



برآورد پارامترهای انتقال سرب و مس از ستون خاک رسی غیر اشباع

شهرام شاه محمدی کلالق¹، حسین بابازاده²، امیرحسین ناظمی³، محمد منشوری²، حسین بیرامی⁴

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

2- استادیار گروه آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

3- استاد گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

4- دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده: shahmohammadi_sh@yahoo.com

چکیده

دقت برآورد رابطه انتقال توده‌ای - پخش در بررسی و ارزیابی انتقال املاح در یک ستون خاک عموماً به تعیین مناسب پارامترهای انتقال یعنی ضریب پخش (D) و فاکتور تأخیر (R) بستگی دارد. برآورد این دو پارامتر اغلب با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی-های سیال خروجی از ستون آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. در این تحقیق مجموعه داده‌های انتقال آلاینده‌های جذب شونده سرب (Pb) و مس (Cu) در ستون‌های کوتاه خاک همگن غیراشباع جهت برآورد پارامترهای انتقال توسط: (1) روش منحنی رخنه (BTC) و (2) روش تابع مکمل خطا (Erfc)، تحت شرایط تزریق منقطع و جریان ماندگار استفاده شدند. نتایج نشان داد که هر دوی روش‌های BTC و Erfc قابلیت برآورد دقیق فاکتور تأخیر (R) و ضریب پخش (D) را دارا بوده و غلظت شبیه‌سازی شده توسط روش Erfc برآزش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت.

کلمات کلیدی: سرب، مس، ضریب پخشیدگی، فاکتور تأخیر، روش منحنی رخنه، روش تابع مکمل خطا

مقدمه

پیش‌بینی انتقال املاح در مزرعه اغلب با حل معادله‌های انتقال از نوع انتقال توده‌ای¹ - پخش² حاصل می‌شود. برای سیستم یک بعدی با مقدار رطوبت ثابت و

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}$$

زیر می‌باشد:

[1]

که C غلظت نمک، D ضریب پخش³، R فاکتور تأخیر⁴، v متوسط سرعت آب منفذی و t و x برترتیب زمان و فاصله می‌باشند. پارامتر R در معادله 1 برای فعل و انفعالات ممکن بین ماده شیمیایی و فازهای خاک محاسبه می‌شود. در حالت جذب⁵ یا تبادل⁶، فاکتور تأخیر توسط معادله زیر بدست می‌آید (ون‌گنوختن و همکاران 1974):

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta}$$

[۲]

¹ Advection

² Dispersion

³ Dispersion Coefficient

⁴ Retardation factor

⁵ Adsorption

⁶ Exchange



ون گنختن و ویرنجا (1986) تعداد حجم‌های منفذی خروجی از ستون آزمایشگاهی را به عنوان فاکتور تأخیر، هنگامی - که غلظت املاح سیال خروجی برابر با نصف غلظت اولیه باشد، استفاده نمودند (یعنی $C = 0.5C_0$). D و R مطابق معادله 5 برآورد شدند:

$$\frac{vL}{D} = 4\pi R^2 S_R^2 \quad [5]$$

که S_R شیب منحنی رخنه در نقطه $C = 0.5C_0$ می باشد.

- روش تابع خطا (Erfc)

آموزگار فرد و همکاران (1983) با حداقل سازی مجموع مربعات اختلاف بین غلظت‌های سیال خروجی محاسبه شده و آزمایشگاهی، رابطه صریح و ساده‌ای برای R و D بدست آوردند.

- خاک و مواد شیمیایی

خاک مورد استفاده در آزمایش ما کائولینیت بود. برخی از خصوصیات خاک در جدول 1 ارائه شده است. جهت مطالعه فرایند جذب، محلول‌هایی با pH کم انتخاب شدند. بدین منظور، اسید هیدروکلریک جهت تنظیم pH هر یک از محلول‌ها در pH برابر با 4/5 استفاده شد. جهت استخراج محلول خروجی قابل اندازه‌گیری فلزات در دوره‌های زمانی منطقی، غلظت محلول فلزات در آزمایشات آبشویی ستون خاک (ppm) 2000 بود.

