

Research Paper

Study of the Effect of Transport Distance on Dispersion Coefficient of Sodium Chloride in Horizontal Stratified Sandy Soils and its Simulation with HYDRUS- 2D

Hamed Mahdipanah ¹, Askari Tashakori ^{2*}, Samad Emamgholizadeh ³ Eisa Maroufpoor⁴

¹ Ph.D. student, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

² *Assistant Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

³ Associate Professor, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology.

⁴ Associate Professor, Dept. of Water Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.



10.22125/IWE.2022.162659

Received:
June.14.2021
Accepted:
july.17.2021
Available online:
December 11, 2022

Keywords:
Dispersion, Fried-Camernous model, HYDRUS-2D, Porous media, Transport distance.

Abstract

Dispersion is one of the most important measurable properties of porous media. This important parameter is used in the Advection–Dispersion transport equation related to pollutant transfer in the study of groundwater resources. In the past studies, the dispersion coefficient was considered a constant coefficient for the whole porous media, but many studies over the last few decades have shown that it depends on many parameters, including the transmission distance. Since most of these studies have been performed in homogeneous porous media, in this study, experimental study was carried out to investigate the effect of transfer distances of 20, 50 and 80 cm on the dispersion coefficient in layered soils which containing coarse, medium and fine sand. The results of this study showed that at all transfer distance, the volume of porous water before reaching to the relative concentration of 0.5, reached to one and the rate of pollutant transfer decreased with increasing transfer distance. This result consistence with finding of other studies. Numerical modeling by HYDRUS- 2D model also showed that this model was able to calculate the value of diffusion coefficient for transmission distances of 20, 50 and 80 cm with RMSE error equal to 0.061, 0.063 and 0.057, respectively, which indicates its high accuracy in simulating and movement of pollutants in the porous media.

1. Introduction

With the uncontrolled increase of population in recent years and as a result of over-exploitation of groundwater aquifers and limited surface water resources, irreparable damage has been done to the country's water resources. In addition, various pollutants have entered the groundwater aquifers in

* **Corresponding Author:** Askari Tashakori

Address: Dept. of Water Science and Engineering,
Qaemshahr Branch, Islamic Azad University,
Qaemshahr, Iran.

Email: tash2447@gmail.com
Tel: +989113511826

agricultural and industrial activities. In order to prevent the continuation of quantitative and qualitative decline of available water resources, management and protection of groundwater should be considered as a principle in water resources management planning. Dispersivity is one of the measurable parameters in the porous medium used in the Advection–dispersion transport equation. One of the most important parameters affecting the values of dispersion coefficient is the transmission distance. In addition, homogeneous or heterogeneous soils can affect the dispersion coefficient. The two-dimensional Hydrus model is one of the most powerful simulation models that is able to simulate the movement of water, salts, heat, root water uptake, as well as root growth under saturated and unsaturated conditions in the soil. In this model, the Richards equation is numerically solved to study the movement of water in the soil, as well as the transfer-diffusion equations to study the movement of solutes and heat in the soil. Literature reviews show that there is no study were done to investigate the dependence of dispersion on the transfer distance in layered sandy soils, so in this study layered heterogenous soil with coarse, medium and fine layers in the horizontal direction was investigated.

2. Materials and Methods

In this research, a laboratory model was constructed as a rectangular tank made of unbreakable glass with a length of 110, a width of 10 and a height of 80 cm. The rectangular tank consisted of three parts: inlet, porous medium and outlet, which were separated by lattice plates in order to make the flow one-dimensional. The distance of the first port of sampling in the horizontal direction from the inlet part was 20 cm and the next two ports were 50 and 80 cm apart, respectively. Sodium Chloride was used as a contaminant with a concentration of 14 dS / m. Also, the flow velocity in the range of similar studies was 17.58×10^{-5} m / s. Sand in three sizes of fine, medium and coarse was used for this study. After the start of the experiment, the concentration of the solution from the samples was measured at intervals of approximately 2 to 20 minutes. Sampling was continued until the concentration of the samples reached the final concentration (14 dS / m) ($C/C_0 = 1$). Breakthrough curves (BTCs) were then plotted for each experiment and dispersion values were calculated by the Fried-Combernous model. Finally, the transport of water in the porous media was simulated using a Hydrus-2D model.

3. Discussion and Conclusion

In this study, laboratory study and numerical modeling were used to study the effect of transfer distance on the dispersion coefficient in layered heterogeneous soils. The experiment was performed in layered sandy soils with three textures of fine, medium and coarse at three travel distances of 20, 50 and 80 cm. The dispersion coefficient obtained from the physical model using the Fried-Combernous model for the travel distances was 3.8, 3.5 and 6.3 cm, respectively. The results of the study of the effect of travel distance in this study were consistent with previous studies such as Al Tabbaa et al. (2000), and Younes et al. (2020). In this study, at all travel distances before reaching a relative concentration of 0.5, the porosity of the water reached to 1 and the contaminant transport velocity decreased with increasing travel distance. Then numerical modeling was performed by Hydrus software and a comparison was made between the results of the physical model and numerical modeling using RMSE error calculation. RMSE error was obtained for travel distances of 20, 50 and 80 cm equal to 0.061, 0.063 and 0.057, respectively. These results showed that the simulation of the contaminant dispersivity in the porous media by Hydrus is accurate.

4. Six important references

- 1) Al Tabbaa A. and Ayotamuno J.M. 2000. One dimensional solute transport in stratified sands at short travel distances. *Journal of Hazardous Materials*. 73: 1-15.
- 2) Emamgholizadeh S., Bahman K., Bateni S. M., Ghorbani H., Maroufpoor I. and Nielson J. R. (2017). Estimation of soil dispersivity using soft computing approaches. *Neural Computing and Applications* 28(1), pp 207-16.
- 3) Fried, J.J. and Comberous, M.A. 1971. Dispersion in porous media. *Hydroscience*, Vol. 7, pp 169-282.
- 4) Moazed, H., Maroufpoor, E., Kashkouli, H.A. and Samani, J.M.V., 2009. Laboratory scale effect of aquifer thickness on dispersivity of porous media. *Journal of Applied Sciences*, 9(3), pp.542-548.
- 5) Simunek, J. Sejna, M. and M.Th. Van Genuchten. 2006. The Hydrus software package for simulating the two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, User Manual Version 1.0, PC-progress, Prague, Czech Republic.
- 6) Younes, A., Fahs, M., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T., 2020. Effect of distance-dependent dispersivity on density-driven flow in porous media. *Journal of Hydrology*, 589, p.125204.



