

مقایسه عملکرد لایه‌های مانع انتقال آلودگی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی

کاظم بدو¹ و مهدی نجف زاده²

تاریخ دریافت: 90/09/12 تاریخ پذیرش: 91/08/16

¹- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

²- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی

* مسئول مکاتبه: Email: k.badv@urmia.ac.ir

چکیده

با انجام یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی، گزینه‌های مختلف لایه‌های مانع انتقال آلودگی (لاینر) در مدفن زباله مورد ارزیابی قرار گرفت. مصالح انتخاب شده لاینر، برای خصوصیات انتشار مولکولی مورد آزمایش قرار گرفته و ضریب انتشار مولکولی یون کلر تعیین گردید. سه نوع گزینه لاینر شامل لایه رسی روی لایه سیلتی، لایه عایق رسی - ژئوسینتتیک (GCL) روی لایه سیلت، و لایه عایق رسی - ژئوسینتتیک روی لایه رسی، روی لایه سیلتی، به عنوان گزینه‌های لاینر یک مدفن زباله با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و تحت شرایط انتقال یون کلر به طریقه انتشار مولکولی - فرارفت مطالعه شدند. با استفاده از ضرایب انتشار مولکولی تعیین شده در آزمایشگاه و سرعت جریان آب رو به پائین در مدل‌ها، انتقال آلودگی مشاهده شده یون کلر به طریقه انتشار مولکولی - فرارفت با انتقال آلودگی پیش بینی شده با استفاده از مدل نظری، در گزینه‌های مختلف لاینرها مورد ارزیابی قرار گرفته و به عنوان لاینر موثر و مناسب در مدفن زباله برای کاهش انتقال آلودگی باهم مقایسه شدند. مقایسه غلظت‌های مشاهده‌ای و نظری مدل شده نشان داد که توافق خوبی بین آنها وجود داشته و مدل نظری استفاده شده قادر است بخوبی رفتار مدل‌های آزمایشگاهی را پیش بینی کند. مقایسه غلظت‌های مشاهده شده در سفره آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در کف لاینرهای مدل شده نشان داد که برای شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده در این مطالعه، هر سه گزینه لاینر انتخابی موانع خوبی از نظر کنترل انتقال آلودگی بوده، تفاوت معنی‌داری بین آنها وجود نداشته، و دارای عملکرد مشابهی هستند.

واژه‌های کلیدی: انتشار مولکولی، رس، ژئوسینتتیک، سیلت، عایق رسی، عملکرد، فرارفت، مدفن زباله

Comparison of the Performance of Contaminant Transport Barriers Using Laboratory Models

K Badv¹ and M Najafzadeh²

Received: 3 December 2011 Accepted: 6 November 2012

¹-Prof., Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran.

²-M.Sc. Student, Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran.

*Corresponding Author E-mail: k.badv@urmia.ac.ir

Abstract

By performing a series of laboratory tests, different landfill barrier layers alternatives (liners) were investigated. The selected liner materials were tested for molecular diffusive transport and the diffusion coefficient of chloride ion was determined. Three liner alternatives comprising of clay over silt, geosynthetic clay liner (GCL) over silt, and GCL over clay over silt, were evaluated using laboratory models and under chloride ion advective-diffusive transport. Using the chloride diffusion coefficients obtained in the laboratory and the models downward flow velocity, the observed advective-diffusive transport of chloride ion was evaluated against the predicted transport by theoretical model in three landfill liner alternatives. They were then compared as an effective and suitable liner to decrease contaminant transport in the landfill. The comparison of observed and predicted concentrations showed that there is a good agreement between the two and the theoretical model is capable to predict the behavior of the experimental models. The comparison of the observed concentrations in the simulated ground water underneath the modeled liners showed that for the prevailed test conditions in this study, all three selected liners are good barriers in terms of controlling contaminant transport and there is no significant difference between them, and all possess similar performance.

Keywords: Advection, Clay, Diffusion, Geosynthetic clay liner, Landfill, Performance, Silt

و براکمن 2004، رو و بدو 1996a، 1996b، بدو و رو (1996). استفاده از لاینرهای رسی متراکم شده در مدفن‌ها متداول و اغلب اقتصادی است. لیکن در مناطقی که خاک رس کافی در دسترس نیست، عایق‌های رسی-ژئوسینتتیک (GCLs) میتواند به عنوان گزینه‌های جایگزین مورد استفاده قرار گیرد (بدو و فارسیمدان 2009، لیک 2000، لیک و همکاران 2004). ارزیابی

مقدمه

شبیه‌سازی یک مدفن زباله (لندفیل) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی نحوه انتقال آلودگی از میان لایه‌های خاک و تأثیر آن در سفره‌های آب زیرزمینی در مطالعات متعددی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (بدو و ماهوتی 2004، 2005، بدو و عبدالعلی زاده 2004، لیک و رو 2000، رو