جدول 1- خصوصیات خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق

Properties	Quantity	Properties	Quantity
Bulk Porosity (%)	47	Medium Particle Size (micron)	0.65
Dry Density (g/cm ³)	1.36	Surface Area (m ² /g)	12
Specific Gravity	2.58	CEC (meq/100g)	8
pH	4.5		

- روش آزمایش

در این مطالعه، ستون‌های خاک آزمایشگاهی مطابق روش یانگ و همکاران (1990)، صبور (1997) و هانگ و همکاران (2005) آماده شدند. آزمایشات برای Pb و Cu با استفاده از دو ستون پلکسی‌گلس با طول 12/7 سانتی‌متر و قطر 3/81 سانتی‌متر انجام یافتند. فنجان‌های (صفحات) مکش سرمایی در عمق‌های 3، 5، 7، و 9 سانتی‌متری زیر سطح خاک نصب شدند. محلول‌های انتخابی با بار فشار از بالای ستون تزریق شده و محلول خروجی در فشار اتمسفر از ته ستون استخراج شد. یک فشار هیدرولیکی دو متری جهت شبیه‌سازی بار فشار در ستون‌های آبشویی، با اعمال یک فشار هوای معادل دو متر ستون آب اعمال شد. تزریق منقطع $PbCl_2$ و $CuCl_2$ با غلظت 2000ppm در ستون‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. محلول‌های خاک بصورت همزمان با استفاده از فنجان‌های مکش سرمایی از اعماق مختلف استخراج و غلظت Pb و Cu محلول‌های استخراجی توسط دستگاه جذب اتمی (AA) اندازه‌گیری شد. تمام این اندازه‌گیری‌ها تحت بار هیدرواستاتیکی ثابت و در دمای محیط برای دو محلول آلاینده متفاوت انجام یافتند.

نتایج و بحث

- منحنی رخنه آزمایش شستشوی ستون‌های خاک و محاسبه پارامترها

همانطور که در شکل 1a برای منحنی‌های رخنه سرب و مس در عمق 3 سانتی‌متری نشان داده شده است، زمانی که $C/C_0 = 0.5$ است حجم منفذی و شیب (S_R) معادله 5 بترتیب برابر با 2/42 و 0/068 برای سرب و 2/04 و 0/109 برای



مس می‌باشند. همچنین مقدار D برای سرب برابر با $19/44 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$ و برای مس برابر با $10/86 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$ بود. بطور مشابه با استفاده از شکل‌های 1(b-d)، فاکتور تأخیر، شیب و ضریب پخش برای سرب و مس بدست آمدند، که نتایج برای چهار عمق مختلف در جدول 2 آورده شده است. از سوی دیگر، بر اساس محاسبات تابع مکمل خطا، فاکتور تأخیر و ضریب پخش در عمق 3 سانتی‌متری بترتیب برای سرب برابر با $3/16$ و $28/86 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$ و برای مس بترتیب برابر با $2/86$ و $14/88 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$ بود. همچنین محاسبات برای عمق‌های 5، 7 و 9 سانتی‌متری در جدول 2 آورده شده است. صرف نظر از اینکه روش BTC استفاده شود یا روش Erfc، روند فاکتور تأخیر بصورت زیر می‌باشد: $\text{Pb} > \text{Cu}$. یعنی این‌که قابلیت تحرک فلز سنگین مس در خاک رسی غیر اشباع بیشتر از سرب می‌باشد. الیوت و همکاران (1986)، پالس و بوئن (1988)، و صبور (1997) نیز روند مشابهی را از نظر قابلیت تحرک فلزات سنگین فوق در مطالعاتشان یافتند. فاکتور تأخیر و سرعت انتقال فلزات در خاک‌های رسی می‌تواند به شعاع یونی و خصوصیات شیمیایی آنها مربوط شود. شعاع هیدراته Pb^{2+} و Cu^{2+} بترتیب حدود 4/5 و 6 آنگسترم است. شعاع هیدراته کوچکتر بیانگر آسانی و سرعت بالای جذب آن روی سطح ذرات خاک است.