بررسی اثر فاصله انتقال بر ضریب انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک ماسه‌ای مطبق افقی و شبیه‌سازی آن با مدل هایدروس دوبعدی

حامد مهدی پناه^۱، عسکری تشکری^{۲*}، صمد امامقلی‌زاده^۳، عیسی معروف‌پور^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

مقاله پژوهشی

چکیده

انتشارپذیری یکی از مهم‌ترین خاصیت‌های قابل اندازه‌گیری محیط متخلخل است. این پارامتر مهم در معادلات جابجایی-انتشار مربوط به انتقال آلاینده در مطالعه آب زیرزمینی استفاده می‌شود. در گذشته ضریب انتشارپذیری برای کل یک محیط متخلخل بصورت یک ضریب ثابت در نظر گرفته می‌شد، ولی مطالعات زیادی که در طول چند دهه اخیر انجام شد نشان داده است که انتشارپذیری به پارامترهای زیادی از جمله فاصله انتقال بستگی دارد. از آن جایی که اغلب این مطالعات در محیط‌های متخلخل همگن انجام شده است. در این پژوهش به بررسی اثر فاصله انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متری بر ضریب انتشارپذیری در یک محیط متخلخل مطبق با دانه‌بندی درشت، متوسط و ریز بصورت آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد در همه فواصل انتقال، حجم آب تخلخل قبل از رسیدن به غلظت نسبی ۰/۵، به یک رسید و سرعت انتقال آلاینده با افزایش فاصله انتقال کمتر شد که با نتایج سایر مطالعات مطابقت داشت. همچنین مدلسازی عددی به وسیله مدل عددی هایدروس نشان داد که این مدل توانسته است مقدار ضریب انتشارپذیری را برای فاصله‌های انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متری با خطای RMSE به ترتیب برابر با ۰/۰۶۱، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۵۷ محاسبه کند که بیانگر دقت بالای آن در شبیه‌سازی و نحوه حرکت انتقال آلاینده در محیط متخلخل است.

واژه های کلیدی: انتشارپذیری، فاصله انتقال، محیط متخلخل، مدل فرید-کامبرنوس، هایدروس.

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

Email: mrpanah@gmail.com, Tel: +989122734299

^{۲*} استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

Email: tash2447@gmail.com, Tel: +989113511826

^۳ دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir, Tel: +989111194389

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

Email: e.maroufpoor@uok.ac.ir, Tel: +989183809030

مقدمه

با افزایش بی‌رویه جمعیت در سال‌های اخیر و در نتیجه بهره‌برداری بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی و محدودیت منابع آب سطحی، خسارات جبران‌ناپذیری به منابع آب کشور وارد شده است. علاوه بر آن، در فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری نیز آلاینده‌های مختلفی وارد سفره‌های آب زیرزمینی شده‌اند. جهت جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی منابع موجود، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی می‌بایست به عنوان یک اصل در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب کشور، مدنظر قرار گیرد. شناخت منابع آلاینده‌ی آبخوان‌ها و معادلات حاکم بر انتقال آن‌ها اولین قدم در مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی می‌باشد. انتشارپذیری یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری در محیط متخلخل می‌باشد که در معادله جابجایی-انتشار^۱ به کار رفته است. در گذشته این کمیت برای کل محیط متخلخل، ثابت در نظر گرفته می‌شد ولی در طول چند دهه اخیر مطالعات فراوانی نشان داد که تعیین یک مقدار ثابت برای انتشارپذیری همیشه کفایت نمی‌کند و باید اثر پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر انتشارپذیری خاک مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر مقادیر ضریب انتشارپذیری فاصله‌ی انتقال است (یونس و همکاران، ۲۰۲۰، امام‌قلی زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

علاوه بر آن همگن یا غیر همگن بودن خاک می‌تواند بر ضریب انتشارپذیری تاثیرگذار باشد. بطور نسبی مطالعه اندکی در مورد اثر خاک‌های غیرهمگن مطبق یا چند لایه‌ای بر انتقال املاح انجام شده است. شمیر و هارلمن (۱۹۶۷) یکی از اولین محققانی بودند که در مورد انتقال املاح در محیط‌های متخلخل ماسه به صورت لایه‌ای مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر انتشارپذیری در محدوده ۰/۰۷ تا ۰/۴۴ سانتی‌متر بود. سلیم و همکاران (۱۹۷۷)، اظهار داشتند که ترتیب لایه‌ها هیچ اثری بر شکل یا وضعیت توزیع غلظت سیال خروجی از ستون‌ها ندارد.

