

## شبیه سازی حرکت یک بعدی و دوبعدی آلودگی بطریقه انتشار مولکولی در زیر یک مدفن زباله

کاظم بدو

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

Email : K.badv@urmia.ac.ir

### چکیده

حرکت یک بعدی و دو بعدی آلودگی از میان یک لایه خاک ریزدانه به طریق انتشار مولکولی خالص، با استفاده از مدل های یک بعدی و دو بعدی آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. این مدل ها یک وضعیت ساده شده هیدروژئولوژیک در زیر مدفن زباله را که دارای یک لایه خاک ریزدانه منتهی به سنگ بستر است شبیه سازی نمودند. در آزمایش ها از محلول کلرور سدیم به عنوان ماده آلوده در بالای یک لایه خاک رس متراکم شده استفاده شد. در طول آزمایش ها از ماده آلوده در بالای خاک نمونه برداری شده و تغییرات غلظت نسبت به زمان به دست آمد. در پایان آزمایش ها نمونه های خاک به قطعاتی بریده شده و غلظت یون کلر در ارتفاع خاک (مدل یک بعدی) و مقطع عرضی خاک (مدل دو بعدی) تعیین گردید. سپس با استفاده از مدل های تئوریک ضمن تعیین ضریب انتشار مولکولی خاک، نتایج آزمایشگاهی با تئوری مقایسه شده و تطابق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و پیش بینی تئوریک بدست آمد.

واژه های کلیدی : مدفن زباله، مدل آزمایشگاهی، انتشار مولکولی

## ۱- مقدمه

رطوبتی حدود ۲ درصد بیشتر از رطوبت بهینه به آن اضافه گردید. سپس در داخل آزمایش (یک بعدی و دو بعدی) متراکم گردید.

**جدول ۱ -** خصوصیات خاک سیلت رسی مورد استفاده در آزمایش

مقادیر	خصوصیات
۱/۹۶	دانسیته خشک حداکثر ( $\text{g/cm}^3$ )
۱۲/۹	درجه رطوبت بهینه (%)
۲/۷۳	چگالی ویژه
۸	درجه رطوبت حد خمیری (%)
۲۲	درجه رطوبت حد شلی (%)

از محلول کلرور سدیم با غلظت اولیه معین به عنوان ماده آلوده استفاده شده و یون کلر به عنوان یون مورد انتشار در آزمایش ها مورد آنالیز قرار گرفت.

## ۳- آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی

شکل ۱ لوله آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی را نشان می دهد. این وسیله شامل یک لوله پلی اتیلنی با قطر داخلی ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۲ سانتی متر که در روی یک صفحه شیشه ای قرار دارد، تشکیل شده است. لوله به صفحه شیشه ای با استفاده از چسب آکواریوم وصل شده است تا امکان ترواش از کف خاک وجود نداشته باشد.

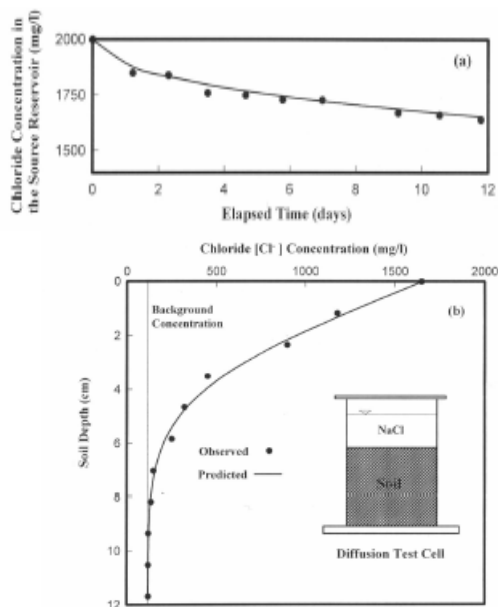
خاک آماده شده در چهار لایه و با استفاده از چکش تراکم در داخل لوله متراکم شده طوری که ارتفاع خاک پس از تراکم به ۱۲ سانتی متر رسید. نمونه ای از خاک برای تعیین غلظت اولیه خاک نگهداری و سپس با استفاده از دستگاه استحصال آب حفره ای خاک، آب حفره ای استحصال شده و غلظت یون کلر با استفاده از دستگاه یون متر تعیین گردید. بلافاصله پس از تراکم خاک در داخل لوله آزمایشی، محلول آماده شده کلرور سدیم روی خاک تا ارتفاع ۶ سانتی متر ریخته شده (مخزن آلوده) و زمان شروع آزمایش ثبت گردید. در طول آزمایش به طور منظم و روزانه یک نمونه از مخزن آلوده با سرنگ برداشت شده و هم حجم آن آب مقطر اضافه شده و محلول مخزن هم زده شد. در پایان آزمایش این نمونه ها برای تعیین غلظت یون کلر آنالیز شده و منحنی تغییرات غلظت یون کلر نسبت به زمان ترسیم گردید (نقاط دایره ای در شکل ۲a). در پایان آزمایش محلول از بالای خاک تخلیه شده، با

