیط‌های متخلخل رایج می‌باشد. در این مطالعه از رابطه توسعه یافته و اصلاح شده انتقال-پخش (ADE)، تحت عنوان رابطه کسری انتقال-پخش (FADE) که براساس تئوری حرکت لوی بنا شده است برای شبیه‌سازی انتقال برمایند در ستون‌های خاک دست نخورده لوم رسی و لوم شنی (به طول 40 سانتی‌متر و قطر 10 سانتی‌متر) استفاده گردید. مقادیر درجه کسری (α) برای دو ستون خاک لوم رسی و لوم شنی همواره کمتر از دو و بترتیب برابر 1/437 و 1/865 بدست آمد. این نشان داد که انتقال برمایند در ستون‌های خاک دست نخورده لوم رسی و لوم شنی بصورت انتقال نامتعارف یا انتقال غیرفیکتی بوده و مدل کسری انتقال-پخش، نسبت به مدل انتقال-پخش که براساس قانون انتشار فیکتی بنا شده است کارآمدتر بوده و برای شبیه‌سازی برمایند در ستون‌های خاک دست نخورده لوم رسی و لوم شنی توصیه می‌گردد. بررسی‌های نموداری و آماری نیز کارایی مدل FADE را در شبیه‌سازی انتقال برمایند تأیید کردند. علی‌رغم دقت بالای مدل کسری انتقال-پخش در این تحقیق، در کل تفاوت عمده‌ای بین دو مدل FADE و ADE مشاهده نگردید.

واژه‌های کلیدی: انتقال نامتعارف، حرکت براونی، حرکت لوی، درجه کسری

مقدمه

آزمایشگاهی مختلفی جهت درک و فهم رفتار انتقال این آلاینده‌ها با استفاده از کاربرد مدل‌های مناسب صورت گرفته است. معادله انتقال-پخش² (ADE) اولین مدلی است که بطور وسیع برای بیان انتقال املاح و آلاینده در محیط متخلخل مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبول و رضایت‌بخشی در خاک‌های همگن البته در

انتقال آلاینده‌ها از قبیل املاح، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در محیط‌های متخلخل و آب‌های زیرزمینی از موضوعات مهم و اساسی است که به جهت مسائل زیست محیطی و تهدید حیات موجودات زنده از جمله انسان، یکی از نگرانی‌های مهم عصر حاضر جوامع علمی بوده و در این راستا مطالعات تئوریک و

¹ نویسنده مسئول، آدرس: تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی، گروه علوم و مهندسی آبیاری

² Advection-Dispersion Equation

(1990)، حرکت تصادفی با زمان پیوسته⁸ (CTRW) (برکویتز و اسپر، 1997 و 2008) جهت مدل‌سازی انتقال نامتعارف آلاینده‌ها پیشنهاد شده است. همچنین از جمله‌ی این مدل‌ها، می‌توان به مدل اصلاح شده و توسعه یافته انتقال-پخش، تحت عنوان رابطه کسری انتقال-پخش⁹ یا (FADE) (بنسون، 1998؛ بنسون و همکاران، 2000a,b) اشاره کرد که می‌تواند به عنوان یک مدل مناسبی برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده در انواع محیط‌های متخلخل (همگن و غیرهمگن) مورد استفاده قرار گیرد. ایده‌ی اصلی مدل کسری انتقال-پخش این است که ذرات املاح برخلاف حرکت براونی که اساس مدل ADE می‌باشد، تحت حرکت لوی می‌باشند و شار پخش متناسب است با مشتق کسری غلظت جرم به جای مشتق صحیح که در ADE فرض می‌شود و تأثیر غیرهمگنی محیط متخلخل بر انتقال املاح و آلاینده بوسیله توان کسری مشتق مذکور منعکس می‌شود (بنسون، 1998؛ بنسون و همکاران، 2000a,b).

در این مدت، کارآیی مدل کسری انتقال-پخش برای شبیه‌سازی انتقال املاح در خاک‌های غیراشباع (پچسکای و همکاران، 2000)، خاک‌های اشباع (دنگ و همکاران، 2004؛ چانگ و همکاران، 2005؛ هانگ و همکاران، 2006)، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها (کیم و کاواس، 2006؛ زانگ و همکاران، 2005) و جریان روی سطحی¹⁰ (دنگ و همکاران، 2006) مورد ارزیابی قرار گرفته و تأیید شده است. علی‌رغم مطالعات انجام گرفته، قابلیت کارآیی مدل کسری انتقال-پخش در خاک‌های لومی و بخصوص در حالت دست نخورده بررسی و ارزیابی نگردیده است لذا در تحقیق حاضر، کارآیی رابطه کسری انتقال - پخش (FADE) برای شبیه‌سازی انتقال برماید در مقیاس آزمایشگاهی و در ستون‌های کوتاه خاک دست نخورده لوم رسی و لوم شنی و در حالت اشباع مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی آن با نتایج مدل انتقال-پخش (ADE) مقایسه می‌گردد. برای این منظور از روش‌های نموداری و آماری استفاده می‌گردد.