موثر با درصد رطوبت حجمی خاک تغییر می‌کند (پورتر و همکاران 1960، کمپر و ونشیک 1966). برای تخمین ضریب انتشار مولکولی خاک غیراشباع از روی ضریب انتشار مولکولی همان خاک در حالت اشباع یا نزدیک اشباع می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد (رو و بدو 1996a، 1996b):

$$D_e = \frac{D_{e(ref)}q}{q_{ref}} \quad [3]$$

در این معادله، D_e ، ضریب انتشار مولکولی موثر یون در خاک غیر اشباع، $D_{e(ref)}$ ضریب انتشار مولکولی موثر یون در خاک اشباع، q ، درصد رطوبت حجمی خاک غیر اشباع و $q_{ref} = n$ درصد رطوبت حجمی خاک اشباع برابر با پوکی خاک می‌باشد. یعنی در حالت غیر اشباع ضریب انتشار مولکولی تابعی خطی از درصد رطوبت حجمی می‌باشد.

شرط مرزی در کف لندفیل (بالای لایه‌های خاک) که در آن یونهای شیرابه با غلظت معین به لایه‌های زیرین خاک حرکت کرده و باعث کاهش غلظت در طول زمان می‌شود، با معادله زیر تعریف می‌شود (رو و بوکر 1984، 1985):

$$c(t, z=0) = c_0 + c_r t - \frac{1}{H_r} \int_0^t f(c, t, z=0) dt - \frac{q_c}{H_r} \int_0^t c(t, z=0) dt \quad [4]$$

در این معادله t زمان، c_0 غلظت اولیه یون در کف لندفیل، c_r نرخ افزایش غلظت ناشی از افزودن زباله به لندفیل، H_r ارتفاع معادل شیرابه در کف لندفیل، $f(c, t, z=0)$ جریان ورودی از کف لندفیل به داخل خاک و q_c حجم شیرابه زهکشی شده از کف لندفیل می‌باشد.

شرط مرزی پایین در زیر لایه‌های خاک، همان سفره آب زیر زمینی با جریان افقی آب در داخل آن می‌باشد. یون‌های ماده آلوده کننده پس از عبور از میان لایه‌های خاک وارد این لایه می‌شوند. این شرط مرزی با معادله زیر تعریف می‌شود:

معادل‌سازی لاینرها با استفاده از محاسبات نظری و انجام آزمایش‌ها با شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی قابل انجام است. این مقاله نتایج یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی به همراه محاسبات نظری را در خصوص عملکرد لاینرهای معادل، در یک مدفن زباله نشان می‌دهد.

مبانی نظری انتقال آلودگی در سیستم‌های چند لایه‌ای

مکانیزم‌های انتقال آلودگی از میان لایه‌های خاک شامل انتشار مولکولی¹، فرارفت²، پخش شدگی³، جذب⁴ و تجزیه⁵ می‌باشد. معادله زیر این مکانیزم‌ها را تعریف می‌کند (رو و همکاران 1995):

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = nD \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - nv \frac{\partial c}{\partial x} - rK_d \frac{\partial c}{\partial t} - nIc \quad [1]$$

در این معادله n پوکی خاک، c غلظت یون در خاک در زمان t و موقعیت مکانی x ، D ضریب پخش شدگی هیدرودینامیکی، v سرعت جریان آب زیرزمینی، r دانسیته خشک خاک، K_d ضریب توزیعی جذب یون در خاک و I نیمه عمر ماده آلوده می‌باشد. ضریب پخش شدگی هیدرودینامیکی مجموع ضریب انتشار مولکولی موثر D_e و ضریب پخش مکانیکی D_{md} می‌باشد:

$$D = D_e + D_{md} \quad [2]$$

مکانیزم انتشار مولکولی، حرکت ماده آلوده بر اساس اختلاف غلظت در سیال در محیط متخلخل است. این پدیده در محیطی که گرادیان هیدرولیکی آن پایین است و یا جریان آب برقرار نیست غالب می‌شود. پارامترهای مختلفی در مقدار ضریب انتشار مولکولی یک یون مشخص در یک خاک مشخص دخالت دارند. از جمله این پارامترها جنس و نوع خاک، درصد رطوبت و یا درجه اشباع خاک می‌باشند. ضریب انتشار مولکولی

¹ Molecular diffusion

² Advection

³ Dispersion

⁴ Adsorption

⁵ Decay

$$c(x, H_b, t) = \int_0^t \left[\frac{f_z(x, H_b, t)}{n_b h_b} - \frac{v_b \partial c(x, H_b, t)}{n_b \partial x} + D_H \frac{\partial^2 c(x, H_b, t)}{\partial^2 x} \right] dt \quad [5]$$