یون های شیمیایی موجود در شیرابه زباله که در زیر مدفن های زباله جمع می شود می تواند توسط عوامل حرکتی چون انتشار مولکولی (Diffusion) و فرارفت (Advection) از لایه های خاک زیر مدفن عبور کرده و به منابع آب زیرزمینی برسند (Rowe et al., 1995). در صورت عدم وجود جریان رو به پائین آب در زیر مدفن، عامل حرکتی فرارفت حذف شده لیکن عامل انتشار مولکولی که در اثر اختلاف غلظت بین کف مدفن و لایه خاک زیر مدفن به وجود می آید، می تواند باعث حرکت یون های شیمیایی به طرف پائین شود. مدلسازی یک بعدی حرکت آلودگی به طریقه انتشار مولکولی در منابع علمی گزارش شده است (Rowe et al., 1996a, 1996b; badv and faridfar, 2004, badv and Rowe, 1996, Rowe and badv, badv, 2004, badv and abdolalizadeh, 2004, badv). در خصوص مدلسازی انتشار مولکولی به صورت دو بعدی منابع علمی کمی وجود دارد و نیازمند تحقیق بیشتری است. در این مطالعه با استفاده از دو مدل آزمایشگاهی یک وضعیت هیدروژئولوژیک در زیر یک مدفن زباله که شامل یک لایه خاص سیلت رسی منتهی به سنگ بستر است، برای عامل حرکتی انتشار مولکولی خالص شبهه سازی گردید. از محلول کلرور سدیم به عنوان ماده آلوده در آزمایش ها استفاده شد. در مدل اول حرکت یک بعدی یون کلر به طریقه انتشار مولکولی در یک لایه خاک سیلت رسی متراکم شده مورد مطالعه قرار گرفته و ضمن تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک، رفتار آزمایشگاهی مدل با یک مدل تئوریک (نرم افزار Pollute) پیش بینی گردید. در مدل دوم حرکت دو بعدی یون کلر به طریقه انتشار مولکولی در همان لایه خاک مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده ضریب انتشار مولکولی به دست آمده از مدل یک بعدی رفتار مدل آزمایشگاهی با استفاده از یک مدل تئوریک دیگر (نرم افزار Migrate) پیش بینی گردید. آزمایش ها دو بار تکرار شدند و نتایج مشابهی بدست آمد. در این مقاله نتایج یک آزمایش از هر کدام ارائه شده است.

## ۲- مواد مورد استفاده در آزمایش ها

جدول ۱ خصوصیات خاک سیلت رسی مورد استفاده در آزمایش ها را نشان می دهد. خاک ابتدا در هوای آزاد خشک شده، خورده شده، از الک شماره ۴ رد شده، و

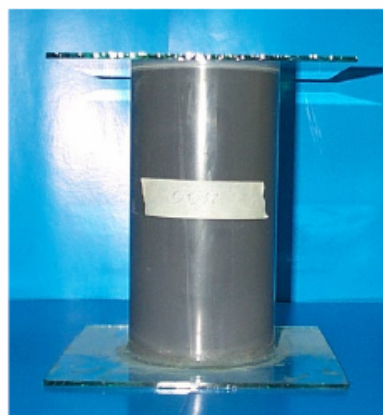
سانتیمتر در داخل مخزن ریخته شده و آزمایش آغاز گردید.



شکل ۲- نتایج مشاهده ای و تئوریک آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی: (a) تغییرات غلظت یون کلر نسبت به زمان در مخزن آلودگی، (b) تغییرات غلظت یون کلر در ارتفاع خاک

در طول آزمایش به طور مرتب و روزانه از محلول مخزن نمونه برداری شده و هم حجم نمونه ها آب مقطر اضافه گردید. نمونه ها برای یون کلر آنالیز شده و تغییرات غلظت یون کلر نسبت زمان ترسیم گردید (شکل ۴). در پایان آزمایش محلول از مخزن تخلیه شده، خاک سیلت رسی مطابق شکل ۵ به قطعات مربع شکل بریده شده، درجه رطوبت قطعات اندازه گیری شده، و آب حفره ای قطعات خاک استحصال گردید. غلظت یون کلر در محلول های استحصال شده اندازه گیری شده، در یک شبکه دو بعدی که نقاط آن وسط قطعات مربع شکل بودند یادداشت شده، و سپس با روش درون یابی منحنی های مشاهده ای هم غلظت برای یون کلر ترسیم گردیدند، شکل ۶ دو نمونه از منحنی های مشاهده ای و تئوریک (در ادامه بحث می شود) را برای غلظت های  $۸۳\text{mg/L}$  و  $۴۵۴\text{mg/L}$  نشان می دهد.