مقیاس آزمایشگاهی به دست داده است (هانگ و همکاران، 2005؛ جری و روت، 1990).

رابطه سهمی انتقال-پخش برای انتقال عناصرخشی¹ و غیرواکنشگر² بصورت زیر بیان می‌شود (یتر، 1972):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

که C غلظت آلاینده³ [ML⁻³]، D ضریب پخش هیدرودینامیکی یا (ضریب پخش) [L²T⁻¹]، V سرعت متوسط آب منفذی [LT⁻¹] و x فاصله [L] و t زمان [T] می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده که این مدل نمی‌تواند تمام جوانب و رفتار حرکت و انتقال املاح را بویژه در خاک-های غیرهمگن پیش‌بینی نماید (هانگ و همکاران، 2005؛ برکویتز و همکاران، 2008؛ لوی و برکویتز، 2003). با توجه به اینکه محیط متخلخل طبیعی مثل خاک‌های طبیعی و اکيفرها غالباً غیرهمگن بوده و سرعت جریان آب با غیرهمگنی محیط به شدت تغییر می‌یابد لذا فرآیند انتقال املاح در این محیط‌ها خیلی پیچیده شده و دیگر شبیه‌سازی انتقال آن‌ها با استفاده از مدل انتقال-پخش براساس فرضیات اعمال شده در ساختار این مدل، مشکل‌تر می‌گردد. بطوری که تحقیقات زیادی نشان داده که غلظت‌های اندازه‌گیری شده غالباً بیشتر از میزان برآوردشده توسط این مدل در قسمت اولیه منحنی‌های رخنه³ (BTCs) و کمتر از میزان برآورد شده توسط مدل مذکور در قسمت انتهایی یا اصطلاحاً دم منحنی‌های رخنه می‌باشد که از این پدیده به عنوان انتقال نامتعارف⁴ یا انتقال غیرفیککی⁵ یاد می‌شود (برکویتز و اسپر، 1995؛ لوی و برکویتز، 2003؛ برکویتز و همکاران، 2008). بنابراین انتقال املاح در محیط متخلخل عمدتاً غیرفیککی بوده و بایستی مدل با کارآیی و دقت بهتر و بالاتری جایگزین مدل انتقال-پخش شود. برای این منظور، مدل‌های مختلفی همچون مدل‌های روان-راکد⁶ (MIM) (ون-گنوختن و ویرنجا، 1997؛ بوند و ویرنجا، 1990)، تابع تبدیل لاگ نرمال⁷ (CLT) (جری، 1982؛ جری و روت،