در معادله 7، v_a سرعت داریسی آب در خاک می-باشد. محاسبات نظری برای مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه که در ادامه توضیح داده شده است، شامل حل معادلات بالا با لحاظ شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌ها می‌باشد. حل معادلات فوق توسط رو و بوکر (1994) ارائه شده و در کد کامپیوتری POLLUTE تعبیه شده که در محاسبات نظری در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در آزمایش‌ها از دو نوع خاک ریزدانه محلی شامل خاک رس تهیه شده از یک کارخانه آجرپزی واقع در منطقه نازلوی ارومیه به عنوان لاینز رسی و خاک سیلت حاشیه رودخانه شهرچای ارومیه به عنوان خاک طبیعی بستر لندفیل استفاده شد. عایق رسی - ژئوسینتتیک (GCL) مورد استفاده نیز لاینز استاندارد مورد استفاده در لندفیل‌های مهندسی - بهداشتی با نام تجاری Modulo Geobent XP می‌باشد. خصوصیات مکانیکی این مصالح در جدول 1 نشان داده شده است.

در این معادله H_b ضخامت لایه خاک در بالای لایه آبدار، $c(x, z = H_b, t)$ غلظت یون در لایه آبدار، $f_z(x, H_b, t)$ جریان ورودی به لایه آبدار، n_b تخلخل لایه آبدار، h_b ضخامت این لایه، v_b سرعت داریسی در لایه آبدار و بالاخره D_H ضریب پخش-شدگی هیدرودینامیکی لایه آبدار در جهت افقی می‌باشد. برای مدل‌سازی سیستم چند لایه‌ای (مثل سیستم-های دو و سه لایه‌ای که در این مطالعه استفاده گردیده است)، طوری که شرایط جریان پایدار یک بعدی در آن برقرار باشد، باید سرعت داریسی بین لایه‌ها یک جریان پیوسته‌ای را تامین کند:

$$v_{a(i)} = q_{(i)} v_{(i)} = v_{a(i+1)} = q_{(i+1)} v_{(i+1)} \quad [6]$$

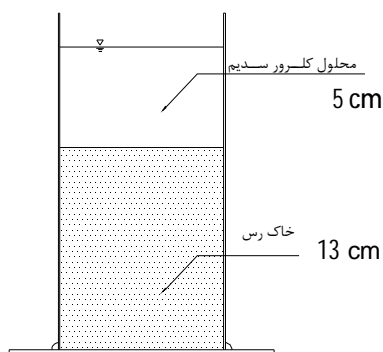
همچنین لازم است برای لایه‌های i و $i+1$ ، بقای جرم و پیوستگی غلظت در مرز لایه‌ها و در عمق (z_i) ، تامین گردد و در مرز لایه‌ها شرایط زیر برقرار شود:

$$(v_a c - qD \frac{\partial c}{\partial z})_{i|z=z_i} = (v_a c - qD \frac{\partial c}{\partial z})_{i+1|z=z_{i+1}} \quad [7]$$

$$c_i(z = z_i) = c_{i+1}(z = z_{i+1}) \quad [8]$$

جدول 1- خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها.

نام	درصد رطوبت	وزن مخصوص	چگالی ویژه (Gs)	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	نام	نوع خاک
علمی	بهینه (%)	خشک ماکزیمم (g/cm ³)		(LL) (%)	(PL) (%)	(PI) (%)		
CL	19	1/7	2/68	35/10	19/05	16/05	رس	رس
ML	21/5	1/58	2/78	-	-	-	سیلت	سیلت
عایق رسی - ژئوسینتتیک (Modulo Geobent XP)								
نوع بتونیت	درصد	شاخص تورم	وزن واحد سطح	ضریب	مقاومت	ضخامت	نوع	بتونیت
مونتوریلونایت		(ml/2g)	بتونیت در رطوبت	نفوذپذیری	کششی	(mm)	سیمی	طبیعی
	≥ 90%	≥ 27	(g/m ²)	(m/s)	(kN/m)		سیمی	طبیعی
			5000	≤ 1×10 ⁻¹¹	13	6		



شکل 1- مدل فیزیکی آزمایش انتشار مولکولی

نمونه‌های خاک در داخل لوله با رطوبتی برابر 2 الی 4 درصد بیشتر از رطوبت بهینه متراکم شده، سپس محلول آلوده روی نمونه‌های خاک ریخته شده و آزمایش انتشار مولکولی آغاز گردید. پس از شروع آزمایش در فواصل زمانی مشخص نمونه‌برداری از مخزن آلوده انجام و برای ثابت نگه داشتن ارتفاع ماده آلوده، معادل حجم نمونه برداشت شده، آب مقطر به منبع آلودگی اضافه شد. پس از طی مدت مشخص (حدود 9 روز) محلول آلوده از بالای نمونه‌ها تخلیه شده، نمونه‌ها به صورت لایه لایه و با ضخامت یکسان بریده شدند. درصد رطوبت، درجه اشباع و وزن مخصوص خشک و درنهایت درصد رطوبت حجمی هر لایه محاسبه شد. غلظت محلول لایه‌های خاک که توسط دستگاه استحصال تهیه شده بودند به همراه محلول‌های بدست آمده از منبع آلودگی با استفاده از دستگاه یون متر (مجهز به الکتروود یون کلر) اندازه‌گیری شده و نمودارهای مشاهده‌ای غلظت- زمان و غلظت- ارتفاع خاک رسم گردیدند که در ادامه نشان داده شده‌اند.

