

## Sensitivity analysis of hydraulic parameters of transport heavy metals Cd, Ni, and Zn in disturbed and undisturbed loamy soil columns

Seyyede Kosar Daneshyar<sup>1</sup> , Mohammad Reza Dalalian<sup>2\*</sup> , Shahram Shahmohammadi-Kalalagh<sup>3</sup> , Elnaz Sabbaghtazeh<sup>2</sup> , Siamak Saedi<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Assistance Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Soil contamination due to heavy metals is a global environmental issue. One vital aspect for understanding the impact of a contaminant in porous media is to describe their transport behavior using appropriate models. The governing equations for solute transport in soil consist of the convection–dispersion equation (CDE) and the mobile–immobile model (MIM). Mathematical models are usually used to evaluate solute transport in porous media. The first model used to express the transport of solutes and pollutants in porous media is CDE it provides acceptable and satisfactory results in homogeneous soils in laboratory tests. Hydrus-1D is a modeling environment for simulating water, heat, and solute movement in one-dimensional variably saturated media. Sensitivity analyses and model identification are standard approaches in modeling applications to investigate the relative importance of model components that control the system's behavior. The sensitivity analysis is applied to identify the parameters that influence the model performance most. The sensitivity analysis is defined as the rate of variation in the model outputs due to changes in the input parameters. This study is a fundamental practice for analyzing the behavior of a model under different conditions of an application. The sensitivity analysis could be a practical and powerful tool for investigating the role and importance of model components, such as parameters and forcing data on the model responses.

#### Materials and Methods

The loamy soil samples were collected in both disturbed and undisturbed forms from a farm in the Qaramalek area with appropriate humidity located in western Tabriz, Iran, at 38° 5' 59.89" north and 45° 12' 38.57" east. To determine and present breakthrough curves, concentration values are required throughout the laboratory columns at different times. To simulate the CDE model, Hydrus software was used. Solute transport parameters such as diffusion coefficient (D), distribution coefficient (Kd), and dispersion coefficient ( $\beta$ ) were estimated using soil hydraulic parameters and data related to the metal concentration of cadmium, nickel, and zinc by an inverse modeling method. A sensitivity analysis was carried out for the identification of the most influential factors on the model output. This method examines the impact of input data on a given model and its actual conditions. In line with this purpose, in each run, one input data was changed to a value equal to Positive and negative five to 15%, and the other input data was kept constant. To identify the effect of the input parameters of a given model on its output, the sensitivity analysis for the Hydrus model was utilized. The parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D), distribution coefficient (Kd), and spreading parameter ( $\beta$ ) were changed between five to 15 %. Sensitivity analysis was carried out on cadmium, nickel, and zinc metals with densities equal to 50, 100, and 150 mg l<sup>-1</sup> in two disturbed and undisturbed soils.

#### Results and Discussion

Examining the breakthrough curves of cadmium in disturbed and undisturbed soils shows that the fitted curves using the Hydrus model and the measured curve almost coincide with each other, which is more obvious in disturbed soils. It should be noted that the model fits better in the disturbed soil than in the undisturbed soil. This

may be due to the disruption of the structure the increase in the contact surface of the particles in the disturbed soil and the presence of heterogeneity in the undisturbed soil column. The simulation results show the transport of heavy metals (Zn, Ni, Cd) and Hydrus output have the highest and the lowest sensitivity to dispersion coefficient  $\beta$  and diffusion coefficient (D), respectively. In general, the impact of input parameters can be reported as follows: spreading parameter ( $\beta$ ) > distribution coefficient (Kd) > dispersion coefficient (D). Therefore, it can be observed that D has a negligible effect on the model results; and consequently, measurement errors can be ignored.

### Conclusion

Sensitivity analysis is used to analyze model behavior under different conditions. This analysis is used to investigate the relative importance of model components that control the system's behavior. In this research, the transfer of hydraulic parameters of heavy metals Cd, Ni, and Zn in disturbed and undisturbed loam soil columns with initial concentrations of 50, 100, and 150 mg l<sup>-1</sup> was performed under the simulation of the Hydrus-1D model. The comparison of the simulated BTCs of the Hydrus-1D model and the measured data indicates a high agreement between the simulation curves and the measured data. Solute transport parameters such as hydrodynamic dispersion coefficient (D), distribution coefficient (Kd), and spreading parameter ( $\beta$ ) were estimated using soil hydraulic parameters and data related to Cd, Ni, and Zn metal concentration by inverse modeling method. Based on the results of sensitivity analysis, the spreading parameter ( $\beta$ ) and hydrodynamic dispersion coefficient (D) had the highest and lowest sensitivity, respectively. In other words, due to the significant effect of  $\beta$  changes on the output values of the model, this parameter should be measured more accurately and on the other hand, the measurement errors of parameter D can be ignored. The degree of sensitivity of the parameters was independent of the initial concentration of the elements.

**Keywords:** Dispersion coefficient, Distribution coefficient, Hydrus, Spreading parameter, Simulation

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Islamic Azad University, Tabriz Branch for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' contribution

**Seyyede Kosar Daneshyar:** Writing-original draft preparation, resources, software; **Mohammad Reza Dalalian:** Formal analysis and investigation, manuscript editing; **Shahram Shahmohammadi-Kalalagh:** Formal analysis and investigation, manuscript editing; **Elnaz Sabbaghtazeh:** Methodology, supervision; **Siamak Saedi:** Methodology, supervision.

\*Corresponding Author E-mail: [mdalalian@iaut.ac.ir](mailto:mdalalian@iaut.ac.ir)

**Citation:** Daneshyar, S.K., Dalalian, M.R., Shahmohammadi-Kalalagh, SH., Sabbaghtazeh, E., & Saedi, S. (2024). Sensitivity analysis of hydraulic parameters of transport heavy metals Cd, Ni, and Zn in disturbed and undisturbed loamy soil columns. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 203-224.  
DOI: 10.22098/mmws.2023.13055.1299

Received: 04 June 2023, Received in revised form: 26 June 2023, Accepted: 03 July 2023, Published online: 03 July 2023  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 203-224

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی انتقال فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی در ستون‌های خاک لومی دست‌خورده و دست‌نخورده

سیده کوثر دانشیار<sup>۱</sup>، محمدرضا دلالیان<sup>۲\*</sup>، شهرام شاه‌محمدی کلایق<sup>۳</sup>، الناز صباغ‌تازه<sup>۴</sup>، سیامک ساعدی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

تحلیل حساسیت برای تحلیل رفتار مدل تحت شرایط مختلف کاربرد دارد. نتایج تحلیل حساسیت به‌منظور تعیین دقت قابل قبول در اندازه‌گیری داده‌های ورودی مهم است. در این پژوهش، انتقال فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی در ستون‌های خاک لومی دست‌خورده و دست‌نخورده با غلظت‌های اولیه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با استفاده از مدل Hydrus-1D شبیه‌سازی و پارامترهای انتقال املاح نظیر ضریب پخش (D)، ضریب توزیع (Kd) و ضریب پراکندگی ( $\beta$ ) با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک و داده‌های مربوط به غلظت فلز کادمیم، نیکل و روی به روش مدل‌سازی معکوس برآورد شد. بررسی منحنی‌های رخنه حاصل از شبیه‌سازی مدل Hydrus-1D و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده تطابق بالای منحنی‌های شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری بود. برازش مدل در خاک دست‌خورده نسبت به خاک دست‌نخورده بهتر بود که این امر ممکن است به دلیل بهم‌خوردگی ساختمان خاک و افزایش سطح تماس ذرات خاک در خاک دست‌خورده و وجود ناهمگنی ذرات در ستون خاک دست‌نخورده باشد. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای پراکندگی ( $\beta$ ) و ضریب پخش (D) به‌ترتیب با دامنه حساسیت بیش‌تر از ۱/۵ و کم‌تر از ۰/۳ بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات در هر دو نوع خاک دست‌خورده و دست‌نخورده نشان داد. در کل روند حساسیت پارامترهای مدل به‌صورت زیر بود: پارامتر پراکندگی < ضریب توزیع < ضریب پخش. به‌عبارتی با توجه به تأثیر قابل توجه تغییرات  $\beta$  بر مقادیر خروجی مدل، در صورت تعیین عملی و آزمایشگاهی این پارامتر بایستی با دقت بیش‌تری اندازه‌گیری شود و در مقابل می‌توان از خطاهای اندازه‌گیری پارامتر D چشم‌پوشی کرد. درجه حساسیت پارامترهای مستقل از میزان غلظت اولیه عناصر بود.

واژه‌های کلیدی: پارامتر پراکندگی، شبیه‌سازی، ضریب پخش، ضریب توزیع، Hydrus

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mdalalian@iaut.ac.ir

استناد: دانشیار، سیده کوثر، دلالیان، محمدرضا، شاه‌محمدی کلایق، شهرام، صباغ‌تازه، الناز، و ساعدی، سیامک (۱۴۰۳). تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی انتقال فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی در ستون‌های خاک لومی دست‌خورده و دست‌نخورده. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۲۰۳-۲۲۴.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13055.1299

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴، تاریخ بازنگری: ۰۱۴۰۲/۰۴/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۲۰۳ تا ۲۲۴

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



## ۱- مقدمه

درک رفتار و انتقال فلزات برای پیش‌بینی میزان آلودگی در سیستم آب زیرزمینی، خاک و برای محافظت از سلامت عمومی ضروری است (Liu et al., 2022). یک جنبه مهم در درک سرنوشت یک آلاینده در محیط‌های متخلخل، توصیف رفتار انتقال آن با استفاده از مدل‌های مناسب است (Pang and Close, 1999). مدل‌ها می‌توانند در ارزیابی خطرات احتمالی که فلزات سنگین مختلف برای محیط زیست ایجاد می‌کنند، دارای ارزش زیادی باشند. بنابراین، برای توصیف و پیش‌بینی جذب و تجمع فلزات سنگین توسط گیاهان یا جذب و انتقال فلزات سنگین در خاک و رسوبات، اغلب از مدل‌ها استفاده می‌شود (Michel and Ludwig, 2005). پیش‌بینی قابل اعتماد مدل به تخمین مقدار مناسب برای پارامترهای فرآیندهای انتقال املاح بستگی دارد. مدل‌سازی معکوس یک روش محبوب برای تخمین پارامترها با کمینه‌سازی یک تابع هدف تبدیل شده است که معمولاً مشکل بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد. تا به امروز، تلاش‌های محدودی برای تخمین پارامترهای انتقال املاح با مدل معکوس با استفاده از داده‌های یک ستون خاک لایه‌ای انجام شده است (Lin and Xu, 2020).

روابط حاکم بر انتقال املاح در خاک شامل رابطه انتقال-پخش (CDE) و مدل روان-ساکن (MIM) است. با توجه به متخلخل بودن و پیچیدگی محیط خاک، تعیین سرنوشت آلاینده در آن مشکل است (Gove et al., 2001; Jacques et al., 2002). به دلیل مشکل بودن مشاهده و اندازه‌گیری آلاینده در زمین‌های کشاورزی، کاربرد مدل‌های ریاضی توصیه شده است (Shahmohammadi and Beyrami, 2015). رابطه انتقال-پخش (CDE) اولین مدلی است که به طور وسیع برای انتقال املاح و آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبول و رضایت‌بخشی در خاک‌های همگن و البته در مقیاس آزمایشگاهی ارائه نموده است (Jury, 1982; Huang et al., 2005). رابطه سهموی انتقال توده‌ای-پخشیدگی برای انتقال یک‌بعدی عناصر خنثی و غیرواکنش‌گر تحت جریان یکنواخت آب به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود (Bear, 1972):

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

در رابطه بالا، C غلظت آلاینده ( $ML^{-3}$ )، D ضریب پخش هیدرودینامیکی یا (ضریب پخش) ( $L^2T^{-1}$ )، V سرعت متوسط آب منفذی ( $LT^{-1}$ )، x فاصله (L) و t زمان (T) است.

برنامه‌های رایانه‌ای متعددی برای مدل‌سازی جابه‌جایی انواع آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل بر پایه راه‌حل‌های تحلیلی یا عددی مختلف بسط داده شده است که در این بین مدل‌های CXTFIT، HYDRUS-1D و STANMOD بیش‌ترین کاربرد را

برای به دست آوردن پارامترهای انتقال آلاینده‌ها مانند سرعت آب منفذی، ضریب تأخیر، ضرایب جذب، و پارامترهای تخریب یا تولید را دارند (Pietrzak, 2021). همچنین، مدل غیرتعادلی CDE به طور گسترده برای شبیه‌سازی انتقال فلز در ستون خاک به دلیل تطبیق‌پذیری آن در تحقیق‌های متعددی استفاده شده است (Yuan and Peng, 2017; Yang et al., 2019; Jiang et al., 2022; Wang et al., 2020; Yang et al., 2022). همچنین، کاربرد مدل‌های عددی در پژوهش‌های مختلف برای پیش‌بینی رفتار انتقال یون‌ها در خاک گزارش شده است (Nguyen Ngoc et al., 2009; Zhang et al., 2020; Pietrzak, 2021). مدل HYDRUS-1D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت یک‌بعدی آب، محلول و گرما در خاک است. این مدل توسط Simunek et al. (1998) در آزمایشگاه شوری آمریکا بسط داده شد و شامل حل عددی روابط انتقال-پخش (CDE) برای بررسی حرکت آلودگی و گرما در خاک است. روابط به روش عناصر محدود حل و قادر به شبیه‌سازی حرکت آلودگی در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و حتی ویژگی‌های خاک را به روش معکوس تخمین می‌زند (Simunek et al., 1998).