¹ Inert

² Non-reactive

³ Breakthrough Curve

⁴ Anomalous transport

⁵ Non-Fickian

⁶ Mobile-immobile model

⁷ ConvectiveLognormal Transfer function model

⁸ Continuous Time Random Walk model

⁹ Fractional Advection-Dispersion Equation

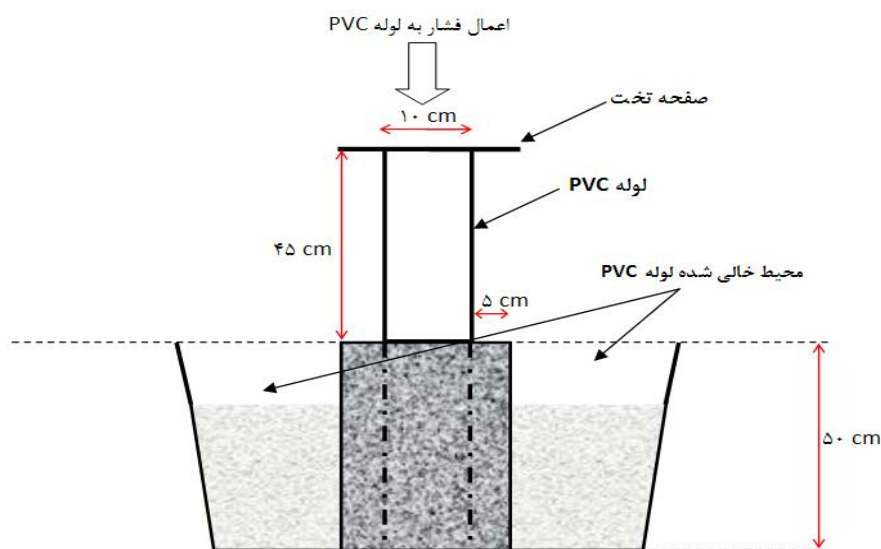
¹⁰ Overland

مواد و روش‌ها

تهیه ستون‌های خاک دست نخورده

خاک لوم‌شنی از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز واقع در شرق تبریز با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ}01'49/70''$ شمالی و $46^{\circ}23'32/46''$ شرقی تا $38^{\circ}01'50/93''$ شمالی و $46^{\circ}23'34/71''$ شرقی بود، و خاک لوم‌رسی از منطقه اسپیران (موقعیت جغرافیایی در دسترس نیست) هر دو از ناحیه رشد ریشه، عمق 0-40 سانتی‌متری، به صورت دست نخورده تهیه شدند. برای این منظور لوله‌های پلی‌اتیلن (PVC) با قطر و ارتفاع به ترتیب 10 و 40 سانتی‌متر تهیه شدند. جهت سهولت

فروروی لوله‌ها در خاک، لبه خارجی آن‌ها از طرف خارج تیز شده و سپس لوله‌ها تا عمق 40 سانتی‌متری به آرامی و با فشار دست وارد خاک شدند (شکل 1). حفاری و خالی کردن تدریجی خاک اطراف لوله‌ها، راندن لوله‌های PVC به درون خاک و قرارگیری به صورت ستون خاک دست نخورده داخل لوله را آسانتر ساخت. سپس جهت نفوذ آسانتر لوله‌ها به درون خاک، همزمان با ورود لوله‌ها مرتباً خاک اطراف آنها حفاری و تخلیه گردید. پس از پر شدن استوانه از خاک، دهانه لوله‌ها با توری پوشیده شدند تا از ریزش خاک جلوگیری شود. نحوه نمونه‌برداری دست نخورده در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1- نحوه حفاری خاک و فرورودن لوله PVC جهت نمونه‌برداری خاک به صورت دست نخورده

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو خاک مورد آزمایش در جدول 1 آمده است.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو خاک مورد استفاده در آزمایش

ویژگی خاک	خاک لوم‌شنی	خاک لوم‌رسی
شن (%)	65,6	25
سیلت (%)	24,5	38,39
رس (%)	9,9	36,61
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	1,41	1,12
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)	0,15	1,2
pH عصاره گل اشباع	8,22	8,41
EC عصاره اشباع (dS/m)	1,88	2
سدیم تبادل (%)	2,22	2,8
کربنات کلسیم معادل (%)	5,25	3,57
کربن آلی (%)	1,32	2,15

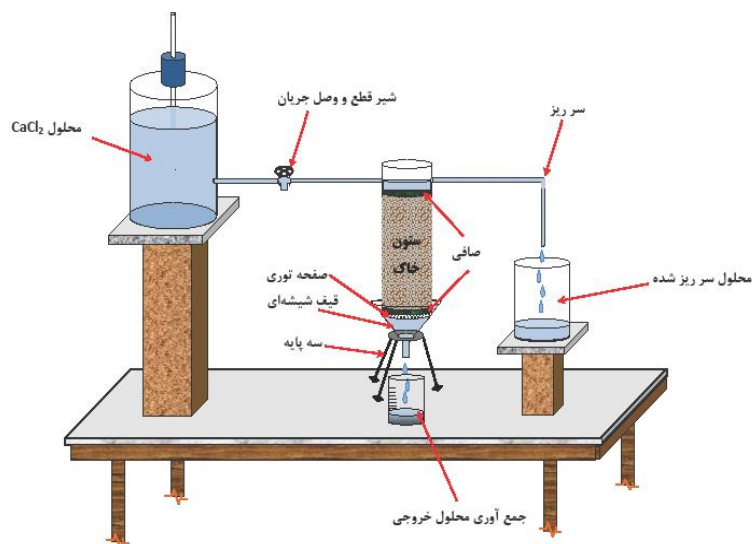
دستگاه pH متر مجهزه الکتروود انتخابگر برمایید (ساخت شرکت Crison کشور اسپانیا) انجام گرفت.