آزمایش‌های فرارفت - انتشار مولکولی

در این مرحله بعد از مشخص شدن ضرایب انتشار مولکولی خاک‌های مورد استفاده، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های فرارفت - انتشار مولکولی در گزینه‌های مختلف لاینر انجام شدند. ابتدا مدل مورد نیاز

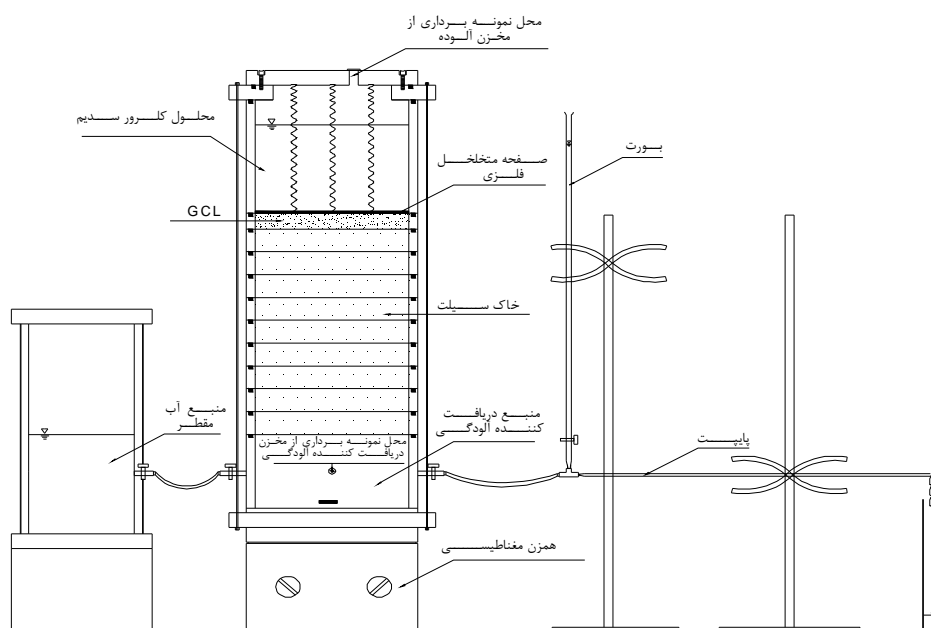
در این مطالعه ملاک ارزیابی و عملکرد لاینرهای مختلف، میزان انتقال آلودگی از میان آنها می‌باشد. مکانیزم‌های غالب در انتقال آلودگی از میان لاینرهای استفاده شده دو مکانیزم مهم انتشار مولکولی و فرارفت بودند. ابتدا آزمایش انتشار مولکولی بر روی هر یک از خاک‌ها انجام پذیرفته و ضرایب انتشار مولکولی آنها تعیین گردید. در مرحله بعد آزمایش‌های فرارفت - انتشار مولکولی برای سه گزینه لاینر انجام گردیدند. و در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه میزان آلودگی عبوری از لاینرها و رسیدن آن به سفره آب زیرزمینی که توسط یک مخزن دریافت کننده آلودگی در کف لاینرها شبیه‌سازی شده بود، لاینرها از نظر عملکرد با هم مقایسه شدند.

آزمایش‌های انتشار مولکولی

از آنجا که پارامتر ضریب انتشار مولکولی نقش مهمی در انتقال آلودگی از میان خاک‌ها دارد، ابتدا روی هر خاک دو بار آزمایش انتشار مولکولی انجام شد تا ضمن کسب اطمینان از تکرار پذیری نتایج، مقدار متوسط به عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک مورد نظر انتخاب شود. این آزمایش‌ها با استفاده از یک لوله پلی اتیلن که کف آن با یک صفحه شیشه‌ای مسدود شده بود انجام گردید. شکل 1 تصویری از آزمایش انتشار مولکولی روی نمونه خاک رسی را نشان می‌دهد. روش آزمایش روی نمونه خاک سیلتی مشابه آزمایش روی نمونه خاک رسی است. روش آزمایش انتشار مولکولی روی عایق GCL توسط بدو و فارسیمدان (2009) توضیح داده شده است.

قطعات جداگانه ساخته شد تا امکان قرارگیری هر اندازه از مواد مختلف داخل آن وجود داشته باشد. مطابق شکل 3 مخزن دریافت کننده آلودگی که در ابتدای آزمایش با آب مقطر هواگیری شده، پر شده بود؛ از یک سمت با شیر تعبیه شده روی آن به منبع آب مقطر و از سمت دیگر توسط شیر دیگری به لوله پایت متصل است. با توجه به اختلاف بار هیدرولیکی موجود بین سطح لاینر (سطح محلول در مخزن بالا) و کف لاینر (بار اتمسفریک در انتهای پایت افقی متصل به مخزن پائین) در طول آزمایش، علاوه بر وجود مکانیزم انتشار مولکولی به دلیل اختلاف غلظت، سرعت آهسته جریان رو به پائین محلول از میان لاینر یعنی مکانیزم فرارفت نیز وجود داشت.