جدول 2- پارامترهای برآورد شده برای انتقال سرب و مس با استفاده از روشهای BTC و Erfc

Depth(cm)	Heavy Metal	BTC method					Erfc Method			
		S_R	R	D(cm ² /d)	r^2	$\chi^2 \dagger$	R	D(cm ² /d)	r^2	$\chi^2 \dagger$
3	Pb	0.068	2.42	19.44	0.9877	2.5E-02	3.16	28.86	0.9874	6.4E-03
	Cu	0.109	2.04	10.86	0.9884	3.1E-02	2.86	14.88	0.9808	1.4E-02
5	Pb	0.036	7.03	13.98	0.9579	3.2E-02	5.85	28.47	0.9748	1.0E-02
	Cu	0.021	5.25	73.83	0.9896	6.1E-03	5.20	34.62	0.9963	1.5E-03
7	Pb	0.020	9.37	36.80	0.9870	3.9E-03	8.96	24.50	0.9808	7.5E-03
	Cu	0.047	5.62	18.00	0.9858	9.4E-03	6.15	15.14	0.9921	3.5E-03
9	Pb	0.026	10.45	21.47	0.9931	1.4E-03	10.40	21.63	0.9931	1.3E-03
	Cu	0.036	6.27	31.64	0.9596	2.1E-02	6.50	13.52	0.9946	1.7E-03

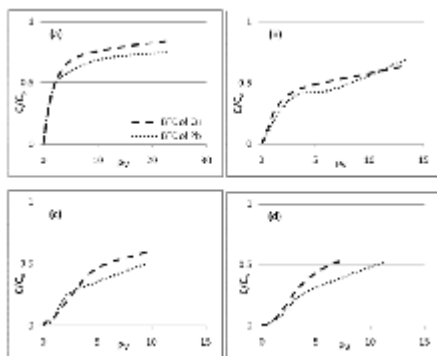
همانطور که در جدول 2 نشان داده شده است، در مجموع فاکتور تأخیر برای Pb و Cu کمتر به نظر می‌رسد این موضوع می‌تواند به دلیل بار فشار بزرگ اعمال شده در بالای ستون باشد.

- شبیه‌سازی انتقال سرب و مس

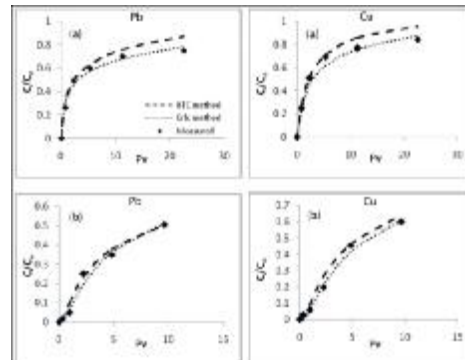
مقادیر مربع خطا و فاکتور تأخیر برآورد شده برای هر دو آلاینده توسط روش BTC نزدیک به مقادیر برآورد شده توسط روش Erfc بود. این دلالت بر این دارد که نتایج مشابهی با استفاده از روش BTC جهت شبیه‌سازی انتقال جذبی آلاینده در مقایسه با روش Erfc می‌تواند بدست آید. شکل‌های 2 و 3 نمونه‌هایی از مقایسه بین غلظت‌های برآورد شده توسط روش BTC و روش Erfc و مقادیر اندازه‌گیری شده را به ترتیب برای سرب و مس در عمق‌های 3 و 5 سانتی‌متری نشان می‌دهند. در مقایسه با روش BTC، روش Erfc برازش بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده در



عمق‌های 3 و 5 سانتی‌متری دارد. نتایج جدول 2 (مقادیر r^2 و χ^2) نیز مؤید این موضوع می‌باشد. غلظت‌های برآورد شده با روش BTC بزرگتر از غلظت‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند.