مدل هایدروس دو بعدی یکی از قدرتمندترین مدل‌های شبیه‌سازی است که قادر است حرکت آب، املاح، حرارت، جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک را شبیه‌سازی کند. این مدل در دانشگاه ریورساید کالیفرنیا در سال ۱۹۹۸ توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه گردید و تاکنون نسخه‌های اصلاحی آن در قالب مدل هایدروس یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در اختیار محققین قرار گرفته است. در این مدل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و همچنین معادلات انتقال-انتشار، برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک صورت می‌گیرد. همچنین این مدل توانایی تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح خاک به روش معکوس را دارد. از این مدل تا به حال توسط محققین زیادی بطور موفقیت آمیز مورد استفاده قرار گرفته که برای مثال می‌توان به مطالعه شیرانی و همکاران (۱۳۹۰) برای پیش‌بینی میزان غلظت آلاینده‌ی زه‌آب اشاره نمود. همچنین فراستی و سیدیان (۱۳۹۲) از مدل هایدروس برای بررسی انتشارپذیری کلریدسدیم استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله‌ی انتقال، مقدار انتشارپذیری خاک افزایش می‌یابد. بررسی منابع نشان می‌دهد مطالعه‌ای در زمینه بررسی وابستگی انتشارپذیری به فاصله‌ی انتقال در خاک‌های ماسه‌ای مطبق انجام نگرفته یا گزارش نشده است، لذا در این پژوهش خاک ماسه‌ای مطبق با لایه‌های درشت، متوسط و ریز در حالت افقی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان این وابستگی را به صورت رابطه‌ای تجربی ارائه نمود و از آن در معادله کلی جابجایی-انتشار با به کارگیری مدل فرید-کامبرنوس استفاده کرد. در رابطه به علت استفاده از مدل مطبق در این پژوهش لازم به ذکر است که پیش‌بینی مکانیسم‌های انتقال آلاینده در خاک با استفاده از مدل‌های همگن معمولاً دقیق نیست. زیرا خصوصیات خاک در مقیاس مزرعه در نقاط و اعماق مختلف، متفاوت است. معمولاً در مزارع کشاورزی و مناطقی که رسوب‌گذاری رخ می‌دهد خاک‌های لایه‌ای یافت می‌شوند و از آنجایی که روند انتقال

¹ Advection-dispersion transport equation

تانک، منابع آب و آلاینده به طور مستقل به یک تنظیم کننده با ارتفاع ثابت هیدرولیکی متصل شد و جریان پس از عبور از تنظیم کننده، وارد قسمت ورودی مدل می شد. علاوه بر این جریان مازاد بر شدت جریان ثابت آزمایش، از داخل تنظیم کننده، سر ریز می شد. به منظور تهیه نمونه های نقطه ای در فاصله ی ۱۰ سانتی متری از کف مخزن در راستای افقی، شیرهای نمونه گیری تعبیه شدند. فاصله ی اولین شیر در راستای افق از قسمت ورودی ۲۰ سانتی متر و دو شیر بعدی به ترتیب دارای فواصل ۵۰ و ۸۰ سانتی متری بودند. همچنین لوله های پلی اتیلن دارای منفذ و محافظت شده با توری استیل با مش ۱۰۰ به عنوان نمونه گیر در عرض آبخوان شیب ساز شده، جاسازی شدند. در بیش تر آزمایشات مشابه از سدیم کلرید یا برومید به عنوان آلاینده ی خنثی استفاده شده بود. در این پژوهش نیز سدیم کلرید به دلیل بی خطر و در دسترس بودن به عنوان آلاینده انتخاب شد. نمک دریا به عنوان کلرید سدیم، انتخاب گردید که فاقد هر گونه رسوبات بوده و در طی آزمایش، نوع آن تغییر نکرد. غلظت ۹ گرم در لیتر (۱۴ دسی زمینس بر متر) بر اساس مطالعات صورت گرفته، نمونه ای از غلظت یون کلر در شیرابه ی محل های دفن زباله و یا نمونه ای از غلظت جمع آوری شده ی یون سدیم یا یون های مشابه دیگر مانند پتاسیم می باشد (آیوتامونو، ۱۹۹۸). به همین علت محلول کلرید سدیم با هدایت الکتریکی ۱۴ دسی زمینس بر متر برای آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین شدت جریان عبوری در محدوده ی پژوهش های مشابه، $10^{-5} \times 17/58$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. ماسه در سه اندازه ی ریز و متوسط و درشت برای انجام این پژوهش انتخاب شد. ماسه ها پس از شسته و خشک شدن به وسیله الک های استاندارد، دانه بندی شد تا اندازه ی قطر ذرات آن ها به دست آید (جدول ۱).

آلاینده در خاک های ناهمگن و لایه ای از جهات مختلف با خاک همگن متفاوت است، انجام مطالعات بر روی فرآیندهای انتقال املاح در این خاک ها ضروری است. لذا در نظر گرفتن خاک بصورت همگن صرفاً برای امور مطالعاتی ایده آل مناسب است. بنابراین در این پژوهش برای تشابه با شرایط واقعی و آنچه که در فرایند رسوب گذاری در طبیعت رخ می دهد، مدل مطبق با چیدمان طبیعی (از کف درشت، متوسط و ریز) انتخاب گردید. همچنین برای بررسی اثر فاصله ی انتقال، از مدلسازی عددی حرکت آلاینده در خاک ماسه ای مطبق افقی با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی استفاده گردید.

مواد و روش ها

برای انجام این پژوهش جهت مدل سازی نیاز به داده آزمایشگاهی بوده است، لذا ابتدا مدل آزمایشگاهی مورد نیاز ساخته شده و سپس با استفاده از مدل Hydrus پدیده انتقال آلاینده در یک محیط متخلخل مطبق، مدلسازی شد که در ادامه به آن ها پرداخته شده است:

مدل آزمایشگاهی

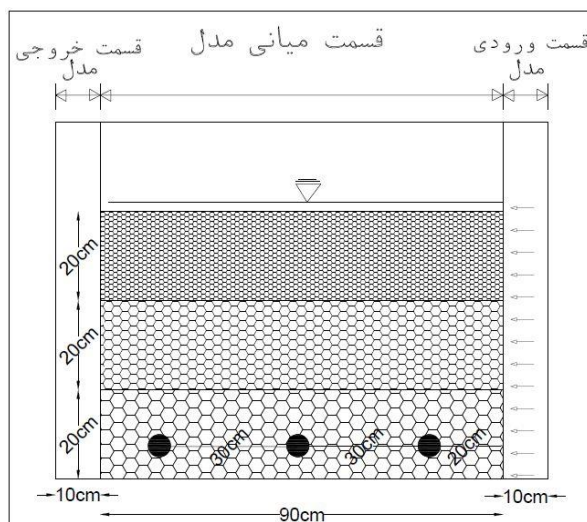
در این پژوهش یک مدل آزمایشگاهی به صورت مخزنی مستطیلی از جنس شیشه ی نشکن (سکوریت) به طول ۱۱۰، عرض ۱۰ و ارتفاع ۸۰ سانتی متر ساخته شد. مخزن مستطیلی از سه قسمت ورودی، محیط متخلخل و خروجی تشکیل شده بود که با صفحاتی مشبک به منظور یک بعدی کردن جریان از هم مجزا شده بودند، به طوری که ماده ی آلاینده از کل ارتفاع خاک به صورت افقی عبور می نمود. همچنین برای جلوگیری از عبور ذرات ریز و گرفتگی منافذ، صفحات مشبک با توری نخی محافظت شدند. به منظور تأمین شدت جریان ثابت عبوری از داخل