با بررسی مدل‌های مورد استفاده در تحقیقات قبلی و با نظر گرفتن شرایط خاص تحقیق حاضر طراحی و ساخته شد (ماهوتی 1382). مدل مورد استفاده در این سری از آزمایش‌ها مطابق شکل 2 می‌باشد. در این شکل گزینه دوم لاینر، شامل یک لایه عایق GCL روی لایه سیلت دیده می‌شود. در گزینه اول به جای عایق GCL لایه رسی قرار می‌گیرد، و گزینه سوم دارای سه لایه شامل عایق GCL روی لایه رسی، روی لایه سیلتی می‌باشد. مطابق شکل 3 این مدل دارای یک مخزن دریافت کننده آلودگی در پایین، محل جاگذاری لایه‌های خاک و عایق رسی-ژئوسینتتیک (GCL) در وسط، و مخزن ماده آلوده (در این مطالعه محلول کلرور سدیم) در بالای مدل است. محل جاگذاری لایه‌ها به صورت



شکل 2- مدل فیزیکی آزمایش‌های معادل سازی فرارفت - انتشار مولکولی

ارتفاع رس 5/7 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر یک از خاک‌ها جداگانه همانند آزمایش انتشار مولکولی تهیه و در داخل مدل متراکم شدند. در مرحله راه اندازی مدل ابتدا مخزن دریافت کننده آلودگی را با آب مقطر هواگیری شده، پر کرده و بر روی آن به ترتیب خاک

آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی با استفاده از دو لایه رسی و سیلتی در این آزمایش (شماره ADI) از خاک سیلت به عنوان خاک طبیعی محلی و خاک رس به عنوان لاینر منفرد استفاده شد. ارتفاع خاک سیلت 9/35 سانتی‌متر و

با قطر داخلی مدل استفاده شد (لیک 2000). استوانه فلزی روی GCL قرار گرفته، سپس محیط دایره‌ای لبه استوانه با مقدار مشخصی آب مقطر خیس شد. این آب بعد از مدتی در داخل GCL نفوذ کرده و باعث تورم محدود این قسمت شد. این کار باعث کاهش هدر رفت بنتونیت موقع برش GCL می‌شود. در این مرحله نمونه با اعمال فشار جک بریده شده و در داخل مدل جاگذاری شد. بعد از پر کردن مخزن دریافت‌کننده آلودگی با آب مقطر هواگیری شده، به ترتیب خاک سیلت و GCL آماده شده در مدل قرار گرفتند. در نهایت مخزن آلودگی جاگذاری و چهارچوب مدل بسته شد. در این آزمایش برخلاف آزمایش قبلی بعد از هواگیری مخزن دریافت کننده، ابتدا فرصت لازم جهت پیش هیدراته شدن GCL داده شد. برای این منظور قبل از شروع آزمایش انتشار مولکولی ابتدا مخزن بالا با آب مقطر پر شده و فرصت برای هیدراته شدن داده شد. با توجه به نتایج مطالعات قبلی حدود 4 روز برای پیش هیدراته کردن GCL کافی بود (بدو و فارسیمدان 2009). در پایان این مدت مقدار تورم GCL اندازه‌گیری شده و آب مخزن بالا تخلیه شد. سپس همانند آزمایش قبلی مخزن آلودگی با محلول آلوده پر و آزمایش آغاز شد. در پایان آزمایش، غلظت محلول‌های استحصال شده از لایه‌های خاک به همراه سایر نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج مشاهده‌ای ترسیم گردیدند که در ادامه بحث خواهد شد.

آزمایش فرارفت- انتشار مولکولی با استفاده از سه لایه رسی، سیلتی، و عایق GCL

در این آزمایش (AD3) از ترکیب عایق GCL و لایه رسی به عنوان لاینر مرکب، و از خاک سیلتی به عنوان خاک طبیعی محلی استفاده شد. جاگذاری این سه لایه به این ترتیب بود که از پایین به بالا ابتدا خاک سیلتی به ارتفاع 9/3 سانتی‌متر، خاک رسی به ارتفاع 4/7 سانتی-متر و عایق GCL به ارتفاع اولیه 6/7 میلی‌متر (ارتفاع نهایی بعد از تورم به 10 میلی‌متر رسید) در مدل