شکل 1- منحنی رخنه سرب و مس در عمق‌های (a) 3، (b) 5، (c) 7 و (d) 9 سانتی‌متری



شکل 2- مقایسه بین مقادیر برآورد شده غلظت سرب و مس با استفاده از روش‌های BTC و Erfc در عمق‌های (a) 3 و (b) 5 سانتی‌متری از سطح ستون خاک.

نتیجه‌گیری

هر دوی روش‌های BTC و Erfc قابلیت برآورد دقیق فاکتور تأخیر (R) و ضریب پخش (D) را دارا می‌باشند. غلظت شبیه‌سازی شده توسط روش Erfc مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. پدیده پخش و انتشار و واکنش تبادل فلزات در محیط‌های متخلخل می‌تواند از حجم منفذی شستشوی ستون خاک آزمایشگاهی برآورد شود. صرف نظر از اینکه روش BTC استفاده شود یا روش Erfc، روند تغییرات فاکتور تأخیر بصورت $Pb > Cu$ می‌باشد، که این نشان‌دهنده قابلیت تحرک پذیری فلز سنگین مس نسبت به سرب در خاک رسی غیراشباع می‌باشد.



منابع

- Amoozegar-Fard, M., Warrick, A.W., and Fuller, W.H., 1983. "A simplified model for solute movement through soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 1047– 1049.
- Basak, P., and Murty, V.V.N., 1979. "Determination of hydrodynamic dispersion coefficients using "inverfc"", *J. Hydrol.*, 41, 43-48.
- Elliott, H.A., Liberati, M.R. and Huang, C.P., 1986. "Competitive adsorption of heavy metals by soils", *J. Environ. Qual.*, 15, 214-219.
- Fried, J.J., and Combarous, M.A., 1971. "Dispersion in porous media", In: V.T. Chow (Editor), *Advances in Hydrosociences*, Vol. 7. Academic Press, New York, N.Y., pp. 169-182.
- Huang, G., Huang, Q., Zhan, H., Zhan, H., Chen, J., Xiong, Y. and Feng, S., 2005. "Modeling contaminant transport in homogeneous porous media with fractional advectiondispersion equation", *Science in China Ser. D Earth Sciences*. 48, 295-302.
- Kirkham, D., and Powers, W.L., 1972. "Advanced Soil Physics", Wiley-Interscience, New York, N.Y., 534 pp.
- Lapidus, L., and Amundson, N.R., 1952. "Mathematics of adsorption in beds. IV. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange chromatographic columns", *J. Phys. Chem.*, 56, 984-988.
- Passioura, J.B., Rose, D.A., and haszler, K., 1970. "Lognorm: a program for analyzing experiments on hydrodynamic dispersion", Technical Memorandum 70/6, CSIRO, Div. of Land Res., Canberra.
- Puls, W.R., and Bohn, H.L., 1988. "Sorption of cadmium, nickel and zinc by kaolinite and montmorillonite suspensions", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1289–1292.
- Rose, D.A., and Passioura, J.B., 1971. "The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion", *Soil Sci.*, 111, 252-257.
- Sabour, M.R., 1997. "Inorganic contaminant transport through unsaturated clay soil", Dissertation of Doctorial Degree, Concordia University.
- Skaggs, T.H., and Leij, F.J., 2002. "Solute transport: theoretical background", In: Dane, J.H., Topps, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 1353– 1380.
- van Genuchten, M.Th., Davidson, J.M., and Wierenga, P.J., 1974. "An evaluation of kinetic and equilibrium equations for the prediction of pesticide movement through porous media", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 29-35.
- van Genuchten, M.Th., and Wierenga, P.J., 1986. "Solute dispersion coefficients and retardation factors", In: Klute, A., et al., (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, (2nd ed.). Agronomy Monograph, vol. 9. Soil Sci. Soc. Am., adison, WI, pp. 1025– 1031.
- Yong, R. N., and Warith, M., 1990. "Contaminant migration effect on dispersion coefficients", ASTM, STP 1095, pp 69-80.