آزمایشات تزریق CaBr_2 به ستون‌های خاک

ستون‌های خاک آماده شده (از جنس PVC و با قطر و طول به ترتیب 10 و 40 سانتی‌متر) جهت آبشویی با محلول 0/01 مولار CaCl_2 به عنوان محلول زمینه به مخزن ماریوت وصل گردید. از مخزن مذکور جهت ابقای شدت جریان ثابت محلول بر روی ستون خاک استفاده شد. کف این ستون‌ها در داخل یک قیف پلاستیکی بر روی اسکاچ و تور سیمی تثبیت گردید. یک خروجی برای سرریز محلول در 10 سانتی‌متری بالای هر ستون تعبیه شد تا بار آبی روی ستون ثابت بماند. محل لوله خروجی قابل تنظیم بوده و ارتفاع مجرای خروجی با توجه به شدت جریان مورد نیاز تنظیم گردید. ابتدا ستون‌ها از قسمت پایین با محلول 0/01 مولار CaCl_2 اشباع گردید، اشباع شدن خاک‌ها بدون ایجاد فشار هیدرواستاتیکی در جبهه رطوبتی صورت گرفت تا از محبوس شدن هوا جلوگیری شود. اشباع کردن با قرار دادن انتهای ستون‌های خاک در ارتفاعی معادل با سطح محلول زمینه انجام شد. ارتفاعی از محلول زمینه در اثر کاپیلاریته تا فاصله‌ای سریع صعود و خاک ستون را از پائین اشباع می‌کرد. با توقف صعود مؤثنتگی سطح محلول یک سانتی‌متر بالاتر برده می‌شد تا صعود و اشباع شدن مجدداً کامل شود. این عمل تا زمانی ادامه یافت که ارتفاع محلول زمینه به سطح خاک برسد و ستون را کاملاً اشباع نماید. جهت اطمینان از اشباع کامل در آخرین مرحله اشباع کردن، اجازه داده شد تا ارتفاعی از محلول به اندازه یک سانتی‌متر در سطح خاک قرار گیرد.

با قطع جریان محلول زمینه، بلافاصله محلولی از CaBr_2 به غلظت 0/01 مولار (C_0) به حجم یک لیتر به صورت مرحله‌ای¹ به ستون‌ها تزریق گردید، سپس جریان محلول 0/01 مولار CaCl_2 با همان بار ثابت یک سانتی‌متر مجدداً برقرار گردید (شکل 2). زه‌آب خروجی بلافاصله پس از تزریق محلول CaBr_2 از هر ستون در زمان‌های مختلف جمع‌آوری و غلظت بروماید (C) در آن اندازه‌گیری شد. این عمل تا زمان رسیدن به غلظت ثابت برمایید در زه‌آب خروجی ادامه یافت (مدت زمان انجام آزمایش برای ستون خاک لوم رسی 110 دقیقه و برای ستون خاک لوم شنی 35/3 دقیقه طول کشید). اندازه‌گیری غلظت برمایید (Br^-) در محلول خروجی با استفاده از یک

¹. Step input



شکل 2 - نمایی از آزمایش تزریق CaBr_2 به ستون‌های خاک

تئوری مدل

برای عناصر خشتی و غیرواکنشگر، رابطه کسری انتقال-پخش بصورت زیر بیان می‌شود (بنسون، 1998؛ بنسون و همکاران، 2000a,b):

(2)

$$C(x,t) = C_o \left[1 - F_\alpha \left(\frac{x - Vt/R}{\left(\left| \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) \right| Dt/R \right)^{1/\alpha}} \right) \right]$$

(3)

که در آن:

$$F_\alpha(y) = 1 - \frac{1}{2} \int_0^1 \exp[-y^{\alpha/(\alpha-1)} U_\alpha(\varphi)] d\varphi \quad (4)$$

و

$$U_\alpha(\varphi) = \left[\frac{\sin(\pi\alpha\varphi/2)}{\cos(\pi\varphi/2)} \right]^{1-\alpha} \quad (5)$$

در رابطه (4)، تابع $F_\alpha(y)$ به تابع احتمال متقارن استاندارد (توزیع لوی) موسوم بوده و به روش عددی قابل محاسبه می‌باشد.

تخمین و برآورد پارامترهای انتقال

در تحقیق حاضر جهت تخمین و برآورد پارامترها از روش مدل‌سازی معکوس که یک روش بهینه‌سازی است استفاده گردید. در روش مدل‌سازی معکوس علاوه بر داده‌های اندازه‌گیری شده (غلظت برماید) به یک مدل ریاضی مناسب که بیان‌کننده روابط حاکم بر پدیده باشد و یک الگوریتم بهینه‌سازی برای مینیمم کردن یک تابع هدف نیاز است. تابع هدف در تحقیق حاضر بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{2}(1+\beta)D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{2}(1-\beta)D \frac{\partial^2 C}{\partial (-x)^2}$$

که D ضریب پخش با بعد $[L^2T^{-1}]$ و α درجه کسری دیفرانسیل ($1 < \alpha < 2$) می‌باشد. با توجه به این که در رابطه

فوق، $\frac{d^2}{dx^2} = \frac{d^2}{d(-x)^2}$ در حالت $\alpha=2$ ، رابطه FADE به

ADE تبدیل می‌شود. β میزان چولگی فرآیند انتقال (میزان انحراف پخش) را بیان می‌کند ($-1 \leq \beta \leq +1$). به عبارتی، β بیانگر وزن نسبی حرکت روبه جلو ذرات آلاینده در مقابل احتمال انتقال و جابجایی به طرف عقب آن ذرات می‌باشد (هانگ و همکاران، 2005). وقتی $\beta=0$ باشد جابجایی ذرات املاح و پخش آنها در FADE متقارن می‌باشد (بنسون، 1998). بقیه پارامترها در رابطه (1) توضیح داده شده‌اند.