در پژوهشی، Zhi-Ming (2012) برای برآورد پارامترهای CDE از مدل‌های تعادلی و غیرتعادلی در برنامه CXTFIT استفاده کرد و نشان داد که هر دو مدل تعادلی و غیرتعادلی در مدل‌سازی انتقال کادمیم به خوبی عمل کردند. انتقال KCl در ستون‌های خاک توسط نرم‌افزار CXTFIT و اعتبارسنجی آن با شبیه‌سازی مدل HYDRUS-1D بررسی شد. نتایج نشان داد که تفاوت قابل‌توجهی بین برآورد پارامترهای انتقال املاح و شبیه‌سازی عددی وجود ندارد (Kanzari et al., 2015). نتایج تحلیل حساسیت در توصیف انتقال یک آلاینده غیرواکنش‌گر در خاک همگن و ناهمگن توسط Moradi and Mehdinejadi (2018) با استفاده از رابطه ADE و FADE نشان داد میانگین سرعت آب منفذی و ضریب پراکندگی بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را در هر دو مدل دارند. نتایج بررسی چهار مدل CDE، MIM، FADE، CTRW در انتقال املاح روی، کادمیم و نیکل در ستون‌های خاک لومی دست‌خورده و دست‌نخورده توسط Morsali et al. (2019) نشان داد که مدل CDE، MIM در مقایسه با مدل FADE، CTRW برای شبیه‌سازی حمل و نقل فلزات سنگین مناسب‌تر هستند. در این پژوهش شبیه‌سازی انتقال فلزات سنگین (روی، نیکل، کادمیم)، با استفاده از مدل CXTFIT انجام و تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از مدل CTRW بررسی شد. نتایج نشان داد در شبیه‌سازی انتقال این فلزات خروجی مدل بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را به پارامتر پراکندگی  $\beta$  و ضریب پخش هیدرودینامیکی D دارد.

طریق Rosetta به دست آمد. معمول ترین آن‌ها به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) است (Van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\frac{h}{h_0})^m]^n} \quad m=1-\frac{1}{n} \quad n>1 \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (4)$$

در این روابط،  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده،  $\theta_s$  رطوبت اشباع،  $\alpha$  معکوس مقدار هوای ورودی،  $m$  پارامتر مرتبط با تقارن منحنی حول نقطه عطف،  $n$  توزیع اندازه منافذ و  $l$  پارامتر هدایت‌پذیری منفذی،  $K_s$  هدایت آبی اشباع و  $S_e$  اشباع نسبی است. برداشت آب توسط ریشه (مقدار  $S$  در رابطه ۲) براساس حجم آب برداشت شده توسط گیاه در واحد حجم خاک در واحد زمان تعیین می‌شود. در این مدل،  $S$  به صورت رابطه (۵) تعریف شده است (Feddes et al., 1978):

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (5)$$

در آن،  $\alpha(h)$  تابع تنش آبی و  $S_p$  شدت پتانسیل جذب آب است. برای تخمین و برآورد پارامترهای هیدرولیکی معمولاً از روش مدل‌سازی معکوس که یک روش بهینه‌سازی است استفاده می‌شود. با توجه به قابلیت مدل‌سازی معکوس، از نرم‌افزار Hydrus\_1D استفاده شد. در روش حل معکوس، با استفاده از حداقل‌سازی تفاوت بین غلظت‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط مدل، پارامترهای بهینه تعیین می‌شود.

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعه

نمونه‌های خاک لوم از منطقه قراملک واقع در غرب شهر تبریز با موقعیت جغرافیایی "۵۹/۸۹° ۵' ۳۸" شمالی و "۳۸/۵۷° ۱۲' ۴۵" شرقی به صورت دست‌نخورده و دست‌خورده تهیه شد. در جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی خاک مرتعی منطقه ارائه شده است. بافت خاک یکسان، ولی توزیع اندازه ذرات در نمونه‌ها متفاوت بود.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی خاک

Table 1- Some physical properties of the soil

Sand	Silt	Clay	Soil texture	Organic matter	pH	Bulk density	Field capacity	EC
	درصد		-	درصد	-	گرم بر سانتیمتر مکعب	درصد	دسی زیمنس بر متر
43.9	35.1	21	Loam	2.10	7.7	1.32	20	1.7

کف ستون‌ها کنده شده و بالا آورده شد. حفاری و خالی کردن تدریجی خاک اطراف لوله‌ها، راندن لوله‌های PVC به درون خاک و قرارگیری به صورت ستون خاک دست‌نخورده داخل لوله را آسان‌تر ساخت. جهت نفوذ آسان‌تر لوله‌ها به درون خاک، هم‌زمان با ورود لوله‌ها مرتباً خاک اطراف آن‌ها حفاری و تخلیه شد. ستون‌های خاک دست‌خورده از همان خاک (لوم) تهیه شد. برای این منظور از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری مقدار کافی از خاک با بیلچه برداشته شد. پس از هوا خشک کردن و کوبیدن ملایم و

با توجه به این که در یک مدل پارامترهای زیادی دخیل هستند، انجام تحلیل حساسیت مدل برای درک بهتر رفتار مدل و اطمینان از نحوه کارکرد آن و درک بهتر از پارامترهای ورودی برای تغییرپذیری خروجی‌های مدل استفاده می‌شود (Lurette et al., 2009; Burgers et al., 2010; Lamboni et al., 2011; Saltelli et al., 2019; Rouger et al., 2023). تحلیل حساسیت درک دقیقی به‌عنوان گامی رو به جلو برای شناسایی مدل و راهنمایی برای واسنجی مدل در کاربردهای آبی ارائه می‌دهد. تحلیل حساسیت ابزار مفیدی برای بررسی نقش و اهمیت اجزای مدل، مانند پارامترهای داده‌های ورودی و تولید پاسخ‌های مدل است، لذا تغییر مقادیر پارامترهای مدل و ارزیابی تغییرات را ممکن می‌کند (Soares and Calijuri, 2021). مطالعه حاضر با هدف تعیین تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی در مدل یک‌بعدی Hydrus\_1D انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل عددی Hydrus-1D

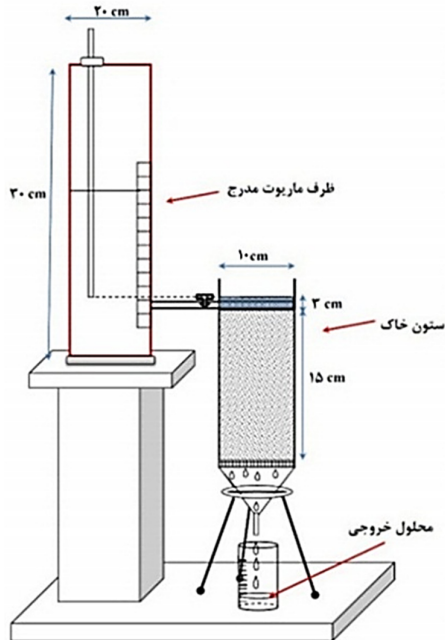
در مدل Hydrus-1D حرکت یک‌بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی (الگوی خطی عناصر محدود) رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - s \quad (2)$$

در این رابطه،  $\theta$  رطوبت حجمی ( $L^3 L^{-3}$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $K(\theta)$  هدایت آبی غیراشباع ( $LT^{-1}$ )،  $h$  مکش ماتریک ( $L$ )،  $\alpha$  زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی (برای حرکت عمودی آب در خاک  $\alpha=0$ ، برای حرکت افقی  $\alpha=90$  و برای سایر مسیرها  $0 < \alpha < 90$  است)،  $S$  برداشت آب توسط ریشه ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ) و  $x$  فاصله ( $L$ ) است. در این مدل برای توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک نظیر منحنی رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع روابط متعددی تعریف شده است. با استفاده از قابلیت نرم‌افزار، مشخصات هیدرولیکی خاک از

### ۲-۳- تهیه ستون‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده

به‌منظور تهیه ستون‌های خاک دست‌نخورده لوله‌های پلی‌اتیلن (PVC) با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر تهیه شد. جهت سهولت فروروی لوله‌ها در خاک، لبه خارجی آن‌ها از طرف خارج تیز شده و سپس لوله‌ها به آرامی و با فشار دست وارد خاک شدند پس از پر شدن استوانه از خاک تا ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، دهانه لوله‌ها با توری پوشیده شده تا از ریزش خاک جلوگیری شود. سپس لوله‌های PVC همراه با خاک دست‌نخورده داخل آن‌ها تا



شکل ۱- نمایی از ستون‌های خاک در طول رخنهٔ محلول‌های فلزات سنگین

Figure 1- The schematic of the soil column during the breakthrough of the heavy metals

با قطع جریان محلول زمینه بلافاصله محلولی از هر یک از فلزات سنگین مورد نظر ( $\text{ZnCl}_2$ ،  $\text{CdCl}_2$  و  $\text{NiCl}_2$  مطابق با فلز مورد آزمایش) به غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر ( $C_0$ ) در هر یک از تیمارها با استفاده از یک ظرف ماریوت دیگر به ستون‌ها تزریق شد. سپس جریان محلول ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  با همان بار ثابت یک سانتی‌متری مجدد برقرار شد. زه آب خروجی بلافاصله بعد از تزریق محلول مورد نظر از هر ستون در زمان‌های پنج و ۱۵ دقیقه جمع‌آوری و غلظت فلز سنگین مورد نظر (C) در آن اندازه‌گیری شد. این عمل تا زمان رسیدن به غلظت ثابت فلز سنگین مورد نظر زه آب خروجی ادامه یافت. غلظت‌های اندازه‌گیری شده تبدیل به غلظت نسبی ( $C/C_0$ ) شده و منحنی‌های رخنه از ترسیم ( $C/C_0$ ) در مقابل زمان تجمعی (t) به‌دست آمد. غلظت فلزات سنگین  $\text{Zn}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Cd}$  در محلول خروجی با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

در این پژوهش با اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی و شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه با استفاده از نرم‌افزار Hydrus-1D، پارامترهای مجهول و برازش منحنی رخنه اندازه‌گیری شده از روش معکوس تعیین شدند. پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از قابلیت Rosetta در نرم‌افزار Hydrus-1D به‌دست آمد. با بهره‌گیری از مدل Hydrus-1D پارامترهای ضریب پخش، ضریب توزیع و ضریب پراکندگی در مدل CDE برآورد و منحنی رخنه اندازه‌گیری شده برازش داده شد، سپس

عبور از الک دو میلی‌متری در درون لوله‌های PVC به‌نحوی پر شد که جرم مخصوص ظاهری آن برابر با جرم مخصوص خاک دست‌نخورده (۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) شود. برای جلوگیری از وقوع جریان مستقیم محلول ردیاب از فضای بین دیوارهٔ ستون خاک و لوله PVC قبل از پرسیدن لوله‌ها جدار داخلی آن‌ها با پارافین مذاب آغشته شد. از هر خاک چه دست‌خورده و چه دست‌نخورده سه ستون تهیه و ستون‌ها برای انجام آزمایش جانشینی اختلاط‌پذیر با استفاده از محلول‌های  $\text{ZnCl}_2$ ،  $\text{CdCl}_2$  و  $\text{NiCl}_2$  به‌کار رفت. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها با سه تکرار (دست‌خورده و دست‌نخورده برای هر فلز سنگین و تک‌تک غلظت‌ها، برای هر فلز شش نمونه در سه تکرار در مجموع ۱۸ نمونه) انجام شد. برای انجام آزمایش جانشینی اختلاط‌پذیر، ابتدا ستون‌ها از قسمت پایین به‌تدریج با محلول زمینه ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  اشباع شد. پس از اشباع نمودن، با استفاده از شست و شوی متوالی با محلول زمینه اجازه داده شد تا اولاً خاک در نمونه‌های دست‌خورده نشست طبیعی احتمالی خود را کامل کند و ثانیاً خاک داخل ستون‌ها (چه دست‌نخورده و چه دست‌خورده) با محلول  $\text{CaCl}_2$  به تعادل برسند. ستون‌های خاک به‌منظور آب‌شویی با محلول ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  به‌عنوان محلول زمینه مطابق شکل ۱ به مخزن ماریوت وصل شد. از مخزن مذکور جهت ابقای شدت جریان ثابت محلول روی ستون خاک استفاده شد. کف این ستون‌ها در داخل یک کیف پلاستیکی روی اسکاچ و تور سیمی تثبیت شد (شکل ۱). نقش تور سیمی و اسکاچ برای نگهداری و تحمل وزن ستون خاک و جلوگیری از شسته شدن احتمالی ذرات خاک از انتهای ستون خاک است. منافذ تور سیمی و اسکاچ روی آن به حد لازم درشت می‌باشند تا محدودیتی برای جریان آب در ستون خاک ایجاد نشود. یک خروجی برای سرریز محلول هر ستون جهت ثبات بار تعبیه شد. محل لوله خروجی قابل تنظیم بوده و ارتفاع مجرای خروجی با توجه به شدت جریان مورد نیاز تنظیم شد. اشباع شدن خاک‌ها بدون ایجاد فشار هیدرواستاتیکی در جبههٔ رطوبتی صورت گرفت تا از محبوس شدن هوا جلوگیری شود. اشباع‌کردن 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 کرده و خاک ستون را از پایین اشباع می‌کرد. با توقف صعود موئینگی 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 مرحلهٔ اشباع کردن، اجازه داده شد تا ارتفاعی از محلول در سطح خاک قرار بگیرد.