سیلت و خاک رس آماده شده قرار گرفت. در نهایت مخزن آلودگی جاگذاری و چهارچوب مدل بسته شد. بعد از هواگیری مخزن دریافت کننده آلودگی، مخزن آلودگی (مخزن بالا) با محلول آلوده تا ارتفاع مشخص پر شد. در نهایت شیر رابط بین مخزن دریافت کننده آلودگی (مخزن پایین) و لوله پایت باز و آزمایش آغاز شد. در تمام طول آزمایش بطور منظم نمونه‌برداری از مخازن بالا و پایین انجام شد. بعد از اتمام آزمایش مدل باز شده و همانند آزمایش انتشار مولکولی خاک‌ها به قطعات مساوی تقسیم شدند. درصد رطوبت، درجه اشباع و وزن مخصوص خشک و در نهایت درصد رطوبت حجمی هر لایه محاسبه شد. غلظت محلول لایه‌های خاک که توسط دستگاه استحصال تهیه شده بودند، به همراه سایر نمونه‌ها با استفاده از دستگاه یون‌متر اندازه‌گیری شده و سپس نمودارهای مشاهده‌ای غلظت- زمان و غلظت- ارتفاع ترسیم گردیدند که در بخش نتایج نشان داده شده‌اند.

آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی با استفاده از دولایه شامل عایق GCL و لایه سیلتی

در این آزمایش (شماره AD2) از خاک سیلتی به عنوان خاک طبیعی محلی و عایق GCL به عنوان لاینر منفرد استفاده شد. برای جلوگیری از تورم نامتقارن GCL یک فشار سربار با استفاده از سه فتر موازی که در درپوش بالایی مدل جاگذاری شده بودند، به لاینر اعمال شد. برای یکنواخت وارد شدن فشار به GCL از یک صفحه فلزی مشبک با قطر برابر با قطر داخلی مدل و به ضخامت 1/5 میلی‌متر استفاده شد. ارتفاع خاک سیلتی 13/95 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ارتفاع عایق GCL قبل از هیدراته شدن 7/7 میلی‌متر بود که این مقدار به 11 میلی‌متر پس از هیدراته شدن رسید. این مقدار تورم GCL بسیار نزدیک به نتایج مطالعات قبلی بود (بدو و فارسیمدان 2009). برای برش و جاگذاری GCL از یک استوانه فلزی لبه تیز با قطر خارجی برابر

نتایج و بحث

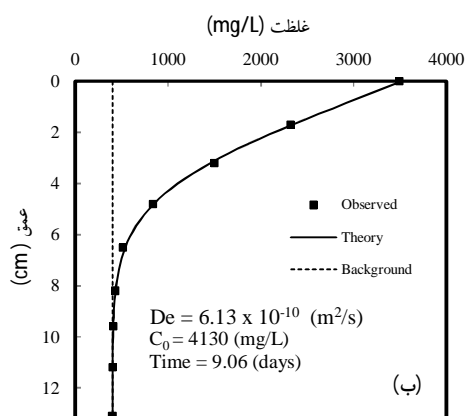
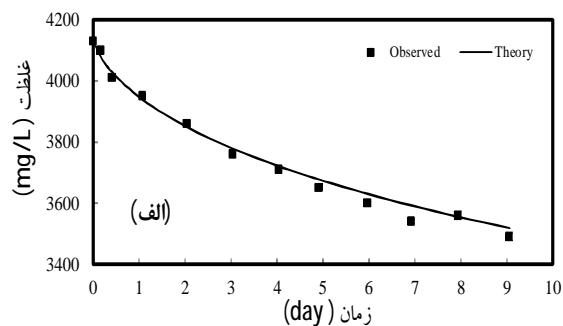
آزمایش انتشار مولکولی

نتایج تئوری غلظت-زمان و غلظت-ارتفاع خاک، توسط نرم افزار POLLUTE پیش بینی شده و نهایتاً ضریب انتشار مولکولی یون کلر در هر دو خاک با برآزش بهترین منحنی تئوریک روی نتایج مشاهده‌ای بدست آمد. در شکل 3 یک نمونه از نتایج آزمایش انتشار مولکولی خاک رس و همچنین در جدول 2 کلیه داده‌ها و نتایج بدست آمده از هر دو نوع خاک نشان داده شده است. در نهایت ضریب انتشار مولکولی یون کلر برای خاک رس برابر $6/25 \times 10^{-10} (m^2/s)$ و ضریب انتشار مولکولی کلر برای خاک سیلت برابر $8/97 \times 10^{-10} (m^2/s)$ تعیین و در آزمایش های بعدی انتشار مولکولی-فرارفت و آنالیز نتایج با استفاده از نرم افزار POLLUTE از این ضرایب استفاده شد.