برای انتقال یک بعدی و در حالت ماندگار با تزریق ورودی بصورت مرحله‌ای، حل تحلیلی رابطه FADE متقارن، بصورت زیر بیان می‌شود (پچسکای و همکاران، 2000؛ هانگ و همکاران، 2006):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (9)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \times 100 \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (11)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (12)$$

در روابط فوق، P_i مقادیر برآورد یا همانندسازی شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده)، \bar{P}_i و \bar{O}_i بترتیب میانگین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها (رقم‌های مشاهده، محاسبه و یا برآورد شده) است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی انتقال برمایید با مدل‌های ADE و FADE

پارامترهای برآوردشده از شبیه‌سازی انتقال برمایید در ستون‌های خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی اشباع با مدل انتقال-پخش (ADE) و مدل کسری انتقال-پخش (FADE) در جدول 2 آمده است. همان‌طوری‌که پیشتر نیز اشاره گردید پارامترهای مدل انتقال-پخش (D و V) با استفاده از برنامه رایانه‌ای CXTFIT2.1 پارامترهای مدل کسری انتقال-پخش (D، V و α) با استفاده از برنامه رایانه‌ای FADEMmain برآورد شدند. اصلی‌ترین تفاوت مدل‌های ADE و FADE به پارامتر درجه کسری (α) مربوط می‌شود و مقادیر درجه کسری بیانگر نوع انتقال آلاینده می‌باشد. به عبارت دیگر وقتی مقدار پارامتر درجه کسری (α) به عدد دو میل می‌کند نشان دهنده انتقال معمولی و بفرم فیکس و هر چقدر آن از عدد دو کوچکتر باشد بیانگر انتقال نامتعارف و غیرفیکس می‌باشد. مطابق جدول 2 مقادیر α برای انتقال برمایید در ستون خاک لوم رسی و لوم شنی بترتیب 1/437 و 1/865 می‌باشد. این

$$\chi^2(V, D, \alpha) = \sum_{i=1}^n [C_i - C(x, t_i; V, D, \alpha)]^2 \quad (6)$$

که در آن، C_i غلظت مشاهده‌ای، $C(x, t_i; V, D, \alpha)$ مقدار غلظت برآورد شده در موقعیت x و زمان t و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد. با توجه به قابلیت مدل‌سازی معکوس نرم‌افزار CXTFIT2.1 (توراید و همکاران، 1999) که براساس حل تحلیلی رابطه‌ی انتقال-پخش (ADE) و برنامه رایانه‌ای FADEMmain (هانگ و همکاران، 2005) که بر مبنای حل تحلیلی رابطه‌ی کسری انتقال-پخش (FADE) بسط و توسعه یافته‌اند و به الگوریتم بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکواردت کوپل هستند. به ترتیب جهت برآورد پارامترهای رابطه انتقال-پخش (ADE) و رابطه کسری انتقال-پخش (FADE) بکار گرفته شدند. جهت تخمین پارامترهای انتقال، شرایط اولیه و مرزی در ستون‌های مورد آزمایش بصورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\begin{cases} C(x, t) = 0 & , & t = 0 \\ C(x, t) = C_0 & , & x = 0 & , & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{\partial C}{\partial x} = 0 & , & x = L & , & t > 0 \end{cases}$$

معیار ارزیابی مدل‌ها

معیارهای آماری برای قضاوت کیفی روی مدل‌ها استفاده می‌شوند. این معیارها روش هدفمند را برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها فراهم می‌کنند. براساس نظریه لاگیتس و مک گیب (1999) استفاده از نمایه‌های متکی بر همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی، نظیر ضریب همبستگی، به تنهایی نمی‌تواند در تحلیل دقت مدل‌ها کارآمد باشد و لذا از نمایه‌های دیگری نیز در این خصوص بایستی بهره جست. در این تحقیق از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (r^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای نسبی (MRE)، بازده یا کارایی مدل¹ (EF) و ضریب مقادیر باقیمانده² (CRM) به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده گردید. شاخص‌های یاد شده به ترتیب با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (8)$$

1. Modelindg Efficiency

2. Coefficient of Residual Mass

خاک لومرسی بیشتر از خاک لوم‌شنی می‌باشد و این بیانگر میزان غیرهمگنی خاک لومرسی نسبت به خاک لوم‌شنی می‌باشد. و در نتیجه کارایی مدل کسری انتقال-پخش در خاک لومرسی بیشتر از خاک لوم‌شنی می‌باشد که شکل 3 و نتایج ارزیابی آماری در جدول 3 نیز موید این نتیجه هستند.