جدول (۱): مشخصات کلی آزمایش ها

| تخلخل (%) | | | اندازه‌ی ذرات ماسه (mm) | | | غلظت آلاینده | سرعت ظاهری جریان |
|-----------|-------|-----|-------------------------|--------|--------|--------------|--------------------------|
| درشت | متوسط | ریز | درشت | متوسط | ریز | C (ds/m) | $V \times 10^{-5}$ (m/s) |
| ۴۰ | ۴۰ | ۳۹ | ۲,۳۶-۲,۸ | ۲-۲,۳۶ | ۱-۱,۱۸ | ۱۴ | ۱۷,۵۸ |

به آرامی کوبیده می‌شدند تا به حداکثر تراکم طبیعی برسند. قبل از شروع آزمایش، می‌بایست از خارج شدن حباب‌های هوا مطمئن شد تا مخزن برای انجام آزمایش آماده باشد. شدت جریان عبوری مورد نظر نیز با تنظیم ارتفاع خروجی ایجاد می‌شد. هم‌زمان با شروع آزمایش، نمونه ای برای اندازه‌گیری غلظت تهیه می‌شد. اولین قرائت‌ها در زمان $t=0$ مربوط به غلظت محلول در مخزن و آبخوان بود. سپس در فواصل زمانی تقریباً ۲ تا ۲۰ دقیقه به طور هم‌زمان غلظت محلول خروجی از نمونه‌گیرها اندازه‌گیری می‌شد. نمونه‌گیری تا رسیدن غلظت نمونه‌ها به غلظت نهایی (۱۴ دسی‌زیمنس بر متر) ادامه می‌یافت.

سپس مدل به شکل مطابق از ماسه‌ی درشت، متوسط، ریز به ترتیب از کف و با ضخامت هر لایه ۲۰ سانتی متر، پر شد. (شکل ۱). برای انتقال آلاینده در آبخوان شبیه‌سازی شده، فرضیه‌هایی در نظر گرفته شده بود که عبارت بودند از: (۱) افقی بودن جهت جریان سیال. (۲) ثابت بودن تخلخل ماسه. (۳) همگن و اشباع بودن محیط متخلخل. برای آماده کردن مخزن، ابتدا آب به داخل مخزن تا ارتفاع کمی بالاتر از ارتفاع مورد نظر اضافه می‌شد. در این هنگام، مجاری ورودی و خروجی مخزن بسته بود. سپس، ماسه‌ی خشک شده به تدریج از بالای مخزن اضافه می‌شد تا به ارتفاع مورد نظر برسد. پس از ریختن حجم مشخصی از ماسه، به وسیله یک قطعه ورق ژئوممبران که به یک دسته‌ی چوبی متصل شده بود



شکل (۱): نمای روبرو از مدل فیزیکی و آبخوان شبیه سازی شده

مدل فرید-کامبرنوس

تاکنون مدل‌های زیادی برای مسئله انتقال املاح در داخل آبخوان‌ها ارائه شده است. با توجه به این که جابجایی و انتشار آلاینده‌ها در خاک با سه مکانیسم انتقال توده‌ای، پخشیدگی مولکولی و انتشار مکانیکی انجام می‌پذیرد و با در نظر گرفتن تاثیر این سه فرایند در حرکت آلاینده‌ها، معادله‌ی یک بعدی جابجایی-انتشار برای محلول پایدار در محیط متخلخل همگن و در حالت اشباع تحت شرایط جریان دائمی به صورت زیر می‌باشد. مجموع پخشیدگی مولکولی و انتشار مکانیکی، تحت عنوان انتشار هیدرودینامیکی بیان می‌شود:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = -v \frac{\delta c}{\delta z} \delta z + D \frac{\delta^2 c}{\delta z^2} \quad (1)$$

D: ضریب انتشار هیدرودینامیکی (M^2L^{-1})

C: غلظت آلاینده (ML^{-3})

z: فاصله (L)

v: متوسط سرعت واقعی آب (LT^{-1})

و ضریب انتشار هیدرودینامیکی توسط دو پارامتر بیان می‌شود:

$$D = \alpha V + D^* \quad (2)$$

α : ضریب انتشارپذیری محیط متخلخل (L)

D^* : ضریب پخشیدگی مولکولی محلول در محیط متخلخل (L^2T^{-1})

این معادله، معادله‌ی انتقال املاحی که معادله‌ی مشتق جزئی غیرخطی است که دارای دو متغیر زمان (t) و مکان (L) و یک متغیر وابسته غلظت (C) است. این نوع معادلات دارای جواب‌های زیادی هستند و برای این که جواب واحدی از آن‌ها به دست آید، باید شرایط اولیه و شرایط مرزی سیستم تعریف شود. شرایط اولیه و مرزی به صورت ریاضی به شرح زیر بیان شده‌اند:

$$C(L, 0) = 0 \quad L \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t \geq 0$$

با این شرایط، حل رابطه‌ی (۱) برای محیط متخلخل همگن اشباع عبارت است از:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vL}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن erfc تابع خطای تکمیلی است و به صورت

زیر تعریف می‌شود:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (4)$$

$\operatorname{Erf}(x)$: تابع خطا

L: فاصله در طول مسیر جریان (L)

V: متوسط سرعت خطی آب در خلل و فرج خاک (LT^{-1})

در شرایطی که مقدار انتشارپذیری محیط متخلخل زیاد

یا L و t بزرگ باشد مقدار جمله‌ی دوم سمت راست معادله،

ناچیز می‌شود بنابراین:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (5)$$

نسبت $\frac{c}{c_0}$ در مقابل زمان (t) در خروجی ستون بیانگر

منحنی رخنه (BTC) می‌باشد. رابطه‌ی (۵) هم‌چنین برای

محاسبه‌ی شکل‌های منحنی رخنه استفاده می‌شود. در

پژوهش حاضر با اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ی عبوری از

ستون‌های خاک در فواصل انتقال مختلف و در نهایت رسم

نمودارهای رخنه (BTC) به بررسی پارامترهای انتشار

پرداخته شد. برای ارزیابی انتشارپذیری در این پژوهش از

مقادیر انتشار هیدرودینامیکی به دست آمده از مدل فرید-

کامبرنوس استفاده شد.