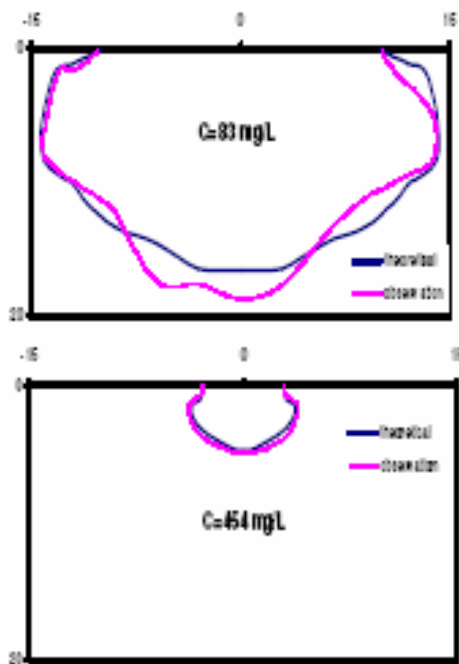
استفاده از یک سنبه چوبی نمونه خاک از داخل لوله بیرون آورده شده، به قطعات مساوی بریده شده، و درجه رطوبت هر قطعه اندازه گیری شد. سپس آب حفره ای هر قطعه توسط دستگاه استحصال آب حفره ای خاک استحصال شده، غلظت یون کلر در آب حفره ای اندازه گیری شده، و منحنی تغییرات غلظت یون کلر نسبت به ارتفاع خاک ترسیم گردید (نقاط دایره ای در شکل ۲b). در اشکال ۲a و ۲b منحنی های تئوریک منطبق شده روی داده های آزمایشگاهی نیز مشاهده می شوند که در ادامه بحث شده است.



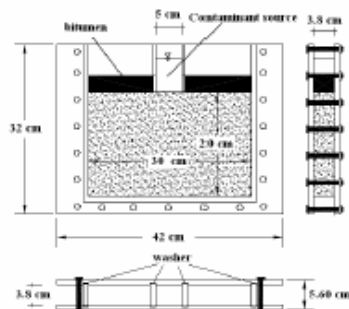
شکل ۱- لوله آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی

#### ۴- آزمایش انتشار مولکولی دو بعدی

شکل ۳ تصویر شماتیک و واقعی دستگاه آزمایش انتشار مولکولی دوبعدی را نشان می دهد. این دستگاه از دو صفحه ورق آکریلیک به ابعاد ۴۲ سانتیمتر (افقی) و ۳۲ سانتیمتر (عمودی) تشکیل شده که توسط ورق های میانی به ضخامت  $۳/۸$  سانتیمتر فضائی را در وسط برای تعبیه خاک مورد آزمایش فراهم می آورند. دستگاه توسط تعدادی پیچ و مهره به هم بسته می شود. در بالای دستگاه نیز مخزنی برای ریختن ماده آلوده (محلول کلرور سدیم) تعبیه شده است. نمونه خاک مانند آزمایش اول تهیه شده و در داخل دستگاه در لایه های ۲ سانتیمتری متراکم گردید. خاک پس از تراکم دارای ابعاد  $۳۰$  سانتیمتر (افقی)،  $۲۰$  سانتیمتر (عمودی)، و  $۳/۸$  سانتیمتر ضخامت بود. در سطوح بالایی و در طرفین مخزن آلوده از قیر برای آب بندی استفاده شد تا امکان تراوش از سطح خاک وجود نداشته باشد (شکل ۳). محلول کلرور سدیم با غلظت معین و تا ارتفاع  $۶/۸$



شکل ۶- منحنی های هم غلظت مشاهده ای و تئوریک یون کلر در مقطع دو بعدي خاک برای غلظت های  $83 \text{ mg/l}$  و  $454 \text{ mg/l}$  در آزمایش انتشار مولکولی دو بعدي



شکل ۳- دستگاه آزمایش انتشار مولکولی دو بعدي، (راست): شکل شماتیک مدل از روبرو، پلان، و مقطع عرضی، (چپ): تصویر واقعی مدل