برآورد شده با مدل Hydrus-1D نشان‌دهنده تطابق زیاد در مدل مورد استفاده است. نتایج مشابهی توسط Jirka Simunek (2014)، (2015) و (2022) و Raof et al. گزارش شده است. با توجه به شکل‌ها، برازش مدل‌ها در خاک دست‌خورده نسبت به خاک دست‌نخورده بهتر است که این امر ممکن است به دلیل بهم‌خوردگی ساختمان خاک و افزایش سطح تماس ذرات خاک در ستون خاک دست‌خورده و وجود ناهمگنی ذرات در ستون خاک دست‌نخورده باشد. در نتایج پژوهش Morsali et al. (2019) و Ersahin et al. (2002) نیز این چنین گزارش شده است. منحنی‌های رسم شده در غلظت‌های اولیه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ بسیار مشابه و غیرقابل تشخیص هستند (شکل‌های ۲ تا ۴). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات غلظت تأثیری در شبیه‌سازی انتقال فلزات سنگین نداشته است. پارامترهای برآورد شده از شبیه‌سازی انتقال فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی در ستون‌های خاک لومی اشباع دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus-1D در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول، ضرایب پراکندگی بیش‌تر در خاک دست‌نخورده نشان‌دهنده وجود رفتار غیرفیکتی در مقایسه با خاک دست‌خورده است که ناشی از ناهمگنی بیش‌تر خاک دست‌نخورده است. نتایج مشابهی توسط (2006) Huang et al.، (2006) Xiong et al.، (2018) Moradi and Mehdinejadani و Morsali et al. (2019) گزارش شده است. ضریب تأخیر (R) از روند  $Zn > Cd > Ni$  پیروی می‌کند که نشان‌دهنده تحرک بیش‌تر کادمیم از دو فلز دیگر است. با بررسی نتایج مربوط به روند تحرک فلزات سنگین در ستون‌های خاک آلی و معدنی به صورت  $Zn < Ni < Cd$  توسط Tyler and McBride (1982)، نتیجه مطالعه حاضر تأیید می‌شود. یافته‌های حاصل از پژوهش Morsali et al. (2019) نیز روند مشابه با نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای برآورد شده با Hydrus-1D

Hydrus-1D		غلظت	ستون خاک	فلز
R	D			
19.4391	0.51697	50	Disturbed	Cd
7.9069	0.34904	100		
4.51582	0.53166	150		
13.6328	0.39962	50	Undisturbed	
7.24281	0.37193	100		
8.2556	0.50669	150		
8.43384	0.27055	50	Disturbed	Ni
7.32511	0.45474	100		
5.74188	0.40226	150		
19.1315	0.11078	50	Undisturbed	
5.91898	0.76251	100		
3.54602	0.46152	150		
9.18545	0.24113	50	Disturbed	Zn
7.97818	0.36825	100		
5.4	0.30044	150		
21.5115	0.34864	50	Undisturbed	
4.61772	0.35909	100		
9.8	0.42922	150		

تأثیر تغییرات پارامترهای موثر بر انتقال این فلزات و تحلیل حساسیت آن‌ها بررسی شد.

#### ۴-۲- تحلیل حساسیت یا حساسیت‌سنجی مدل

تحلیل حساسیت برای شناسایی عوامل تأثیرگذار بر خروجی مدل انجام می‌شود. این روش تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را با داده‌های ورودی بررسی می‌کند. به همین منظور مدل CDE در نرم‌افزار Hydrus-1D با تغییر یکی از پارامترهای ورودی اجرا شده و سایر پارامترهای ورودی در طول هر اجرا ثابت نگه داشته شدند. به عبارت دیگر، منحنی رخنه به‌دست آمده از مدل با پارامترهای واقعی نسبت به منحنی رخنه به‌دست آمده با پارامترهای تغییر یافته مقایسه می‌شود. پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی، ضریب توزیع و پارامتر پراکندگی نسبت به مقدار واقعی آن‌ها (مقدار تخمینی حاصل از مدل به روش معکوس) به اندازه مثبت و منفی پنج و ۱۵ درصد تغییر داده شدند. تحلیل حساسیت بر فلزات کادمیم، نیکل و روی در غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در دو خاک دست‌خورده و دست‌نخورده انجام شد. اندازه‌گیری حساسیت پارامترهای ورودی نیز با رابطه (۶) به‌دست آمد (Liu et al., 2007).

$$S_e = \left(\frac{\Delta O}{O}\right) \times \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^{-1} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $S_e$  ضریب حساسیت،  $\Delta O$  نشان‌دهنده تفاوت در پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر،  $O$  نشان‌دهنده میانگین پارامتر خروجی،  $\Delta I$  نشان‌دهنده تفاوت در پارامتر ورودی قبل و بعد از تغییر،  $I$  نشان‌دهنده متوسط پارامتر ورودی است. محدوده ضریب حساسیت توسط Saadati et al. (2018) طبق جدول ۲ پیشنهاد شده است.

جدول ۲- دامنه تغییرات ضریب حساسیت

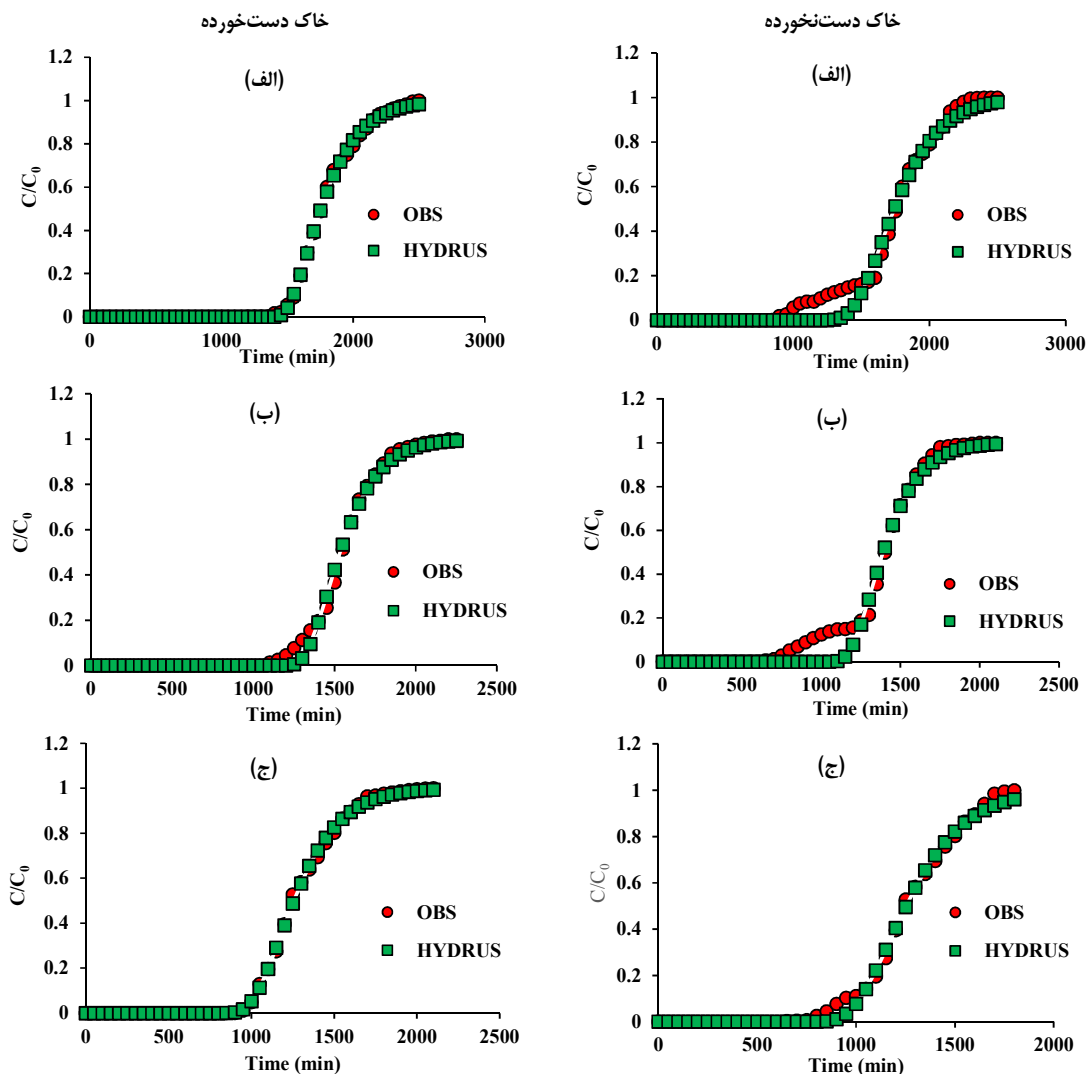
Table 2- Range of sensitivity coefficient changes

Se > 1.5	0.3 < Se < 1.5	0 < Se < 0.3	Se = 0	دامنه تغییرات
حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	بدون حساسیت	شدت حساسیت

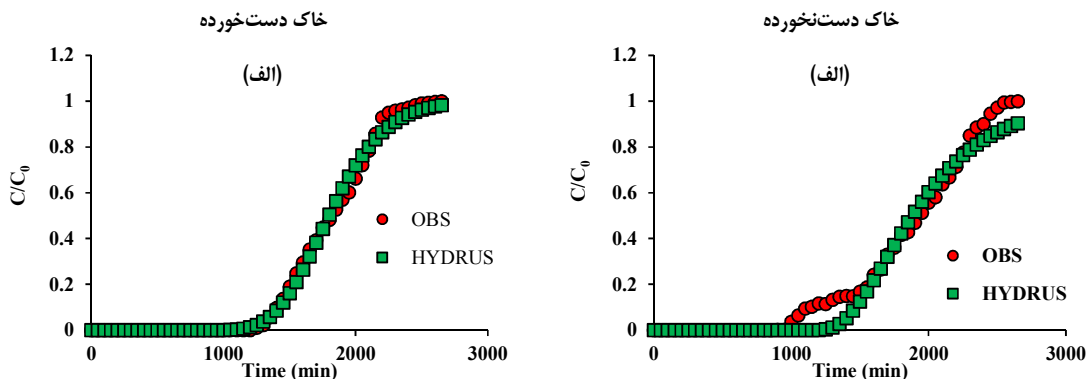
#### ۳- نتایج و بحث

##### ۳-۱- مقایسه منحنی‌های رخنه

منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری و برآورد شده فلزات سنگین کادمیم، نیکل و روی در سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در خاک لومی اشباع دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus-1D در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. منحنی‌های برازش یافته با مدل‌های Hydrus-1D و منحنی‌های حاصل از داده‌های مشاهداتی تقریباً بر هم منطبق است که این انطباق در خاک دست‌خورده بیش‌تر است. مطابق با شکل‌ها، بررسی منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری و

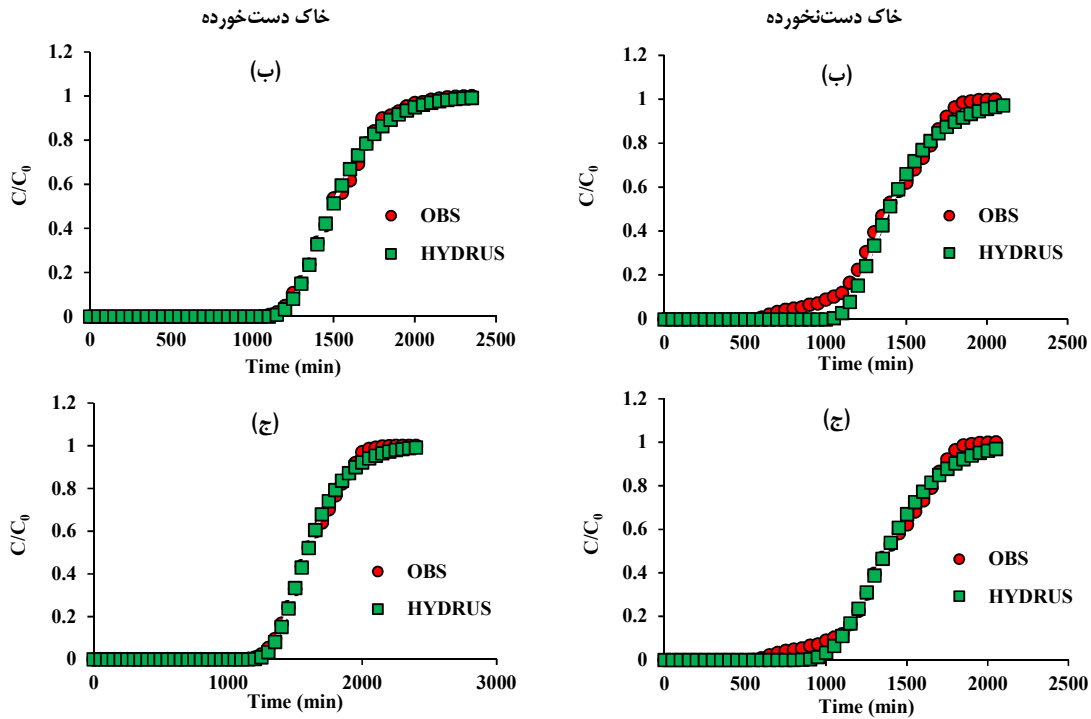


شکل ۲- شبیه‌سازی انتقال فلز کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus\_1D: الف: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>= ۵۰)، ب: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>= ۱۰۰) و ج: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>= ۱۵۰)، OBS: داده‌های اندازه‌گیری شده و HYDRUS: داده‌های برازش شده  
 Figure 2-Simulation of Cd metal transport in disturbed and untouched soil with Hydrus\_1D model; A: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=50), B: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=100), and C: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=150), OBS: measured data, and HYDRUS: fitted data