نشان می‌دهد که انتقال برماید در ستون‌های خاک لومرسی و لوم‌شنی به صورت انتقال نامتعارف بوده و مدل کسری انتقال-پخش، بجای مدل انتقال-پخش برای شبیه‌سازی آنها در ستون‌های خاک لومرسی مناسب می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر درجه کسری حاصله برای دو نوع خاک می‌توان گفت میزان غیرفیکسی و نامتعارفی انتقال برماید در

جدول 2- پارامترهای برآورد شده انتقال برماید در ستون‌های خاک لومرسی و لوم‌شنی از مدل‌های ADE و FADE

مدل کسری انتقال-پخش (FADE)		مدل انتقال-پخش (ADE)		بافت خاک	
$\alpha(-)$	D(cm ^u /min)	V(cm/min)	D(cm ² /min)		V(cm/min)
1/437	1/805	0/827	8/62	0/844	لومرسی
1/865	14/39	2/182	28/16	2/31	لوم‌شنی

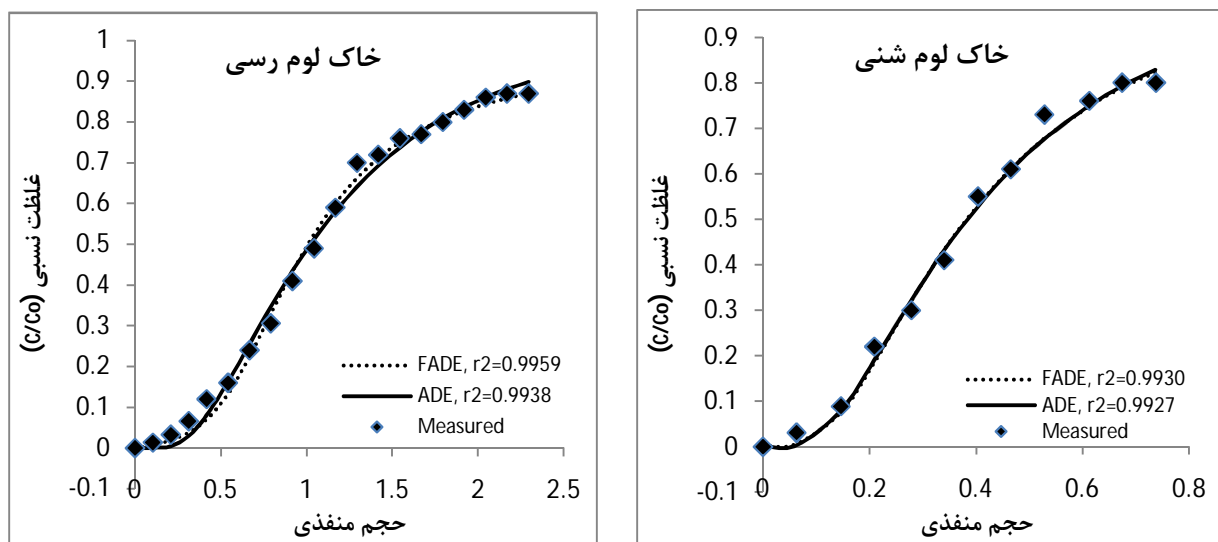
مشهودی باهم دارند (مشابه نتایجی که پچسکای و همکاران (2000) و هانگ و همکاران (2005) بدست آوردند). و مدل ADE مقادیر ضریب پخش را بیشتر از مدل FADE برای هر دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی تخمین زد دلیل این تفاوت را می‌توان به وجود پارامتر درجه کسری (α) در مدل FADE ربط داد زیرا در مدل FADE ضریب پخش با توان α ($1 < \alpha < 2$) با ضریب پخش با توان 2 در مدل ADE متناسب می‌باشد $(D_{FADE}^{\alpha} \equiv D_{ADE}^2)$.

مقایسه منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده و برآورد شده برماید با مدل‌های ADE و FADE در ستون-های خاک لوم رسی و لوم شنی شنی در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طوری‌که از شکل مذکور مشخص است در مقایسه با مدل انتقال-پخش، مدل کسری انتقال-پخش، برازش بهتری با داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده بویژه در خاک لوم رسی نشان می‌دهد. و این بیانگر این است که رفتار انتقال برماید در ستون‌های خاک لوم رسی بصورت رفتار نامتعارف یا غیرفیکسی بوده و مدل کسری انتقال-پخش بجای مدل انتقال-پخش که براساس قانون انتشار فیکسی بنا شده است برای شبیه‌سازی برماید مناسب می‌باشد.