مدل فرید-کامبرنوس: ضریب انتشار هیدرودینامیکی

توسط مدل فرید-کامبرنوس (۱۹۷۱) به صورت زیر محاسبه

می‌شود:

$$D = \frac{1}{8} \left[\frac{(L-vt_{0.16})}{t_{0.16}^{0.5}} - \frac{(L-vt_{0.84})}{t_{0.84}^{0.5}} \right]^2 \quad (6)$$

V: سرعت حرکت آلاینده در خلل و فرج خاک، که معمولا

با (v_c) نشان داده می‌شود.

$$v_c = \frac{L}{t_{0.5}}$$

L: طول ستون خاک (L)

$t_{0.16}$ و $t_{0.84}$: به ترتیب زمان رسیدن به غلظت‌های

نسبی ۰/۱۶ و ۰/۸۴



مدل هایدروس

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (10)$$

در این روابط، S درصد آب خاک اشباع، τ درصد آب خاک باقیمانده، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع و m ، n و L پارامترهای وابسته به خاک و α عکس مکش ورود هوا در حالت اشباع هستند که با استفاده از برازش بر معادله مورد نظر بدست می‌آیند. پارامترهای مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و نیز پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) در مدل ونگنوختن-معلم، به وسیله ی مدل Rosseta پیش‌بینی شدند (جدول ۲). این مدل یکی از افزونه‌های نرم افزار هایدروس است که بر اساس شبکه عصبی مصنوعی کار می‌کند و با وارد کردن داده‌هایی مثل درصد دانه بندی، درصد رطوبت ظرفیت زراعی و درصد بافت های مختلف خاک، پارامترهای هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند.

حرکت آب در محیط متخلخل با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶) شبیه‌سازی شد. معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله بعدی ریچاردز می باشد:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} [k(h) \frac{\delta h}{\delta x}] + \frac{\delta}{\delta z} [k(h) \frac{\delta h}{\delta z} + k(h)] - S \quad (7)$$

در این رابطه، θ درصد رطوبت حجمی ($L^3 L^{-3}$)، h بار فشار آب در محیط متخلخل (L)، t زمان (T)، k هدایت هیدرولیکی ($L T^{-1}$)، x جهت افقی و z جهت عمودی می‌باشد. S نیز نشان‌دهنده مقدار جذب آب توسط ریشه از خاک می‌باشد ($L^3 L^{-3} t^{-1}$). مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از رابطه‌ی ونگنوختن-معلم به دست می‌آید (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (9)$$

جدول (۲): پارامترهای هیدرولیکی ماسه‌های مورد استفاده در تحقیق، تخمین زده شده توسط مدل رزتا

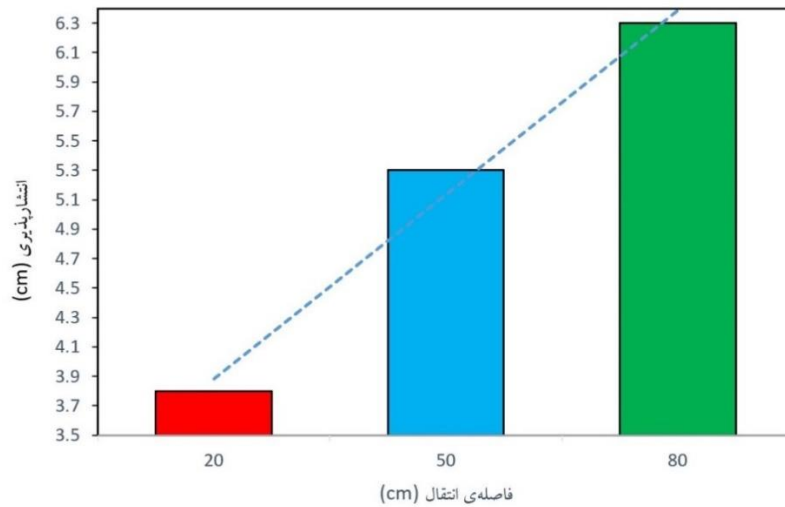
| I | Ks(cm/min) | n | Alpha(1/cm) | Qs | Qr | دانه‌بندی |
|-----|------------|--------|-------------|--------|--------|-----------|
| ۰.۵ | ۱,۰۲۴۹۸ | ۴,۶۵۲۴ | ۰,۰۳۰۱ | ۰,۳۴۸۷ | ۰,۰۵۳۶ | درشت |
| ۰.۵ | ۰,۹۹۳۸۷۵ | ۴,۶۰۹۶ | ۰,۰۳۰۲ | ۰,۳۴۲۵ | ۰,۰۵۳۲ | متوسط |
| ۰.۵ | ۰,۹۶۰۱۸۷ | ۴,۵۵۷۵ | ۰,۰۳۰۲ | ۰,۳۵۶۳ | ۰,۰۵۲۸ | ریز |

۳/۸ سانتی‌متر مربوط به فاصله انتقال ۲۰ سانتی‌متری و حداکثر مقدار انتشارپذیری ۶/۳ سانتی‌متر مربوط به فاصله انتقال ۸۰ سانتی‌متری می‌باشد. با افزایش ۳۰ سانتی‌متری فاصله انتقال در خاک لایه ای، مقادیر انتشارپذیری به میزان ۱/۲-۱ سانتی‌متر افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج سایر محققین مانند فراستی و سیدیان (۱۳۹۲) و یونس و همکاران (۲۰۲۰) که افزایش مقادیر ضریب انتشارپذیری با افزایش فاصله انتقال در خاک ناهمگن را گزارش کرده اند، تطابق دارد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی