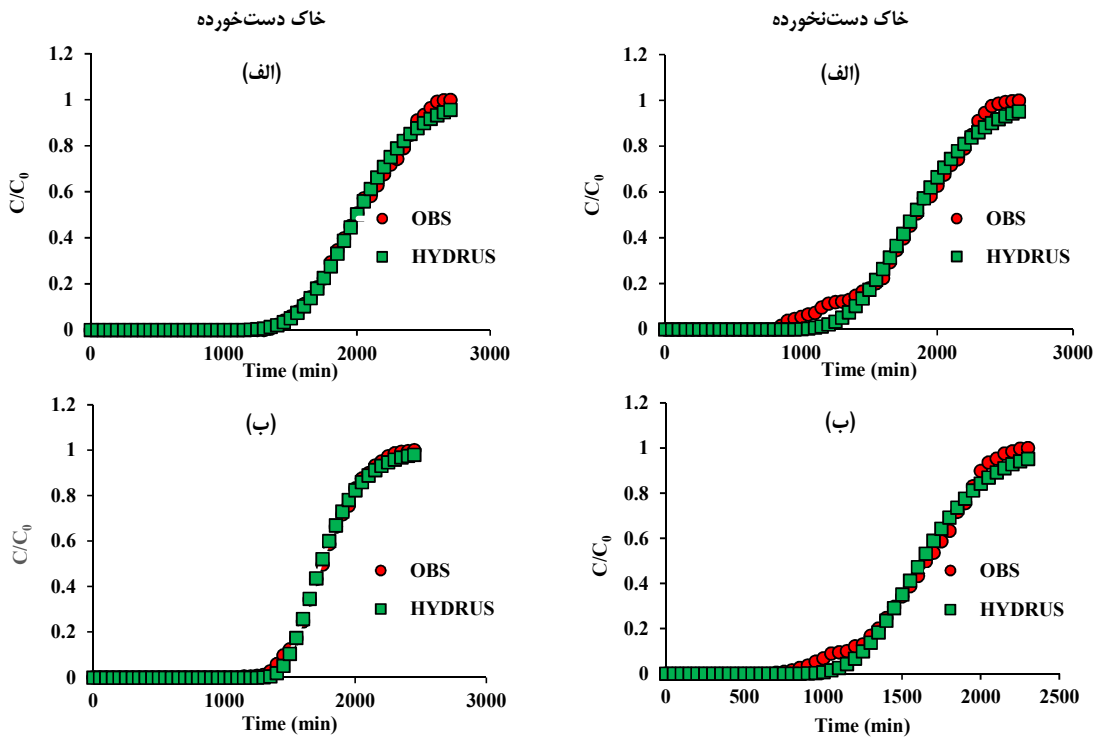


شکل ۳- شبیه‌سازی انتقال فلز نیکل در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus\_1D: الف: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>= ۵۰)، OBS: داده‌های اندازه‌گیری شده و HYDRUS: داده‌های برازش شده  
 Figure 3- Simulation of Ni metal transfer in disturbed and untouched soil with Hydrus\_1D model; A: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=50), OBS: measured data, and HYDRUS: fitted data

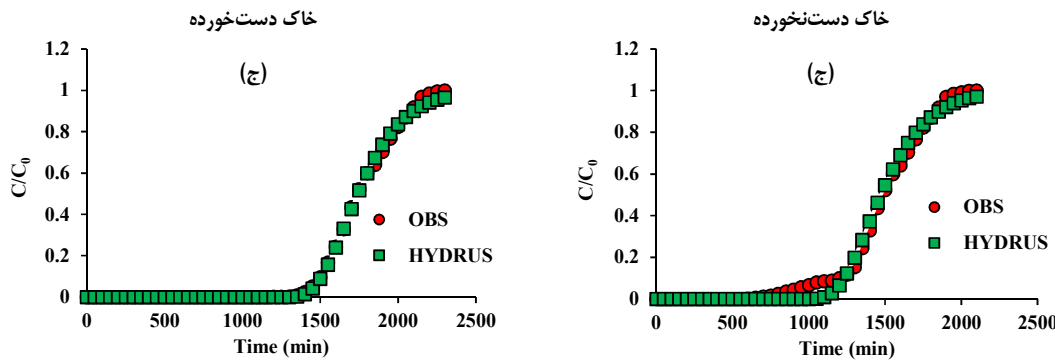




ادامه شکل ۳- شبیه‌سازی انتقال فلز نیکل در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus\_1D؛ ب: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>=۱۰۰) و ج: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>=۱۵۰)؛ داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های برازش شده: HYDRUS؛ داده‌های برازش شده: Continuation of Figure 3- Simulation of Ni metal transfer in disturbed and untouched soil with Hydrus\_1D model; B: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=100), and C: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=150) OBS: measured data, and HYDRUS: fitted data



شکل ۴- شبیه‌سازی انتقال فلز روی در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus\_1D؛ الف: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>=۵۰) و ب: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>=۱۰۰)؛ داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های برازش شده: HYDRUS؛ داده‌های برازش شده: Figure 4- Simulation of Zn metal transport in undisturbed and undisturbed soil with Hydrus\_1D model; A: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=50), and B: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=100), OBS: measured data and HYDRUS: fitted data



ادامه شکل ۴- شبیه‌سازی انتقال فلز روی در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده با مدل Hydrus\_1D؛ ج: میلی‌گرم بر لیتر (C<sub>0</sub>= ۱۵۰)، OBS:

داده‌های اندازه‌گیری شده و HYDRUS: داده‌های برازش شده

Continuation of Figure 4- Simulation of Zn metal transport in undisturbed and undisturbed soil with Hydrus\_1D model; C: mg l<sup>-1</sup> (C<sub>0</sub>=150), OBS: measured data and HYDRUS: fitted data

۳-۲- مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مدل CDE

تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل می‌پردازد. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل به صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. بنابراین، نتایج تحلیل حساسیت به منظور تعیین دقت قابل قبول در اندازه‌گیری داده‌های ورودی، مهم است.

برای تحلیل حساسیت، مدل CDE با مقادیر واقعی پارامترهای ورودی آن یعنی D، K<sub>d</sub> و β و با دامنه تغییرات مثبت و منفی پنج درصد و ±۱۵ درصد نسبت به مقادیر واقعی آن‌ها در غلظت‌های اولیه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر اجرا شد و خروجی مدل یعنی منحنی رخنه به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ورودی با هم مقایسه شد. در جدول ۴ برآورد پارامترهای رابطه با استفاده از مدل Hydrus\_1D ارائه شده است.

جدول ۴- پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D)، ضریب توزیع (K<sub>d</sub>) و پارامتر پراکندگی (β) با استفاده از مدل Hydrus-1D  
Table 4-parameters hydrodynamic dispersion coefficient (d), distribution coefficient (K<sub>d</sub>), and spreading parameter (β) by Hydrus-1D

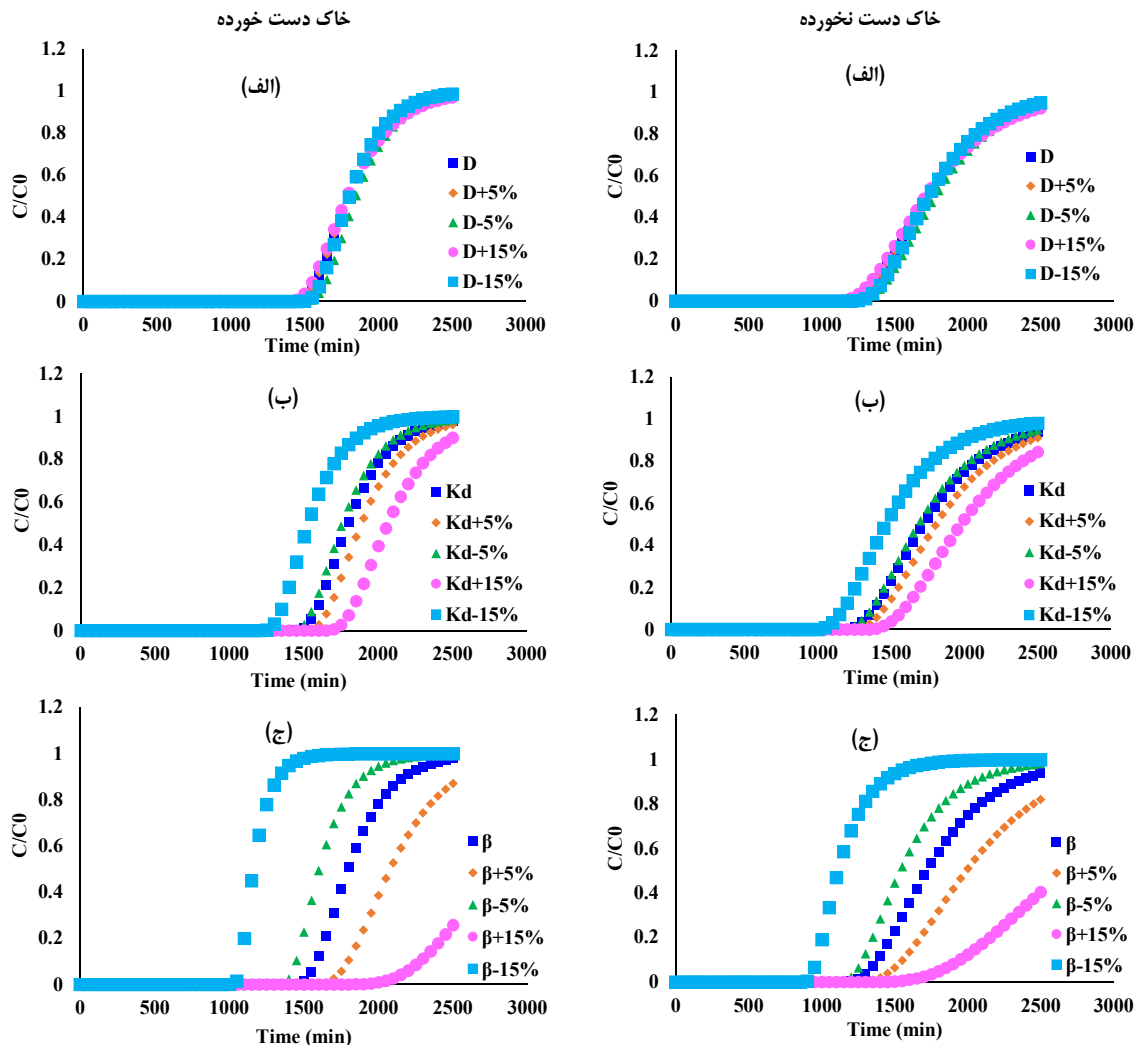
فلز سنگین	نوع خاک	غلظت	D				K <sub>d</sub>				β						
			-15%	+15%	-5%	+5%	-15%	+15%	-5%	+5%	-15%	+15%	-5%	+5%			
Cd	Disturbed	50	0.5	0.53	0.48	0.58	0.43	0.58	0.48	0.53	0.5	0.5	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	0.5	0.53	0.48	0.58	0.43	0.58	0.48	0.53	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	0.5	0.56	0.75	0.56	0.43	0.58	0.75	0.56	150	150	0.8	0.84	0.76	0.92	0.68
	Undisturbed	50	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	50	50	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	150	150	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
Ni	Disturbed	50	0.5	0.56	0.48	0.58	0.43	0.58	0.48	0.56	50	50	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	0.5	0.56	0.48	0.58	0.43	0.58	0.48	0.56	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	0.5	0.56	0.75	0.56	0.43	0.58	0.75	0.56	150	150	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
	Undisturbed	50	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	50	50	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	150	150	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
Zn	Disturbed	50	0.2	0.25	0.23	0.28	0.20	0.28	0.23	0.25	50	50	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	0.2	0.25	0.23	0.28	0.20	0.28	0.23	0.25	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	0.2	0.25	0.23	0.28	0.20	0.28	0.23	0.25	150	150	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
	Undisturbed	50	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	50	50	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		100	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	100	100	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65
		150	1	1.05	0.95	1.15	0.85	1.15	0.95	1.05	150	150	0.76	0.80	0.72	0.87	0.65

با پارامترهای واقعی و تغییر یافته در شکل ۵ نشان داده است در شبیه‌سازی انتقال فلز سنگین کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده، خروجی مدل Hydrus\_1D برای این فلز بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را به پارامتر پراکندگی (β) و ضریب

منحنی‌های رخنه برازش داده شده با مدل Hydrus\_1D با پارامترهای واقعی و پارامترهای تغییر یافته در غلظت اولیه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۷ برای فلز کادمیم ارائه شده است. بررسی منحنی‌های رخنه برازش داده شده

افزایش غلظت و حاکی از آن است که با تغییر غلظت اولیه هم‌چنان پارامتر پراکندگی دارای بیش‌ترین ضریب حساسیت و پارامتر ضریب پخش کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات ورودی داشته است. بنابراین، تغییر غلظت تأثیری بر حساسیت مدل نداشته است. بررسی تأثیر تغییر پارامترهای ورودی در دو خاک دست‌خورده و دست‌نخورده نشان داده است در هر دو نوع خاک روند یکسانی از تأثیر تغییر پارامترها مشاهده شده است، در هر دو نوع خاک پارامتر پراکندگی بیش‌ترین حساسیت و پارامتر ضریب پخش کم‌ترین حساسیت را به تغییر پارامترهای اولیه دارد. بررسی شکل‌های ۸ الی ۱۰ مربوط به نتایج فلز سنگین نیکل و هم‌چنین شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مربوط به فلز سنگین روی نشان داده است که نتایج به‌دست آمده مشابه با نتایج مربوط به فلز کادمیم است.