با توجه به جدول 2، مقادیر ضریب پخش (D) و سرعت متوسط منفذی (V) خاک لوم‌شنی بیشتر از خاک لومرسی بدست آمدند. این نشان می‌دهد انتقال برماید در خاک لوم‌شنی نسبت به خاک لومرسی بیشتر تحت تأثیر حضور منافذ درشت و خلل و فرج قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در خاک لوم‌شنی انتقال برماید بیشتر تحت تأثیر پدیده انتقال توده‌ای¹ بوده است تا پدیده پخش هیدرودینامیکی². و در نتیجه نرخ جابجایی و حرکت برماید در طول ستون خاک لوم‌شنی در مقایسه با خاک لومرسی بیشتر است یعنی زمان رخنه برماید (مدت زمان حرکت برماید در طول ستون خاک) در خاک لوم‌شنی کمتر از خاک لومرسی می‌باشد مثلاً در خاک لومرسی غلظت نسبی پس از 50 دقیقه (حجم منفذی برابر 1/044)، نصف می‌شود ($C/C_0=0/5$) در حالی‌که این زمان در خاک لوم‌شنی 18/23 دقیقه (حجم منفذی برابر 0/381) می‌باشد (شکل 3). همچنین از جدول 2 مشخص است، ضریب‌های پخش برآورد شده از دو مدل ADE و FADE برای هر دو نوع خاک اختلاف معنی‌دار و

¹ Advection

² Hydrodynamic dispersion



شکل 3- مقایسه منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده و برآورد شده برمایید با مدل‌های ADE و FADE در ستون‌های خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی

مقادیر کوچکتر شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی (MRE) مدل FADE نسبت به مدل ADE، بیانگر دقت و کارایی بالای مدل کسری انتقال-پخش (FADE) نسبت به مدل انتقال-پخش (ADE) می‌باشد. منحنی‌های شکل 3 نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. مقادیر مثبت ضریب باقیمانده جرم (CRM) مدل‌های FADE و ADE، بیانگر برآورد بیشتر غلظت شیبه‌سازی شده توسط این مدل‌ها، نسبت به غلظت اندازه‌گیری شده و مشاهده‌ای می‌باشد.

نتایج تحلیل آماری

نتایج ارزیابی کمی اعتبار مدل‌های ADE و FADE در شبیه‌سازی انتقال برمایید در ستون‌های خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی در جدول 3 آمده است. مقادیر بزرگتر از 0/99 ضریب تبیین (r^2) و ضریب بازده مدل (EF) برای هر دو مدل ADE و FADE، حاکی از قابلیت و توانایی این مدل‌ها برای شبیه‌سازی انتقال برمایید در ستون‌های خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی می‌باشد. ولی مقادیر بزرگتر شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ضریب بازده مدل و

جدول 3- نتایج ارزیابی کمی اعتبار مدل‌های ADE و FADE در شبیه‌سازی انتقال برمایید در ستون‌های خاک دست نخورده لوم‌رسی و لوم‌شنی

EF	CRM	MRE	RMSE	r^2	مدل	بافت خاک
0/9930	0/0075	17/4937	0/0260	0/9938	ADE	لوم‌رسی
0/9951	0/0133	12/0917	0/0219	0/9959	FADE	لوم‌رسی
0/9913	0/0191	13/5357	0/0256	0/9927	ADE	لوم‌شنی
0/9916	0/0198	12/9563	0/0252	0/9930	FADE	لوم‌شنی

مدل و مقادیر کوچکتر شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای نسبی مدل FADE نسبت به مدل ADE، بیانگر دقت و کارایی بالای مدل کسری انتقال-پخش می‌باشد. و مقادیر درجه کسری (α) کمتر از دو برای انتقال برمایید در ستون‌های خاک لوم‌رسی و لوم-شنی نشان داد انتقال برمایید بصورت انتقال نامتعارف یا انتقال غیرفیکتی بوده و مدل کسری انتقال-پخش برای شبیه‌سازی برمایید کارآمدتر می‌باشد. با وجود کارایی بهتر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی رابطه کسری انتقال - پخش (FADE) برای شبیه‌سازی انتقال برمایید در ستون‌های کوتاه خاک دست نخورده لوم‌شنی و لوم‌رسی بصورت نموداری و آماری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. برآزش بهتر منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده و برآورد شده برمایید با مدل FADE و همچنین مقادیر بزرگتر شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ضریب بازده

فهرست منابع:

1. Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing, New York.
2. Benson, D.A. 1998. The Fractional Advection–Dispersion Equation: Development and Application, Ph.D. dissertation, University of Nevada, Reno, USA.
3. Benson, D.A., Schumer, R., Meerschaert, M.M., and Wheatcraft, S.W. 2001. Fractional dispersion, Lévy motion, and the MADE tracer tests. *Transport in porous media* 42: 211-240.
4. Benson, D.A., Tadjeran, C., Meerschaert, M.M., Farnham, I., and Pohl, G. 2004. Radial fractional-order dispersion through fractured rock. *Water Resources Research* 40. Art. No. W12416.
5. Benson, D.A., Wheatcraft, S.W., and Meerschaert, M.M. 2000a. Application of a fractional advection-dispersion equation. *Water Resources Research* 36(6): 1403-1412.
6. Benson, D.A., Wheatcraft, S.W., and Meerschaert, M.M. 2000b. The fractional-order governing equation of Lévy motion. *Water Resources Research* 36(6): 1413-1423.
7. Berkowitz, B., Emmanuel, S., and Scher, H. 2008. Non-Fickian transport and multiple-rate mass transfer in porous media. *Water Resources Research* 44, W03402, doi:10.1029/2007WR005906.
8. Berkowitz, B., and Scher, H. 1995. On characterization of anomalous dispersion in porous media. *Water Resources Research* 31:1461–1466.
9. Berkowitz, B., and Scher, H. 1997. Anomalous transport in random fracture networks. *Physics Review Letters* 79(20): 4038–4041.
10. Berkowitz, B., and Scher, H. 2008. Exploring the nature of non-Fickian transport in laboratory experiments. *Advances in Water Resources* 32(5): 750-755.
11. Bond, W.J., and Wierenga, P.J. 1990. Immobile water during solute transport in unsaturated sand columns. *Water Resources Research* 26(10): 2475-2481.
12. Chang, F.X., Chen, J., and Huang, W. 2005. Anomalous diffusion and fractional advection-diffusion equation, *ACTAPhy. SINICA* 54(3): 1113–1117.
13. Deng, Z., de Lima, M.I.P., and Singh, V.P. 2006. A fractional dispersion model for overland solute transport. *Water Resources Research* 42 W03416, doi: 10.1029/2005WR004146.
14. Deng, Z., Singh, V.P., and Bengtsson, L. 2004. Numerical solution of fractional advection–dispersion equation. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(5): 422–31.
15. Huang, G., Huang, Q., and Zhan, H. 2006. Evidence of one-dimensional scale-dependent fractional advection dispersion. *Journal of Contaminant Hydrology* 85: 53-71.
16. Huang, G., Huang, Q., Zhan, H., Chen, J., Xiong, Y., and Feng, S. 2005. Modeling contaminant transport in homogeneous porous media with fractional advection dispersion equation. *Science in China Ser. D Earth Sciences* 48: 295-302.
17. Jury, W.A. 1982. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resources Research* 18: 363-368.
18. Jury, W.A., and Roth, K. 1990. *Transfer Function and Solute Movement Through Soil: Theory and Applications*. Birkhäuser Boston, Cambridge, Mass.
19. Kim, S., and Kavvas, M.L. 2006. Generalized Fick's law and fractional ADE for pollutant transport in a river: detailed derivation. *Journal of Hydraulic Engineering* 11(1): 80–83.

20. Legates, D.R., and Mc Cabe, G.J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic validation. *Water Resources Research* 35(1): 233-241.
21. Lévy, M., and Berkowitz, B. 2003. Measurement and analysis of non-Fickian dispersion in heterogeneous porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 64: 203-226.
22. Liu, H.F., Genard, M., Guichard, S., and Bertin, N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany* 58(13): 3567-3580.
23. Pachepsky, Y., Benon, D., and Rawls, W. 2000. Simulating scale-dependent solute transport in soils with the fractional advective-dispersive equation. *Soil Science Society of America Journal* 64(3): 1234-1243.
24. Toride, N., Leij, F.j., and van Genuchten, M.Th. 1999. The CXTFIT code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments. Version 2.1, Research Rep. 137. U.S. Salinity Lab, Riverside, CA, USA.
25. vanGenuchten, M.Th., and Wierenga, P.J. 1977. Mass transfer studies in sorbing porous media: II. Experimental evaluation with Tritium ($^3\text{H}_2\text{O}$). *Soil Science Society of America Journal* 41(2): 272-278.
26. Zhang, X., Crawford, J.W., Deeks, L.K., Stutter, M.I., Bengough, A.G., and Young, I.M. 2005. A mass balance based numerical method for the fractional advection-dispersion equation: theory and application. *Water Resources Research* 41(7): W07029.
27. Zhang, Y., and Benson, D. 2008. Lagrangian simulation of multidimensional anomalous transport at the MADE site. *Geophysical Research Letters* 35, L07403, doi:10.1029/2008GL033222.
28. Zhang, Y., Benson, D.A., Meerschaert, M.M., and LaBolle, E.M. 2007a. Space-fractional advection-dispersion equations with variable parameters: Diverse formulas, numerical solutions, and application to the Macrodispersion Experiment site data. *Water Resources Research* 43, W05439, doi:10.1029/2006WR004912.