جاگذاری شدند. تمامی مراحل آماده‌سازی این سه لایه و راه‌اندازی این آزمایش همانند آزمایش‌های قبلی بود. بعد از هواگیری مخزن دریافت کننده آلودگی، ابتدا فرصت پیش هیدراته شدن به GCL داده شد. در پایان این مدت مقدار تورم GCL اندازه‌گیری شد. با تخلیه آب مقطر و جایگزینی محلول آلوده به جای آن آزمایش آغاز شد. همانند آزمایشات قبلی در طول آزمایش نمونه‌برداری از مخازن بالا و پایین انجام شد. بعد از اتمام آزمایش غلظت سنجی کلیه نمونه‌ها انجام پذیرفته و نتایج مشاهده‌ای غلظت-زمان و غلظت-ارتفاع خاک ترسیم گردیدند که در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

جدول 2- داده‌های مورد استفاده و نتایج بدست آمده در آزمایش‌های انتشار مولکولی

D4-Silt	D3-Silt	D2-Clay	D1-Clay	شماره آزمایش
14	13/7	13/2	13/1	ارتفاع لایه ها (cm)
0/3 - 0/78	0/48 - 0/81	0/6 - 0/73	0/58 - 0/7	نسبت تخلخل (e)
25 - 43/56	24/71 - 44/44	20/06 - 23/94	21/2 - 24/7	درصد رطوبت وزنی (%)
83/83 - 93/58	75/34 - 93/95	75/19 - 94/04	82/35 - 100	درجه اشباع (%)
0/347 - 0/43	0/346 - 0/418	0/347 - 0/43	0/346 - 0/418	درصد رطوبت حجمی (%)
4	4/5	5	4/8	ارتفاع محلول کلرور سدیم (cm)
236	236	400	400	غلظت اولیه یون کلر در خاک (mg/l)
4090	4110	4060	4130	غلظت اولیه یون کلر در محلول آلوده (mg/l)
9/1	9/1	9/0	9/1	مدت زمان آزمایش (day)
$8/68 \times 10^{-10}$	$9/26 \times 10^{-10}$	$6/37 \times 10^{-10}$	$6/13 \times 10^{-10}$	ضریب انتشار مولکولی یون کلر (m^2/s)



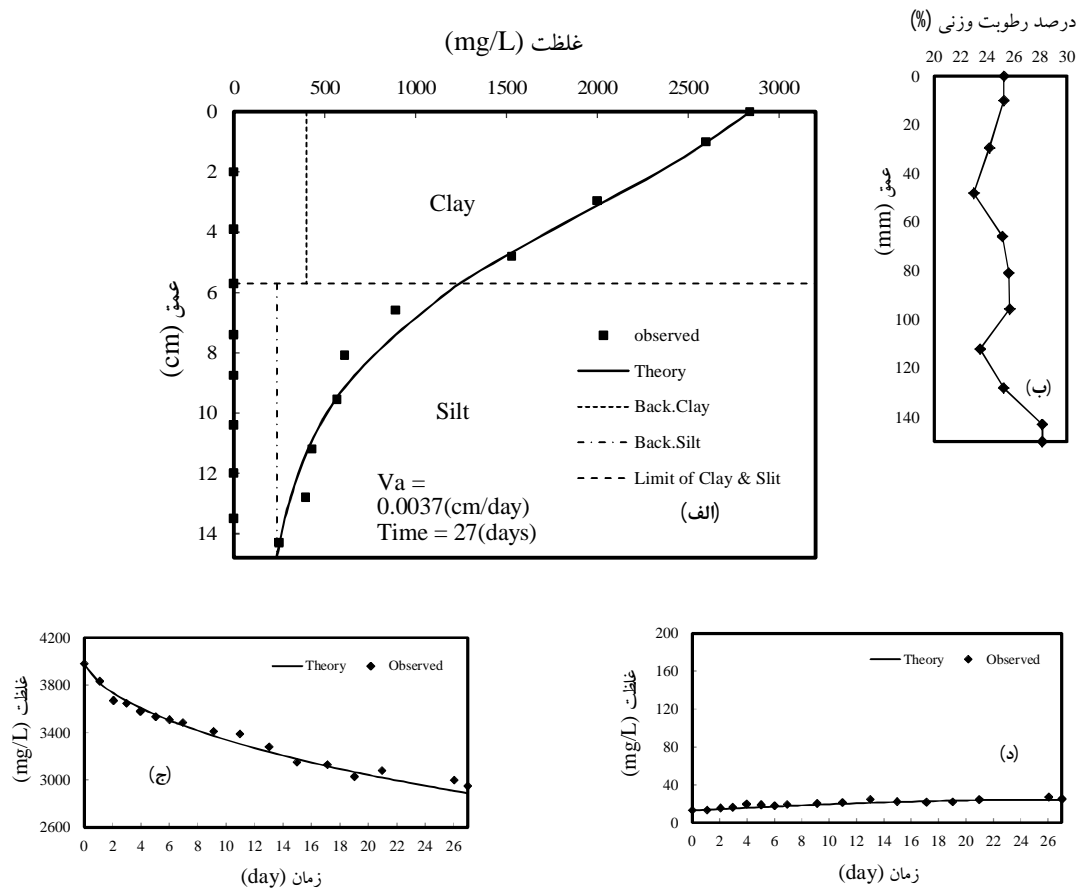
شکل 3 - (الف): نمودار غلظت - زمان منبع آلودگی، (ب): نمودار غلظت - ارتفاع، در آزمایش انتشار مولکولی روی خاک رسی.