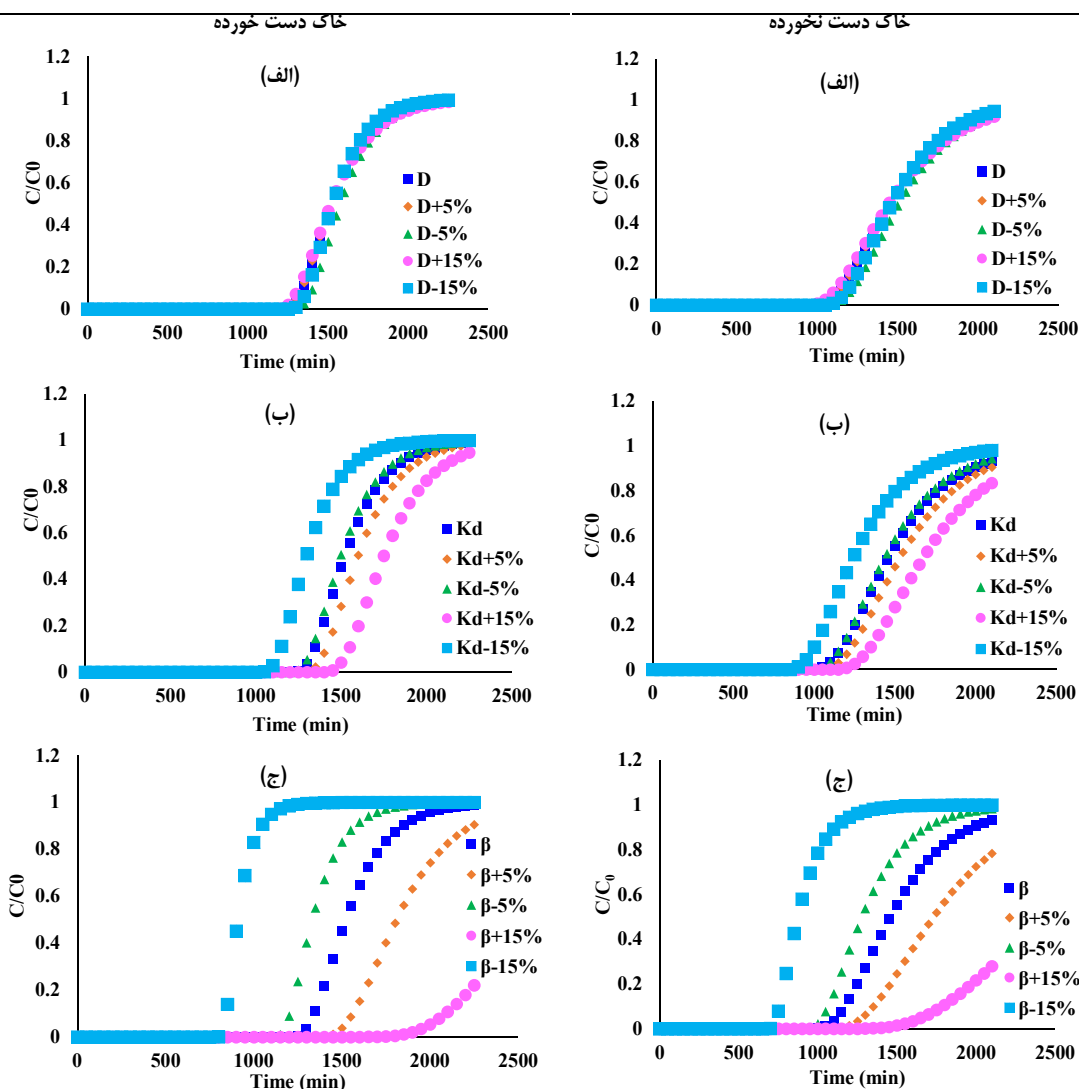
پخش هیدرودینامیکی (D) دارد. به‌طور کلی، تأثیر پارامترهای ورودی به‌صورت زیر است: پارامتر پراکندگی < ضریب توزیع > ضریب پخش. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تغییرات D اثر جزئی و ناچیزی در نتایج مدل دارد، در نتیجه می‌توان خطاهای اندازه‌گیری این پارامتر را نادیده گرفت. از سوی دیگر با توجه به تأثیر قابل‌توجه تغییرات  $\beta$  بر مقادیر خروجی، این پارامتر باید با دقت بیش‌تری اندازه‌گیری شود. حساسیت کم این مدل به پارامتر ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی حاکی از این است که انتقال فلز سنگین کادمیم در ستون‌های کوچک خاک بیش‌تر تحت تأثیر پدیده انتقال توده‌ای است و پخش هیدرودینامیکی دخالت کمی در فرآیند انتقال دارد. نتایج مشابه توسط Mao and Ren (2004) در تحلیل حساسیت پارامترهای CDE گزارش شده است. بررسی شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده تأثیر این تغییرات با



شکل ۵- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف)، ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکندگی (beta) (ج) در انتقال فلز

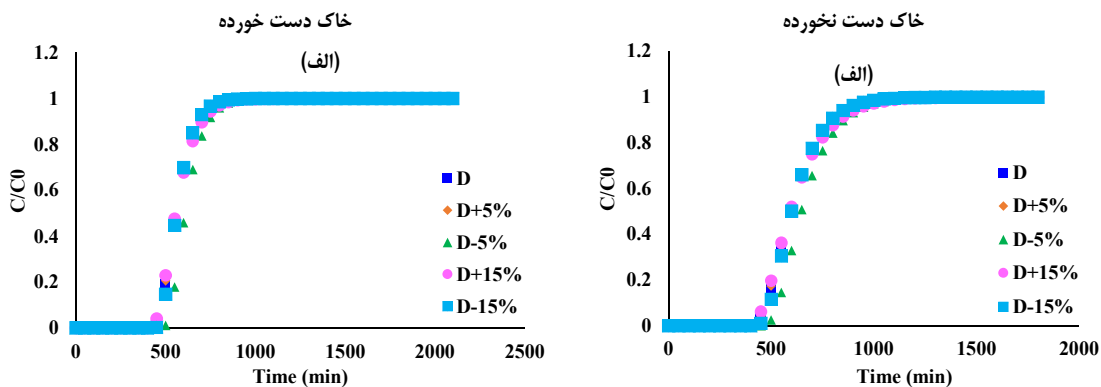
کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر

Figure 5- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter (beta) (c) in the transport of Cd metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 50 mg l<sup>-1</sup>



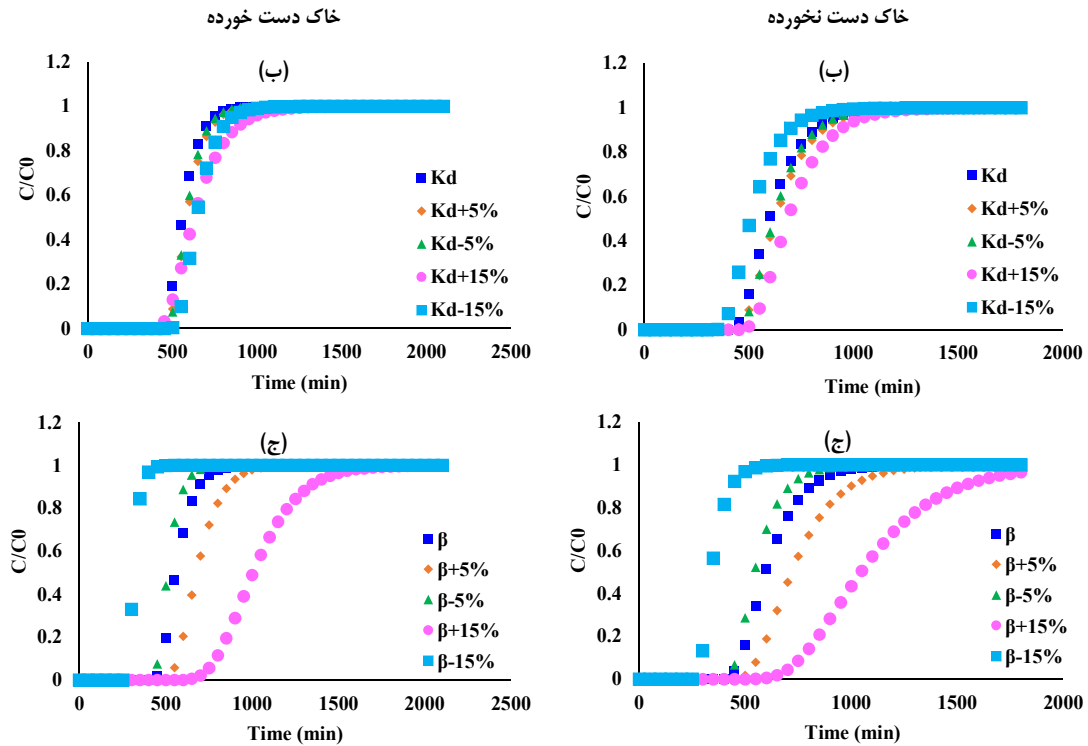
شکل ۶- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف)، ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکنندگی (β) (ج) در انتقال فلز کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

Figure 6- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter (β) (c) in the transport of Cd metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 100 mg l<sup>-1</sup>



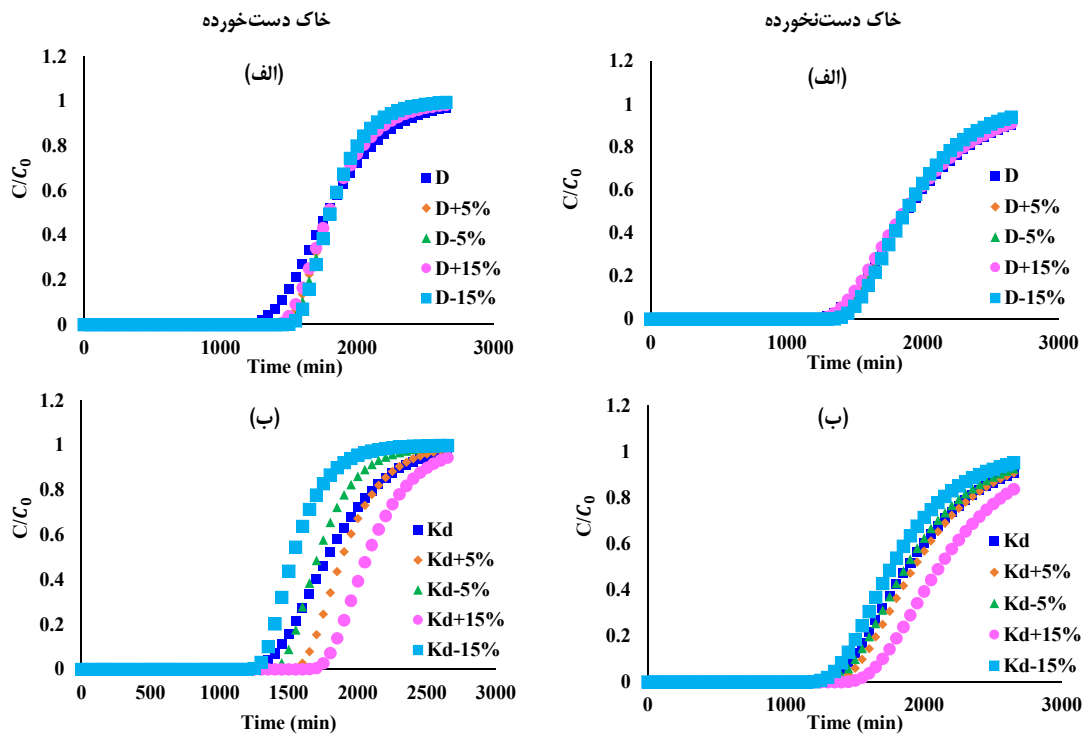
شکل ۷- تغییرات پارامتر ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف) در انتقال فلز کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت اولیه ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر

Figure 7- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a) in the transport of Cd metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 150 mg l<sup>-1</sup>



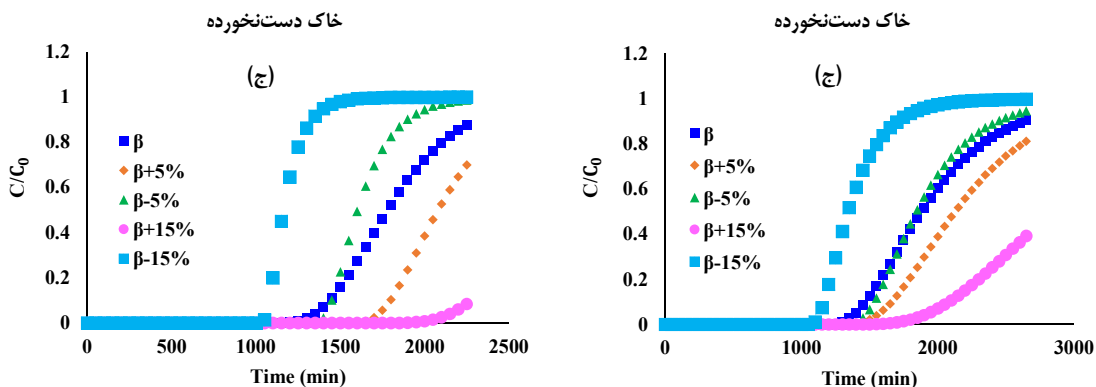
ادامه شکل ۷- تغییرات پارامترهای ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکنندگی (beta) (ج) در انتقال فلز کادمیم در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت اولیه ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر

Continuation of Figure 7- Changes in parameters of distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter (beta) (c) in the transport of Cd metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 150 mg l<sup>-1</sup>

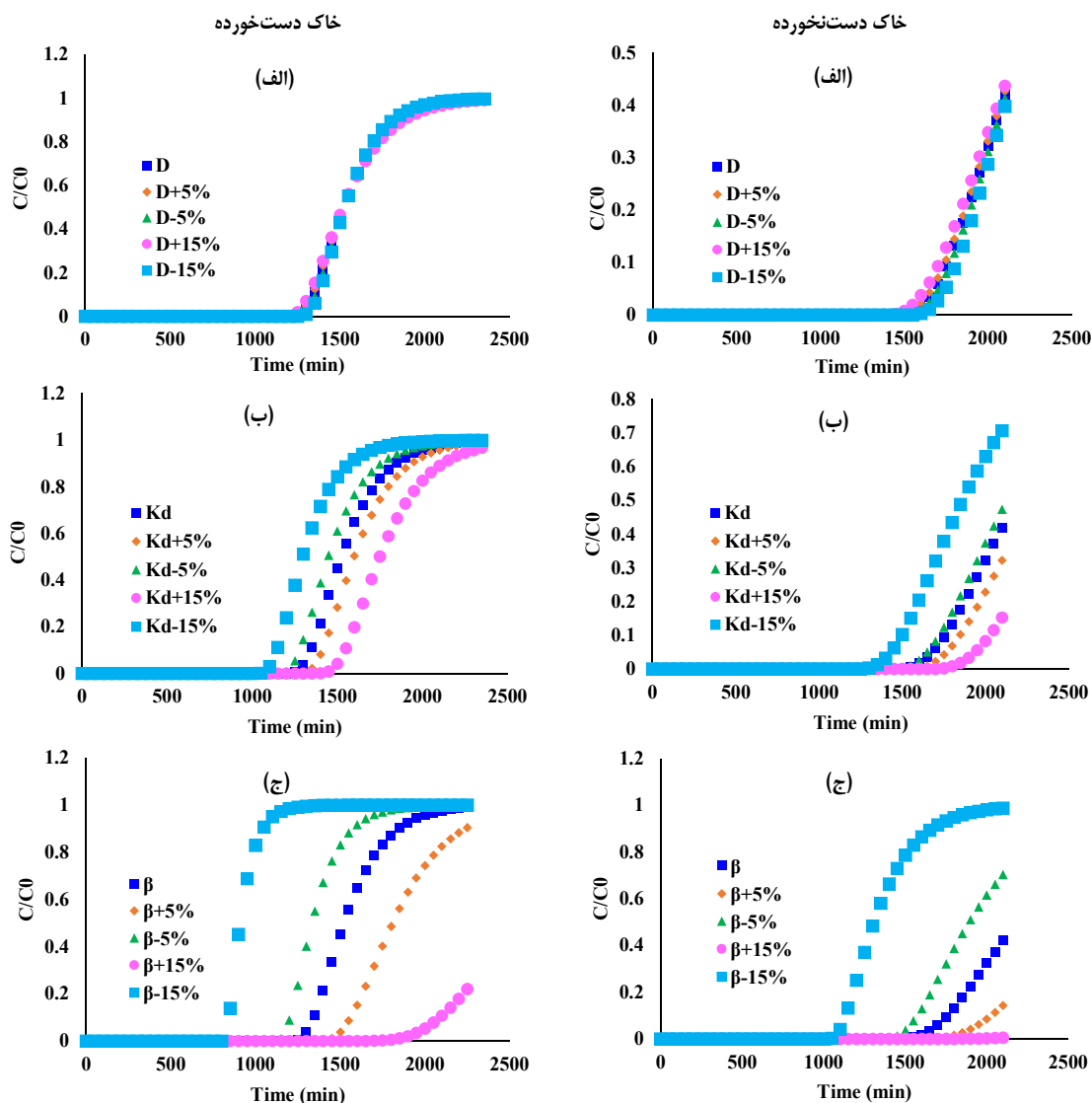


شکل ۸- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف) و ضریب توزیع (kd) (ب) در انتقال فلز نیکل در خاک دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر

Figure 8- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a) and distribution coefficient (kd) (b) in the transport of Ni metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 50 mg l<sup>-1</sup>

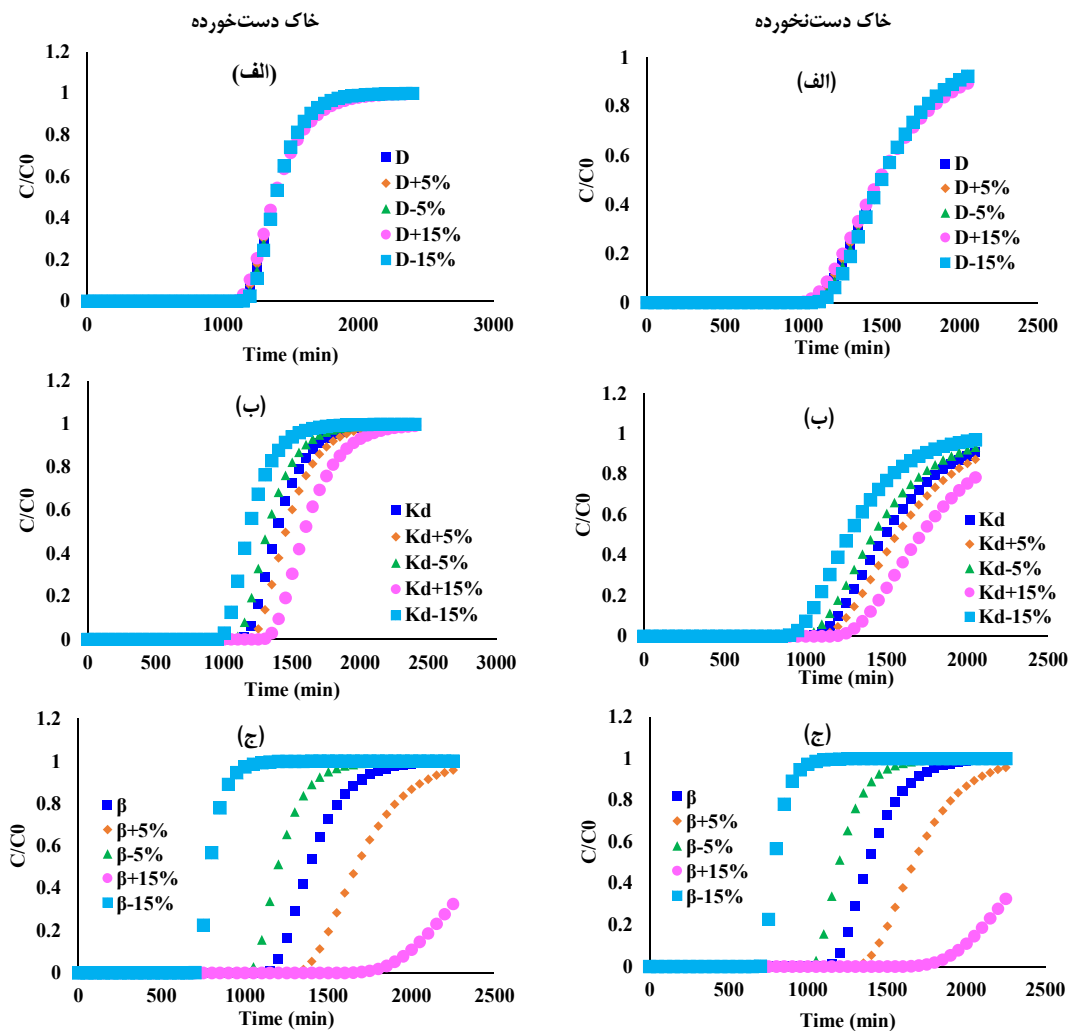


ادامه شکل ۸- تغییرات پارامتر پراکنندگی ( $\beta$ ) (ج) در انتقال فلز نیکل در خاک دست نخورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر  
Continuation of Figure 8- Changes in parameters of spreading parameter ( $\beta$ ) (c) in the transport of Ni metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 50 mg l<sup>-1</sup>



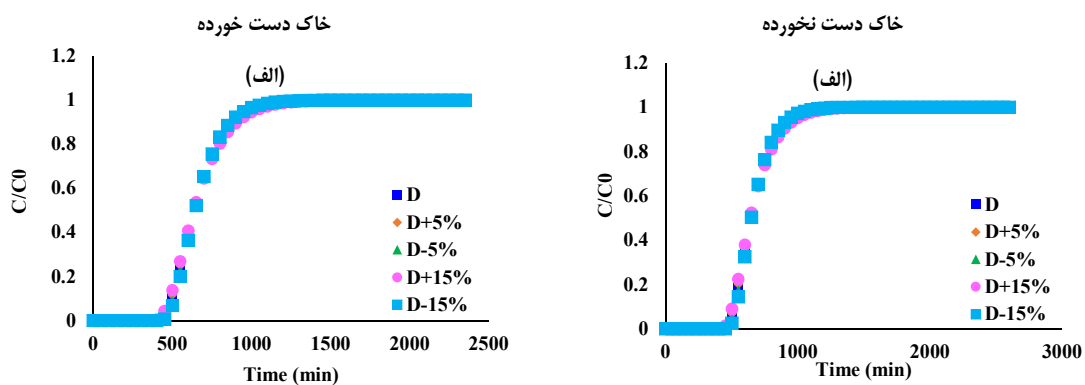
شکل ۹- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف)، ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکنندگی ( $\beta$ ) (ج) در انتقال فلز نیکل در خاک دست نخورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر

Figure 9- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter ( $\beta$ ) (c) in the transport of Ni metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 100 mg l<sup>-1</sup>