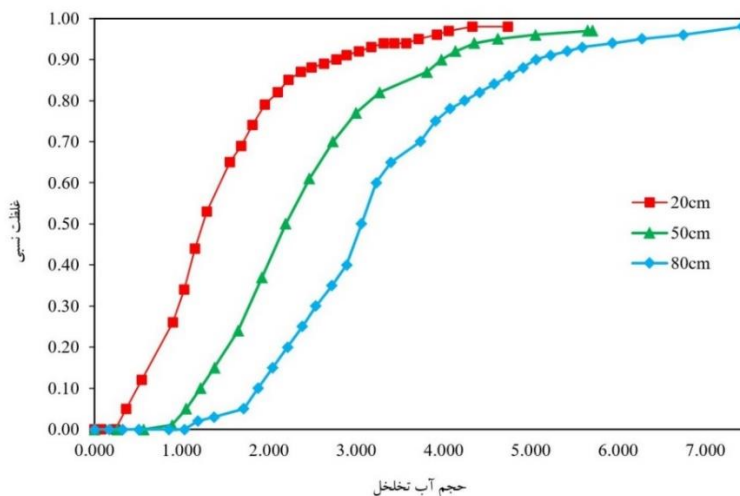
همان‌طوری که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، مقادیر انتشارپذیری خاک مطبق در سه فاصله انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از مدل فرید-کامبرنوس مقادیر انتشارپذیری خاک در این فواصل محاسبه گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، حداقل مقدار انتشارپذیری



شکل (۲): مقادیر انتشارپذیری در فواصل انتقال مختلف

رسیدن به غلظت $0/5$ با خروج یک حجم آب تخلخل انجام نمی‌شود بلکه در نسبت کمتری اتفاق می‌افتد، در این آزمایش نیز در همه فواصل انتقال قبل از رسیدن به غلظت نسبی $0/5$ ، حجم آب تخلخل به یک می‌رسد. با مقایسه زمان‌های $0/16$ و $0/84$ مشاهده می‌شود که در فاصله انتقال 80 سانتی‌متری خاک ماسه ای مطبق، زمان بیشتری صرف رسیدن به غلظت نسبی $0/16$ و $0/84$ می‌شود و سرعت انتقال آلاینده در این فاصله انتقال کمتر از دو فاصله‌ی دیگر است. زیرا همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد بیشترین حجم آب تخلخل برای رسیدن به غلظت نسبی $0/5$ ، در این فاصله‌ی انتقال به کار رفته است.

منحنی‌های تعداد حجم آب تخلخل بکار رفته برای هر فاصله‌ی انتقال در شکل ۳ قابل مشاهده است. محور عمودی نمودار غلظت نسبی و محور افقی آن تعداد حجم آب تخلخل به کار رفته با گذشت زمان در آزمایش می‌باشد. آزمایش‌های انتقال با استفاده از بررسی ضریب انتشارپذیری، منحنی‌های رخنه و تعداد حجم آب تخلخل به کار گرفته شده ارزیابی می‌شوند. با مقایسه منحنی‌های رخنه آزمایش مذکور ملاحظه گردید که در همه‌ی فواصل انتقال، منحنی‌های رخنه رسم شده از حالت متقارن خارج شده‌اند. همان‌طور که در نتایج بدست آمده از تحقیقات آل‌طبا و همکاران (۲۰۰۰) عنوان شده است که در فواصل انتقال کوتاه، زمان

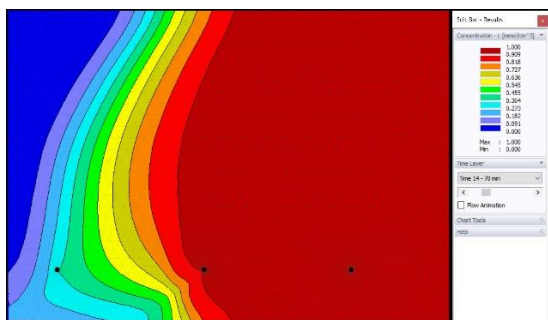


شکل (۳): منحنی های رخنه مربوط به خاک ماسه ای مطابق در فواصل انتقال مختلف

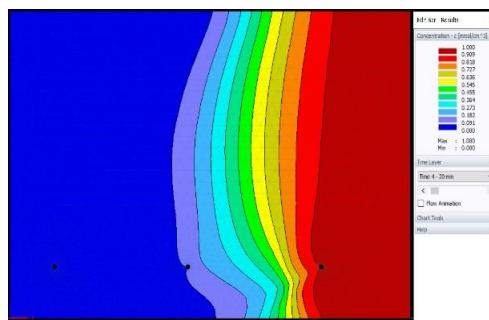
نتایج حاصل از مدل سازی عددی

در مرحله زمانی ۳۱ به غلظت نهایی رسیده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار هیدروس با افزایش فاصله‌ی انتقال مدت زمان و میزان انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک افزایش یافته است به طوری که با نزدیک شدن غلظت نمونه‌ها به غلظت نهایی آلاینده مقدار آن ثابت شده است

شبیه‌سازی حرکت کلرید سدیم در خاک مورد مطالعه در مراحل زمانی مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. زمان آزمایش به ۶۰ مرحله‌ی زمانی (هر مرحله ۵ دقیقه) تقسیم گردیده است. با توجه به شکل، فاصله انتقال ۲۰ سانتی‌متری در مرحله زمانی ۴، فاصله انتقال ۵۰ سانتی‌متری در مرحله زمانی ۱۴ و فاصله انتقال ۸۰ سانتی‌متری