### ۵- مدل های تئوریک

انتشار مولکولی یک بعدي یک ماده آلوده در خاک توسط رابطه زیر تعريف می شود (Rowe et al., 1995):

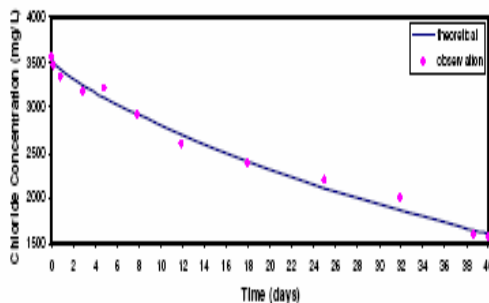
$$(\theta + \rho K_d) \frac{\partial c}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

و در شرایط دو بعدي بصورت رابطه زیر خواهد بود:

$$(\theta + \rho K_d) \frac{\partial c}{\partial t} = \theta D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \theta D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$$

در این معادلات  $D_y$  و  $D_z$  به ترتیب ضریب انتشار مولکولی یون در جهت قائم ( $z$ ) و افقی ( $y$ ) ( $L^2/T$ )،  $\theta$  درجه رطوبت حجمی خاک ( $L^3/L^3$ )،  $\rho$  دانسیته خشک خاک ( $M/L^3$ )،  $K_d$  ضریب توزیعی خاک ( $L^3/M$ ) و  $c$  غلظت یون در موقعیت  $z$  و  $y$  در داخل خاک ( $M/L^3$ ) در زمان  $t$  می باشد.

در آزمایش انتشار مولکولی یک بعدي از نرم افزار (POLLUTE (Rowe and Booker, 1994)) و در آزمایش انتشار مولکولی دو بعدي از نرم افزار (MIGRATE (Rowe and Booker, 1995)) برای



شکل ۴ - نتایج مشاهده ای و تئوریک تغییرات غلظت یون کلر نسبت به زمان در منبع آلودگی، در آزمایش انتشار مولکولی دو بعدي



شکل ۵ - قطعات بریده شده خاک پس از پایان آزمایش انتشار مولکولی دو بعدي

مولکولی بدست آمده از آزمایش های یک بعدی و دو بعدی وجود دارد و اختلاف بین مقادیر ناچیز است که در اثر اختلاف جزئی در مقادیر درجات رطوبت و اشباع خاک ها در دو آزمایش و همچنین خطاهای اجتناب ناپذیر آزمایشگاهی است.

## ۷- نتایج کلی

از دو آزمایش فوق می توان نتیجه گرفت که اگر چنانچه خاک دارای شرایط ایزوتروپ و همگنی باشد، برای پیش بینی نحوه انتشار مولکولی یون در خاک در شرایط دو بعدی، می توان از ضریب انتشار یونی بدست آمده از آزمایش یک بعدی برای خاک مشابه استفاده کرد و انجام آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی در خاک ساده تر و کم هزینه تر از آزمایش دو بعدی است.

همچنانکه مشاهده شد، مدل های آزمایشگاهی و روش های استفاده شده در آزمایش ها نتایج قابل قبولی را بدست دادند. همچنین مدل های تئوریک استفاده شده در این مطالعه توانستند رفتار آزمایشگاهی (مشاهده ای) مدل های فیزیکی را به خوبی پیش بینی کنند. از این مدل ها می توان در مطالعات انتقال آلودگی در خاک و در اشل آزمایشگاهی بهره جست.

## ۸- مراجع

- 1-Badv, K. 2004. An overview on the laboratory modelling of the secondary leachate collection system of a landfill, 1st Water and Environment Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Saskatoon, Canada, pp. WE-97-1-8.
- 2-Badv, K. and Abdolalizadeh, R. 2004. A laboratory investigation on the hydraulic trap effect in minimizing chloride migration through silt, Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, 28, No. B1: 107-118.
- 3-Badv, K. and Faridfard, M.R. 2004. Laboratory determination of water retention and diffusion coefficient in unsaturated sand, Water, Air, and Soil Pollution, Kluwer Academic Publishers, (Accepted).
- 4-Badv, K. and Mahooti, A.A. 2004. Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil systems, Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Vol. 28, No. B5: 559-572.