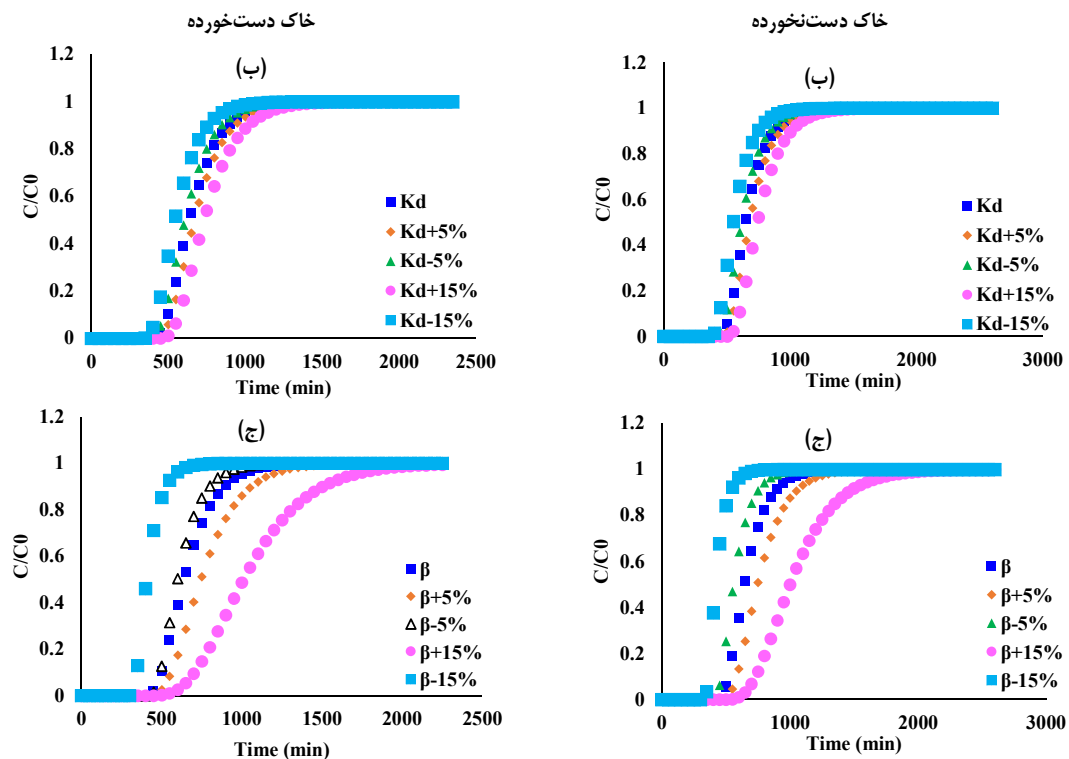
شکل ۱۰- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف)، ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکندگی (β) (ج) در انتقال فلز نیکل در خاک دست خورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر

Figure 10- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter (β) (c) in the transport of Ni metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 150 mg l<sup>-1</sup>



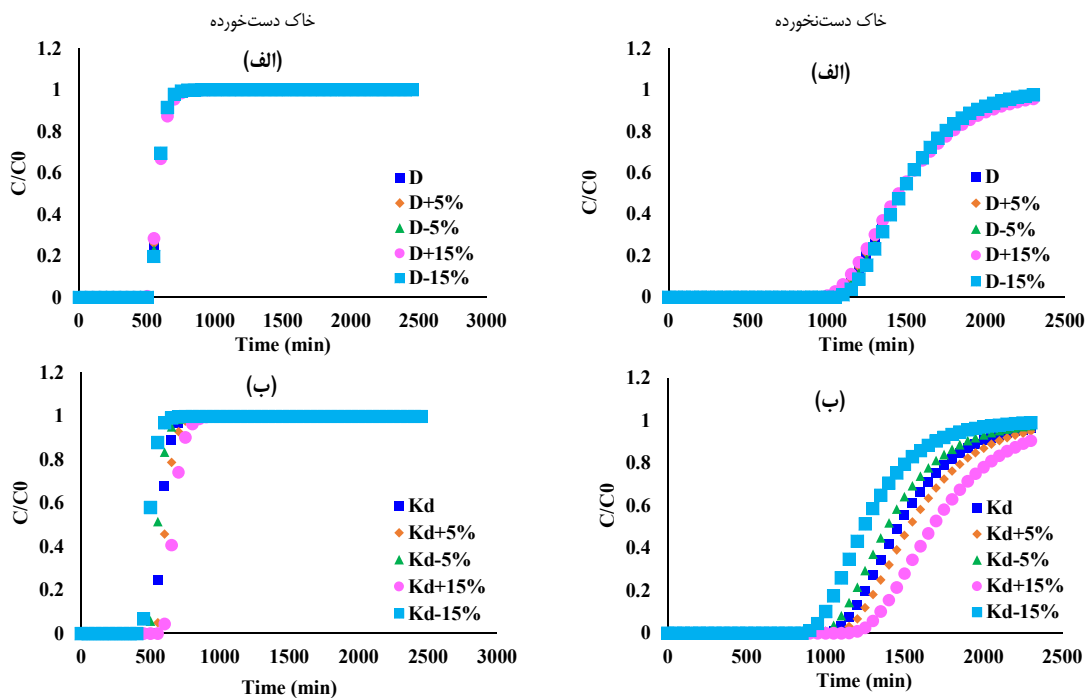
شکل ۱۱- تغییرات پارامتر ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف) در انتقال فلز روی در خاک دست خورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر

Figure 11- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a) in the transport of Zn metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 50 mg l<sup>-1</sup>



ادامه شکل ۱۱- تغییرات پارامترهای ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکندگی (β) (ج) در انتقال فلز روی در خاک دست خورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر

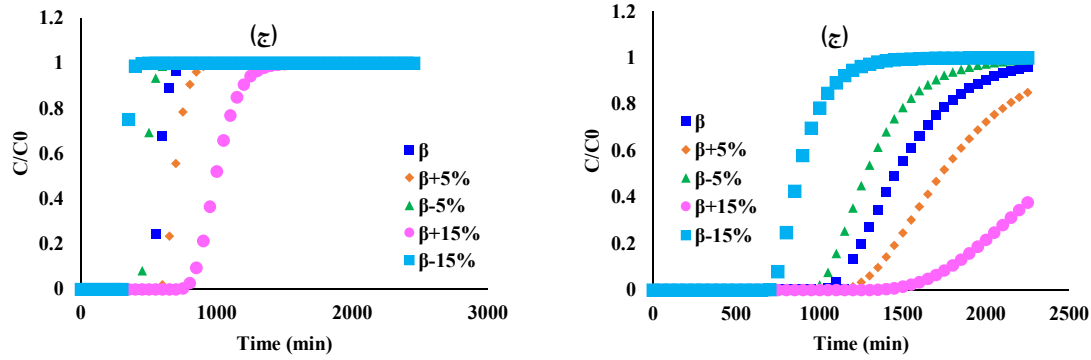
Continuation of Figure 11- Changes in parameters of distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter (β) (c) in the transport of Zn metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 50 mg l<sup>-1</sup>



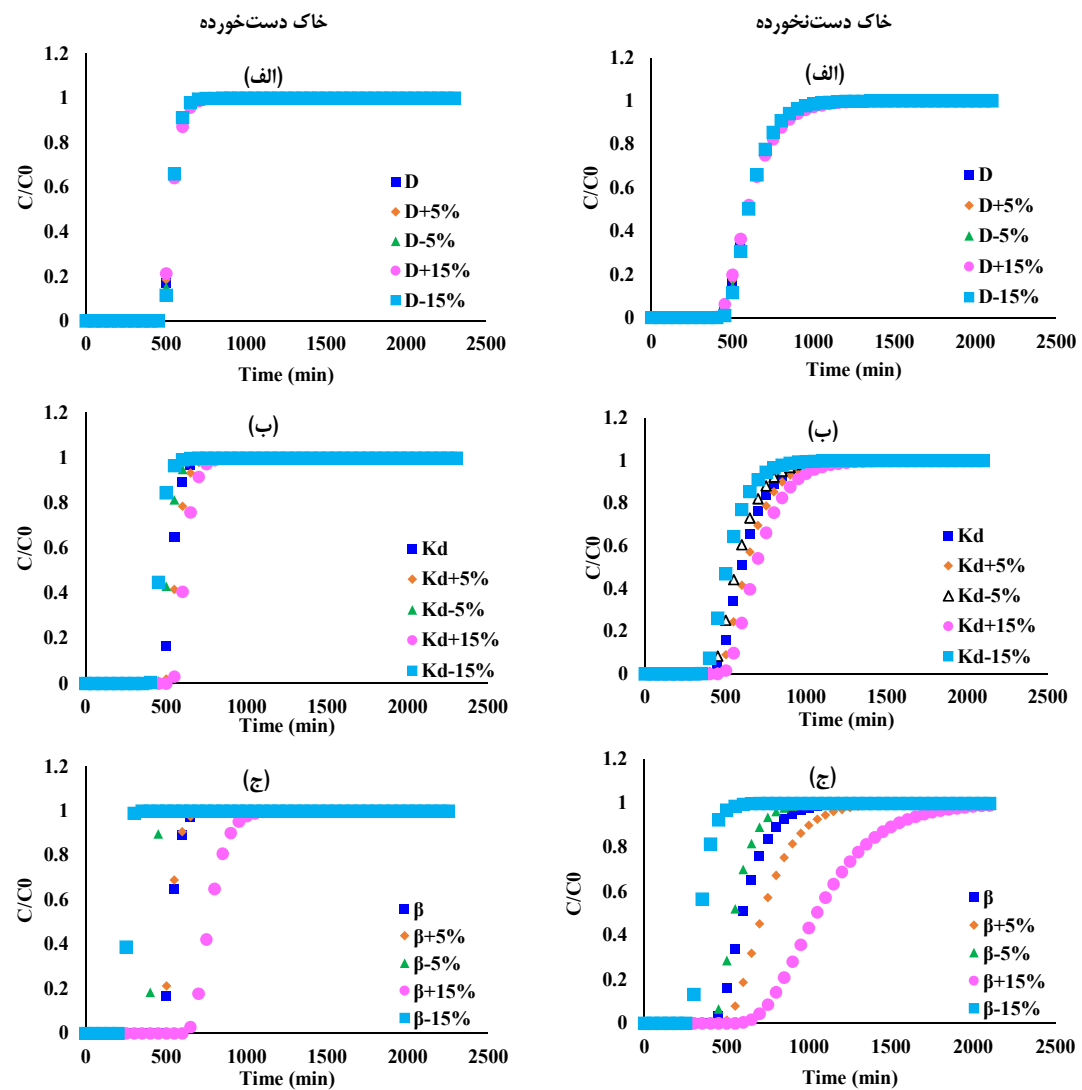
شکل ۱۲- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف) و ضریب توزیع (kd) (ب) در انتقال فلز روی در خاک دست خورده و دست نخورده در غلظت اولیه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر

Figure 12- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), and distribution coefficient (kd) (b) in the transport of Zn metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of 100 mg l<sup>-1</sup>





ادامه شکل ۱۲- تغییرات پارامتر پراکنندگی ( $\beta$ ) (ج) در انتقال فلز روی در خاک دست نخورده و دست نخورده در غلظت اولیه  $100 \text{ mg l}^{-1}$  میلی گرم بر لیتر  
Continuation of Figure 12- Changes in parameters of spreading parameter ( $\beta$ ) (c) in the transport of Zn metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of  $100 \text{ mg l}^{-1}$



شکل ۱۳- تغییرات پارامترهای ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) (الف) ضریب توزیع (kd) (ب) و پارامتر پراکنندگی ( $\beta$ ) (ج) در انتقال فلز روی در خاک دست نخورده و دست نخورده در غلظت اولیه  $150 \text{ mg l}^{-1}$  میلی گرم بر لیتر

Figure 13- Changes in parameters of hydrodynamic dispersion coefficient (D) (a), distribution coefficient (kd) (b), and spreading parameter ( $\beta$ ) (c) in the transport of Zn metal in disturbed and intact soil at an initial concentration of  $150 \text{ mg l}^{-1}$



ادامهٔ جدول ۵- تحلیل حساسیت پارامترهای ضریب پخش (D)، ضریب توزیع ( $K_d$ ) و پارامتر پراکندگی ( $\beta$ ) در شبیه‌سازی مدل Hydrus\_1D فلز کادمیم، نیکل و روی در خاک‌های دست‌خورده و دست‌نخورده در غلظت‌های مختلف (درصد)

Table 5- The sensitivity analysis of parameters hydrodynamic dispersion coefficient (D), distribution coefficient ( $K_d$ ) and spreading parameter ( $\beta$ ) in the simulation of Hydrus\_1D model of Cd, Ni, and Zn in disturbed and undisturbed soils in different concentrations (%)

$S_c (-15)$		$S_c (+15)$		$S_c (-5)$		$S_c (+5)$		parameter	Heavy metal
Undisturbed	Disturbed	Undisturbed	Disturbed	Undisturbed	Disturbed	Undisturbed	Disturbed		
0.080829	-0.00012	0.094028	0.000595	0.086064	0.000285	0.08982	0.00047	D	Ni (150)
حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	$K_d$	
-1.75523	-1.07392	-3.84626	-1.90291	-2.22007	-1.28052	-2.8787	-1.5450	$\beta$	
حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	D	Zn (50)
-3.37	-2.34446	-90.57	-45.2475	-6.15	-3.8253	-16.45	-8.4419	$K_d$	
-0.000027	-0.000036	-0.0000846	0.000018	-0.0000424	0.00006	-0.000037	0.00004	$\beta$	
حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	D	Zn (100)
-1.30362	-0.27489	-1.3915	-0.3635	-1.33081	-0.3089	-1.35979	-0.3352	$K_d$	
-1.68072	-0.66383	-1.72771	-1.71182	-1.88839	-0.86872	-1.20262	-1.1825	$\beta$	
حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	D	Zn (150)
0.025403	-0.00087	0.033383	-0.00092	0.02837	-0.00087	0.030423	-0.0010	$K_d$	
-1.32836	-0.26767	-2.49901	-0.34394	-1.61462	-0.28873	-1.9932	-0.3198	$\beta$	
حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	D	Zn (150)
-2.6816	-0.71625	-30.3513	-2.07995	-4.4995	-0.9444	-9.31771	-1.3497	$K_d$	
-0.00001	0.001227	-0.00012	-0.00041	-0.000079	0.001294	-0.00022	-0.0003	$\beta$	
حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	حساسیت کم	D	Zn (150)
-1.36038	-0.26273	-1.47432	-0.33553	-1.39512	-0.28281	-1.43321	-0.3127	$K_d$	
-1.94192	-0.85069	-3.33683	-1.10662	-1.30642	-1.69763	-1.9504	0.61533	$\beta$	
حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	حساسیت زیاد	D	

#### ۴- نتیجه‌گیری

برآورد پارامترهای انتقال املاح هم به روش آزمایشگاهی و هم به روش مدل‌سازی معکوس انجام می‌شود، لذا نتایج پژوهش نشان داد بر اساس میزان حساسیت، در برآورد عملی و آزمایشگاهی این پارامترها باید با دقت تخمین زده شوند. حساسیت پایین مدل Hydrus\_1D به پارامتر D نشان می‌دهد که انتقال فلزات سنگین در ستون‌های کوچک خاک اغلب باید به‌عنوان همرفت در نظر گرفته شود تا پراکندگی هیدرودینامیکی. تعیین تحلیل حساسیت و مشخص نمودن پارامتر حساس باعث می‌شود در انتخاب مقادیر برای پارامترهای خاص که نقش مهمی در نتایج دارد، دقت بیش‌تری به‌عمل آید.