ب. مرحله زمانی ۱۴، رسیدن فاصله انتقال ۵۰ سانتی‌متری به غلظت نهایی



الف. مرحله زمانی ۴، رسیدن فاصله انتقال ۲۰ سانتی‌متری به غلظت نهایی

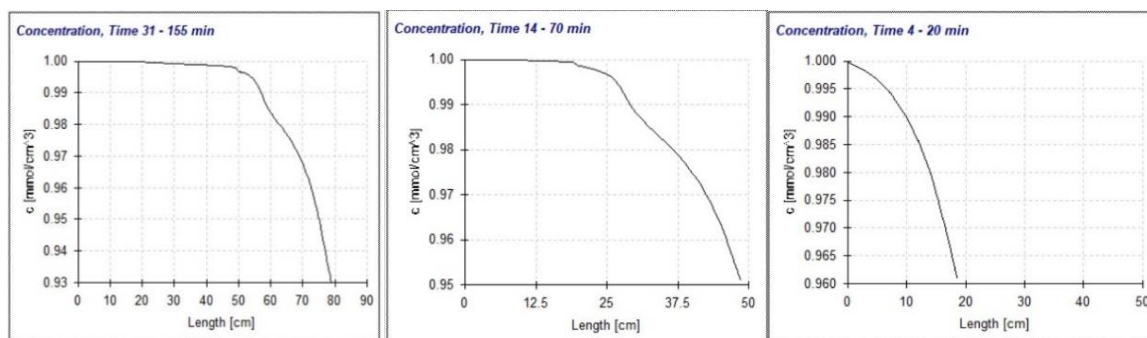


ج. مرحله زمانی ۳۱، رسیدن فاصله انتقال ۸۰ سانتی متری به غلظت نهایی

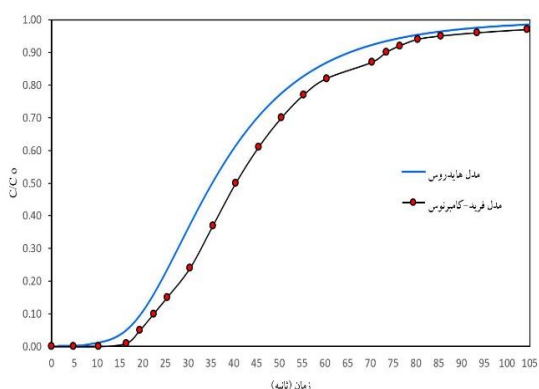
شکل (۴): نتایج شبیه سازی کلرید سدیم با استفاده از نرم افزار Hydrus

برای فواصل انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی متری مقایسه گردیده و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای هر فاصله انتقال محاسبه شده است. میزان خطای RMSE بین آزمایش مدل و شبیه سازی هایدروس برای فاصله انتقال ۲۰ سانتی متری برابر با ۰/۰۶۱، برای فاصله انتقال ۵۰ سانتی متری برابر با ۰/۰۶۳ و برای فاصله انتقال ۸۰ سانتی متری برابر با ۰/۰۵۷ می باشد که نشان دهنده ی پیش بینی دقیق نرم افزار از نحوه توزیع آلاینده در محیط متخلخل است

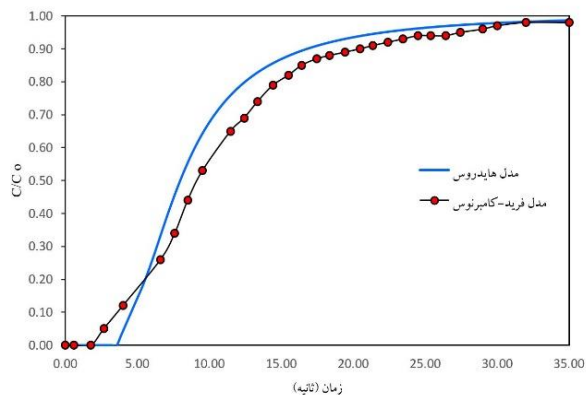
نمودارهای تغییرات غلظت خروجی کلرید سدیم در مقابل طول فاصله ی انتقال خاک در مراحل زمانی ۴، ۱۴ و ۳۱ در شکل ۵ قابل مشاهده است که نشان دهنده ی سرعت انتشار زیاد کلرید سدیم در فاصله انتقال ۲۰ سانتی متری و کم شدن آن در فواصل بیشتر است. همانطور که مشاهده می-گردد در فاصله انتقال ۲۰ سانتی متری کلرید سدیم به سرعت در ستون خاک پخش گردیده و با افزایش طول فاصله انتقال، سرعت انتشار کلرید سدیم کاهش یافته است. در شکل ۶ منحنی رخنه حاصل از نمونه برداری از مدل آزمایشگاهی با منحنی رخنه بدست آمده از مدل هایدروس



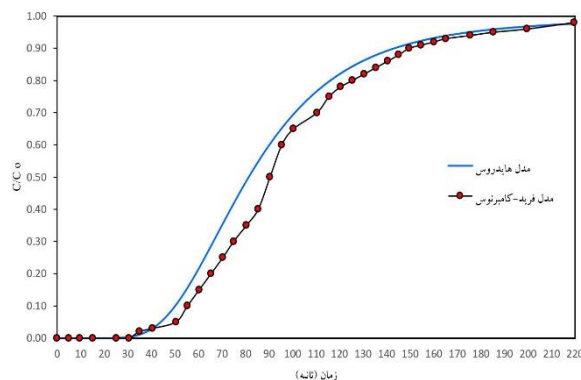
شکل (۵): تغییرات غلظت خروجی کلرید سدیم در مقابل طول فاصله ی انتقال (به ترتیب از راست) ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی متری



ب. فاصله انتقال ۵۰ سانتی متری



ف. فاصله انتقال ۲۰ سانتی متری



ج. فاصله انتقال ۸۰ سانتی متری

شکل (۶): نتایج شبیه سازی کلرید سدیم با استفاده از نرم افزار Hydrus

اثر فاصله انتقال در این مطالعه با پژوهش های پیشین مانند معروف پور و همکاران (۱۳۸۴)، فراستی و سیدیان (۱۳۹۲) و یونس و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت داشت. در این تحقیق در همه فواصل انتقال قبل از رسیدن به غلظت نسبی ۰/۵، حجم آب تخلخل به یک رسید و سرعت انتقال آلاینده با افزایش فاصله انتقال کمتر شد. سپس مدلسازی عددی توسط نرم افزار هایدروس انجام شد و بین نتایج حاصل از مدل فیزیکی و مدلسازی عددی با استفاده از محاسبه ی خطای RMSE مقایسه انجام شد. خطای RMSE برای فاصله های انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی متری به ترتیب برابر با ۰/۰۶۱، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۵۷ به دست آمد. این نتایج نشان داد که مدل عددی به خوبی می تواند توزیع آلاینده در محیط متخلخل را پیش بینی کند.

نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به اهمیت بررسی ضریب انتشارپذیری در خاک های غیرهمگن و همچنین اهمیت اثر فاصله انتقال، به بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی عددی آن پرداخته شد. به این منظور ابتدا مدل فیزیکی به صورت یک تانک مستطیلی از جنس شیشه سکوریت ساخته شد و آزمایش در یک محیط متخلخل لایه ای شامل ماسه با سه دانه بندی مختلف ریز، متوسط و درشت در سه فاصله انتقال ۲۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی متری انجام شد. ضریب انتشارپذیری به دست آمده از مدل فیزیکی با استفاده از مدل فرید-کامبرنوس برای فواصل ذکر شده، به ترتیب ۳/۸، ۵/۳ و ۶/۳ سانتی متر به دست آمده است. نتایج حاصل از بررسی



منابع

- شیرانی، ح. کرد، م. صیاد، غ. نقوی، ه. ۱۳۹۰. شبیه سازی حرکت برومید در ستون های دست خورده خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D. پژوهش های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). ۲۴(۳):۳۱-۲۰.
- فراستی، م. سیدیان، س. ۱۳۹۲. اثر فاصله انتقال بر انتشارپذیری کلرید سدیم با استفاده از نرم افزار HYDRUS 2D. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۸۳-۸۲۳: ۲۷(۴).
- معروف پور، ع.، کشکولی، ح.، معاضد، ه.، محمدولی سامانی، ح.، ۱۳۸۴. بررسی وابستگی انتشار پذیری خاک به ضخامت آن در خاک های ماسه ای همگن اشباع. مجله علوم دانشگاه شهید چمران. ۱۶-۲۹.
- Al Tabbaa A. and Ayotamuno J.M. 2000. One dimensional solute transport in stratified sands at short travel distances. *Journal of Hazardous Materials*. 73: 1-15.
- Ayotamuno, J.M. 1998. Contaminant transport and immobilization in stratified sands. Ph.D. thesis, University of Birmingham, UK.
- Costa, J.L., Knighton, R. E. and Prunty, L. 1994. Model comparison of unsaturated steady-state solute transport in a field plot. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58(5), pp 1277-1287.
- Emamgholizadeh S., Bahman K., Bateni S. M., Ghorbani H., Marofpoor I. and Nielson J. R. (2017). Estimation of soil dispersivity using soft computing approaches. *Neural Computing and Applications* 28(1), pp 207-16.
- Fried, J.J. and Comberous, M.A. 1971. Dispersion in porous media. *Hydroscience*, Vol. 7, pp 169-282.
- Gillham, R.W. and Cherry, J.A. 1982. Contaminant migration in saturated unconsolidated geological deposits. Geological Society of America, Special Paper 189.
- Huang, G. Huang, Q. and Z. Hongbin. 2006. Evidence of one-dimensional scale-dependent fractional advection-dispersion, *Journal of Contaminant Hydrology*. 85 (1-2):53-71.
- Moazed, H., Maroufpoor, E., Kashkouli, H.A. and Samani, J.M.V., 2009. Laboratory scale effect of aquifer thickness on dispersivity of porous media. *Journal of Applied Sciences*, 9(3), pp.542-548.
- Porro, I., Wierenga, P.J. and Hills, R.G. 1993. Solute transport through large uniform and layered soil columns. *Water Resour. Res.*, Vol. 29(4), pp 1321-1330.
- Selim, H.M., Davidson, J.M. and Rao, P.S.C. 1977. Transport of reactive solutes through multilayered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 41, pp 3-10.
- Shamir, U.Y. and Harleman, D.F.R. 1967. Dispersion in layered porous media. *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.*, Hydraulic Div., 93(5), pp 237-260.
- Simunek, J. Sejna, M. and M.Th. Van Genuchten. 2006. The hydrus software package for simulating the two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, User Manual Version 1.0, PC-progress, Prague, Czech Republic.
- Younes, A., Fahs, M., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T., 2020. Effect of distance-dependent dispersivity on density-driven flow in porous media. *Journal of Hydrology*, 589, p.125204.



Study of the Effect of Transport Distance on Dispersion Coefficient of Sodium Chloride in Horizontal Stratified Sandy Soils and its Simulation with HYDRUS- 2D

Hamed Mahdipanah¹¹, Askari Tashakori*², Samad Emamgholizadeh³, Eisa Maroufpoor⁴

Abstract

Dispersion is one of the most important measurable properties of porous media. This important parameter is used in the Advection–Dispersion transport equation related to pollutant transfer in the study of groundwater resources. In the past studies, the dispersion coefficient was considered a constant coefficient for the whole porous media, but many studies over the last few decades have shown that it depends on many parameters, including the transmission distance. Since most of these studies have been performed in homogeneous porous media, in this study, experimental study was carried out to investigate the effect of transfer distances of 20, 50 and 80 cm on the dispersion coefficient in layered soils which containing coarse, medium and fine sand. The results of this study showed that at all transfer distance, the volume of porous water before reaching to the relative concentration of 0.5, reached to one and the rate of pollutant transfer decreased with increasing transfer distance. This result consistence with finding of other studies. Numerical modeling by HYDRUS- 2D model also showed that this model was able to calculate the value of diffusion coefficient for transmission distances of 20, 50 and 80 cm with RMSE error equal to 0.061, 0.063 and 0.057, respectively, which indicates its high accuracy in simulating and movement of pollutants in the porous media.

Keywords: Dispersion, Fried-Camernous model, HYDRUS–2D, Porous media, Transport distance.

Ph.D. student, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.
Email: mrpanah@gmail.com`

² *Assistant Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran. Email: tash2447@gmail.com

³ Associate Professor, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir

⁴ Associate Professor, Dept. of Water Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
Email: e.maroufpoor@uok.ac.ir