پیش بینی رفتار مدل های آزمایشگاهی بصورت تئوریک استفاده شد. معادلات ۱ و ۲ به ترتیب در نرم افزار های فوق تعبیه شده اند. برای محاسبات، داده های فیزیکی، شیمیایی، هندسی مدل فیزیکی به همراه شرایط مرزی و یک ضریب انتشار مولکولی، به برنامه تعریف شده و خروجی برنامه که شامل منحنی غلظت - زمان برای مخزن آلوده و منحنی غلظت - ارتفاع خاک (مدل یک بعدی) و غلظت - مقطع عرضی خاک (مدل دو بعدی) بدست می آید و این منحنی ها روی داده های مشاهده ای رسم می شوند. آن ضریب انتشار مولکولی که بهترین تطابق را بین منحنی های پیش بینی شده (تئوریک) و مشاهده ای نتیجه دهد، به عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک رسی مورد آزمایش انتخاب می شود.

## ۶- بحث و نتیجه گیری

### ۶-۱- آزمایش انتشار مولکولی یک بعدی

ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک مورد آزمایش برابر  $5/07 \times 10^{-10} m^2/s$  حاصل شد که مطابق شکل ۲ بهترین تطابق را بین نتایج مشاهده ای و تئوریک (محاسبات POLLUTE) نتیجه داد. درجه رطوبت حجمی خاک در پایان آزمایش برابر با ۳۰٪ و درجه اشباع آن برابر با ۹۷٪ بود. این مقدار ضریب انتشار مولکولی برای یون کلر و در خاک های مشابه گزارش شده در منابع علمی همخوانی دارد و به عنوان ضریب مینا در محاسبات آزمایش دو بعدی مورد استفاده قرار گرفت. (Badv and Abdolalizadeh, 2004, Rowe and badv, 996a).

### ۶-۲- آزمایش انتشار مولکولی دو بعدی

خاک سیلت رسی متراکم شده در آزمایش دو بعدی دارای شرایط ایزوتروپ و همگن بود لذا از ضرایب انتشار مولکولی یکسان برای یون کلر در خاک، در دو جهت قائم و افقی می توان استفاده کرد ( $D_z = D_y$ ). درجه رطوبت حجمی خاک در پایان آزمایش برابر با ۲۹/۹٪ و درجه اشباع آن برابر با ۹۸٪ بود. این مقادیر با مقادیر مشاهده شده از آزمایش یک بعدی همخوانی نزدیکی دارد. از ضرایب انتشار مولکولی  $D_z = D_y = 5/23 \times 10^{-10} m^2/s$  در محاسبات تئوریک با نرم افزار MIGRATE استفاده شد و مطابق اشکال ۴ و ۶ این مقادیر تطابق خوبی را بین نتایج مشاهده ای و تئوریک نتیجه داد. سازگاری خوبی بین ضرایب انتشار

- 5-Badv, K. and Rowe, R.K. 1996. Contaminant transport through a soil liner underlain by an unsaturated stone collection layer, Canadian Geotechnical Journal, 33: 416-430.
- Rowe, R.K. and Badv, K. 1996a. Chloride migration through clay underlain by fine sand or silt, ASCE - Journal of Geotechnical Engineering, 122(1): 60-68.
- 6-Rowe, R.K. and Badv, K. 1996b. Advective-diffusive contaminant migration in unsaturated coarse sand and fine gravel, ASCE - Journal of Geotechnical Engineering, 122(12): 965-975.
- 7-Rowe, R.K. and Booker, J.R. POLLUTE v.6. © 1983, 1990, 1994. 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil, Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada.
- 8-Rowe, R.K. and Booker, J.R. © 1988, 1995. MIGRATE V9 – analysis of 2-D pollutant migration in a non-homogeneous soil system: Users manual, Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada.
- 9-Rowe, R.K., Booker, J.R. and Quigley, R.M. 1995. Clayey barrier systems for waste disposal facilities, E & FN Spon (Chapman & Hall), London.
- 10-Rowe, R.K., Caers, C. J., Reynolds, G. and Chan, C. 2000. Design and construction of barrier system for the Halton Landfill, Canadian Geotechnical Journal, 37(3): 662-675.

# **Laboratory simulation of one and two dimensional contaminant transport by pure diffusion underneath a solid waste landfill**

**K. Badv**

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
Email : K.badv@urmia.ac.ir

One and two dimensional contaminant transport by pure diffusion through single layer of fine grained soil was investigated using one and two dimensional laboratory models. These models simulated a simple hydrogeologic situation underneath a solid waste landfill comprising a fine grained soil overlying a bed rock. Sodium chloride solution was used as a contaminant source above a compacted clayey soil. During the tests samples were taken from the source solution above the soil sample and the chloride concentration change with time was observed. At the end of the tests the soil sample was sliced and the concentration profile was obtained through the soil layer. Then using the theoretical models the observed data was compared with the theoretical predictions and the diffusion coefficient of chloride at the tested soils was obtained. A good agreement was obtained between the observed and predicted data.

**Keywords:** Land Fill, Experimental, Diffusion.