#### سپاس‌گزاری

از حمایت معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز تشکر می‌شود.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

تحلیل حساسیت برای شناسایی عوامل تأثیرگذار بر خروجی مدل انجام می‌شود. این روش، تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده‌های ورودی مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل به‌صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. انطباق زیاد منحنی‌های رخنهٔ برازش داده شده با مدل Hydrus-1D و اندازه‌گیری شده، قابلیت مدل Hydrus-1D را در برازش منحنی رخنه نشان می‌دهد. برازش مدل در خاک دست‌خورده نسبت به خاک دست‌نخورده به‌دلیل بهم‌خوردگی ساختمان خاک و افزایش سطح تماس ذرات، بهتر است. نتایج تحلیل حساسیت در این مدل نشان داد تأثیر تغییر پارامترهای ورودی در فلزات سنگین مورد پژوهش از روند زیر پیروی می‌کند: پارامتر پراکندگی < ضریب توزیع < ضریب پخش. شدت تحلیل حساسیت به پارامتر پراکندگی ( $\beta$ ) دارای بیش‌ترین مقدار و به پارامتر ضریب پخش هیدرودینامیکی (D) دارای کم‌ترین مقدار بوده که نشان‌دهندهٔ حساسیت زیاد مدل به تغییر پارامتر پراکندگی است، در نتیجه، کوچک‌ترین تغییر در  $\beta$  تأثیر قابل‌توجهی بر غلظت نسبی خواهد داشت. با توجه به این که

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## مشارکت نویسندگان

سیده کوثر دانشیار: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ محمدرضا دلایان: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ شهرام شاه‌محمدی کلالق: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل

نتایج؛ الناز صباغ‌تازه: مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ سیامک ساعدی: مشاوره، بازبینی متن مقاله.

## منابع

رئوف، مجید، اکبری باصری، زینب، رسول‌زاده، علی، و عزیزی مبصر، جوانشیر (۱۴۰۱). تحلیل حساسیت نرم‌افزار Hydrus نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه گیاه مرجع چمن. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۹۴-۱۰۷. doi: 10.22098/MMWS.2022.10847.1090

## References

- Bear, J. (1972). *Dynamic of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing, New York. doi:10.1016/S0166-2481(08)70538-5.
- Burgers, S.L.G.E., Hofstede, G.J., Jonker, C.M., & Verwaart, T. (2010). Sensitivity analysis of an agent-based model of culture's consequences for trade. In: Li Calzi, M., Milone, L., Pellizzari, P. (Eds.), *Progress in Artificial Economics*, 645, Springer, Berlin, Heidelberg, 253-264. doi: 10.1007/978-3-642-13947-5\_21
- Ersahin, S., Papendick, R.I., Smith, J.L., Keller, C.K., & Manoranjan, V.S. (2002). Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences. *Geoderma*, 108, 207-223. doi:10.1016/S1002-0160(17)60334-5
- Feddes, R.A., Kowalik, P., & Zarandy, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. Pudoc. Wageningen, Pp. 189.
- Gove, L., Cook, C.M., Nicholson, F.A., & Beck, A.J. (2001). Movement of water and heavy metals (Zn, Cu, Pb and Ni) through sand and sandy loam amended with biosolids under steady-state hydrological conditions. *Bioresource Technology*, 78, 171-179. doi:10.1016/S0960-8524(01)00004-9
- Huang, G., Huang, Q., Zhan, H., Chen, J., Xiong, Y., & Feng, S. (2005). Modeling contaminant transport in homogeneous porous media with fractional advection dispersion equation. *Science China Earth Sciences.*, 48, 295-302. doi:10.1360/05yd0001
- Huang, G., Huang Q., & Zhan H. (2006) Evidence of one-dimensional scale-dependent fractional advection dispersion. *Journal of Contaminant Hydrology*, 85(1-2), 53-71. doi:10.1016/j.jconhyd.2005.12.007
- Jacques, D., Simunek, J., Timmerman, A., & Feyen, J. (2002). Calibration of Richards' and convection-dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 259, 15-31. doi:10.1016/S00221694(01)00591-1
- Jiang, Y., Yin, X., Guan, D., Jing, T., Sun, H., Wang, N., & Bai, J. (2019). Co-transport of Pb(II) and oxygen-content-controllable graphene oxide from electron-beam-irradiated graphite in saturated porous media. *Journal of Hazardous Materials*, 375, 297-304. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.05.001
- Jirka Simunek, J. (2014). Comparison of CXTFIT and HYDRUS-1D projects. University of California Riverside.
- Jury, W.A. (1982). Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resources Research*, 18, 363-368. doi:10.1029/wr018i002p00363
- Kanzari, S., Hachicha, M., & Bouhlila, R. (2015). Laboratory method for estimating solute transport parameters of unsaturated soils. *American Journal of Geophysics, Geochemistry and Geosystems.*, 4, 149-154. http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
- Lamboni, M., Monod, H., & Makowski, D. (2011). Multivariate sensitivity analysis to measure global contribution of input factors in dynamic models. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(4), 450-459. doi:10.1016/j.res.2010.12.002
- Li, N., & Ren, L. (2009). Application of continuous time random walk theory to non-equilibrium transport in soil. *Journal of contaminant Hydrology*, 108(3), 134-151. doi:10.1016/j.jconhyd.2009.07.002
- Lin, Q., & Xu, Sh. (2020). Co-transport of heavy metals in layered saturated soil: Characteristics and simulation. *Environmental Pollution*, 261, 114072. doi:10.1016/j.envpol.2020.114072
- Liu, H.F., Genard, M., Guichard, S., & 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. doi:10.1093/jxb/erm202
- Liu, X., Guo, H., Zhang, X., Zhang, Sh., Cao, X., Ou, Z., Zhang, W., & Chen, Zh. (2022). Modeling the transport behavior of Pb(II), Ni(II) and Cd(II) in the complex heavy metal pollution site under the influence of coexisting ions. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 211-218. doi:10.1016/j.psep.2022.04.016
- Lurette, A., Touzeau, S., Lamboni, M., & Monod, H. (2009). Sensitivity analysis to identify key

- parameters influencing Salmonella infection dynamics in a pig batch. *Journal of Theoretical Biology*, 258(1), 43-52. doi:10.1016/j.jtbi.2009.01.026
- Mao, M., & Ren, L. (2004). Simulating non-equilibrium transport of atrazine through saturated soil. *Groundwater*, 42, 500-508. doi:10.1111/j.1745-6584.2004.tb02618.x
- Michel, K., & Ludwig, B. (2005). Modelling of seepage water composition from experiments with an acid soil and a calcareous sediment. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 33, 595-604. doi:10.1002/ahch.200400603
- Moradi, G., & Mehdinejadani, B. (2018). Modelling Solute transport in homogeneous and heterogeneous porous media using spatial fractional advection-dispersion equation. *Soil and Water Research*, 13(1), 18-28. doi: 10.17221/245/2016-SWR.
- Morsali, S., Babazadeh, H., Shahmohammadi-kalalagh, Sh., & Sedghi, H. (2019). Simulating Zn, Cd and Ni Transport in Disturbed and Undisturbed Soil Columns: Comparison of Alternative Models. *International Journal of Environmental Research*, 13, 721-734. doi:10.1007/s41742-019-00212-w
- Nguyen Ngoc, M., Dultz, S., & Kasbohm, J. (2009). Simulation of retention and transport of copper, lead and zinc in a paddy soil of the Red River Delta, Vietnam. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 8-16. doi:10.1016/j.agee.2008.06.008
- Pang, L., & Close, M. (1999). Non-equilibrium transport of Cd in alluvial gravels. *Journal of Contaminant Hydrology*, 36, 185-206. doi:10.1016/S0169-7722(98)00110-7
- Pietrzak, D. (2021). Modeling migration of organic pollutants in groundwater- review of available software. *Environmental Modelling & Software*, 144. doi:10.1016/j.envsoft.2021.105145
- Raouf, M., Akbari Baseri, Z., Rasoulzadeh, A., & Azizi Mobaser, J. (2022). Sensitivity analysis of Hydrus software to input data in simulating water movement and root uptake of grass as reference plant. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 94-107. doi: 10.22098/MMWS.2022.10847.1090. [In Persian]
- Rouger, B., Goldringer, I., Barbillon, P., Miramon, A., Nanio Jika, A.K., & Thomas, M. (2023). Sensitivity analysis of a crop metapopulation model. *Ecological Modelling*, 475, 110174. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110174.
- Saadati, Z., Delbari, M., Panahi, M., & Amiri, E. (2018). Simulation of sugar beet growth under water stress using AquaCrop model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(3), 1-18. doi: 10.1001.1.22517480.1397.7.3.1.9
- Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., Li, S., & Wu, Q. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, 114, 29-39. doi:10.1016/j.envsoft.2019.01.012
- Simunek, J., Sejna, M., & Van Genuchten, M.Th. (1998). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0, IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.
- Shahmohammadi, Sh., & Beyrami, H. (2015). Modeling bromide transport in undisturbed soil columns with the continuous time random walk. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 1511-1518. doi:10.1615/JPorMedia.v18.i12.20
- Soares, L.M.V., & Calijuri, M.C. (2021). Sensitivity and identifiability analyses of parameters for water quality modeling of subtropical reservoirs. *Ecological Modelling*, 458, 109720. doi:10.1016/j.ecolmodel.2021.109720.
- Tyler, L.D., McBride M.B. (1982). Mobility and Extractability of Cadmium, Copper, Nickel and Zinc in Organic and Mineral Soil Columns. *Soil Science*, 134(3), 198-205. Doi: 10.1097/00010694-198209000-00009
- Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Wang, H., Liu, J., Yao, J., He, Q., Ma, J., Chai, H., Liu, C., Hu, X., Chen, Y., Zou, Y., Xiong, J., & Huangfu, X. (2020). Transport of Tl(I) in water-saturated porous media: Role of carbonate, phosphate and macromolecular organic matter. *Water Research*, 186, 116325. doi:10.1016/j.watres.2020.116325
- Xiong, Y., Huang, G., & Huang, Q. (2006). Modeling solute transport in one-dimensional homogeneous and heterogeneous soil columns with continuous time random walk. *Journal of Contaminant Hydrology*, 86(3-4), 163-175. doi:10.1016/J.JCONHYD.2006.03.001
- Yang, B., Qiu, H., Zhang, P., He, E., Xia, B., Liu, Y., Zhao, L., Xu, X., & Cao, X. (2022). Modeling and visualizing the transport and retention of cationic and oxyanionic metals (Cd and Cr) in saturated soil under various hydrochemical and hydrodynamic conditions. *Science of the Total Environment*, 815, 151467. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151467
- Yang, J., Ge, M., Jin, Q., Chen, Z., & Guo, Z. (2019). Co-transport of U(VI), humic acid and colloidal gibbsite in water-saturated porous media. *Chemosphere*, 231, 405-414. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.091
- Yuan, Y., & Peng, X. (2017). Fullerol-facilitated transport of copper ions in water-saturated

- porous media: influencing factors and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 340, 96–103. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.07.001
- Zhang, H., Lu, T., Shang, Z., Li, Y., He, J., Liu, S., Li, D., Zhou, Y., & Qi, Z. (2020). Transport of Cd(2+) through saturated porous media: insight into the effects of low-molecular-weight organic acids. *Water Research*, 168, 115182. doi:10.1016/j.watre.2019.115182
- Zhi-Ming, Q., Shao-Yuan, F., & Helmers, M.J. (2012). modeling cadmium transport in neutral and alkaline soil columns at various depths. *Pedosphere*, 22(3), 273-282. doi:10.1016/S1002-0160(12)60014-9