بینی این ضریب برای سیلت، مطابق شکل 4، نتایج محاسبات تئوریک تطابق خوبی با نتایج مشاهده‌ای دارد و این نشان می‌دهد که ضرایب استفاده شده برای خاک‌ها به همراه سایر پارامترها از صحت خوبی برخوردار بوده و توانستند بخوبی رفتار مدل را پیش بینی کنند.

آزمایش‌های فرارفت - انتشار مولکولی

آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی با استفاده از دو لایه رسی و سیلتی

نتایج تئوری غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک، توسط نرم افزار POLLUTE پیش بینی شده و با نتایج مشاهده‌ای مقایسه شدند. در شکل 4 نتایج آزمایش AD1 نشان داده شده است. با استفاده از ضریب انتشار مولکولی بدست آمده برای خاک رسی و پیش-

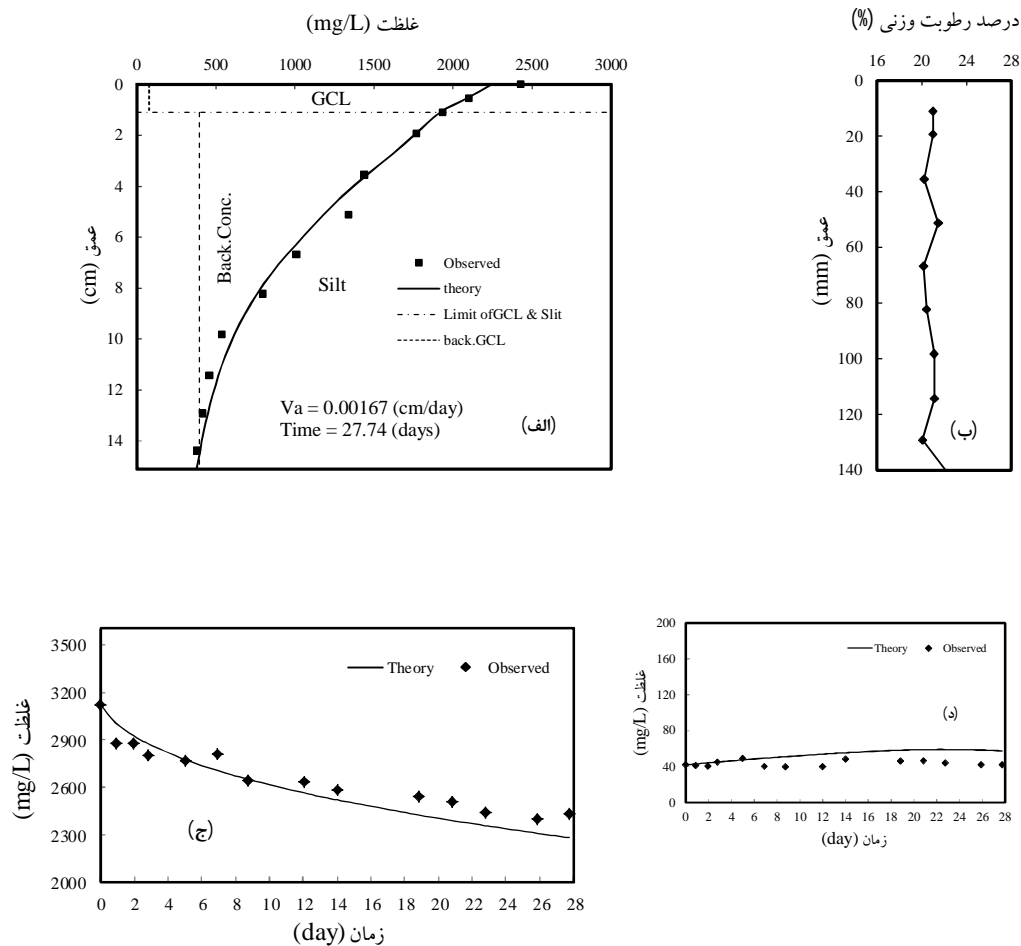


شکل 4- (الف): نمودار غلظت - ارتفاع، (ب): نمودار درصد رطوبت - ارتفاع، (ج): نمودار غلظت - زمان منبع آلودگی، (د): نمودار غلظت - زمان منبع دریافت کننده آلودگی، در آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی شامل دو لایه رسی و سیلتی (ADI)

آزمایشگاهی مدل را به همراه دقت قابل قبول محاسبات نشان داد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که ضرایب انتشار مولکولی اندازه‌گیری شده برای عایق GCL و لایه سیلتی به همراه سایر پارامترها، بخوبی قادر به پیش بینی حرکت آلودگی در این خاک‌ها با مکانیزم‌های حرکتی انتشار مولکولی و فرارفت در یک مدل مرکب دولایه‌ای می‌باشند.

آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی با استفاده از دولایه شامل عایق GCL و لایه سیلتی

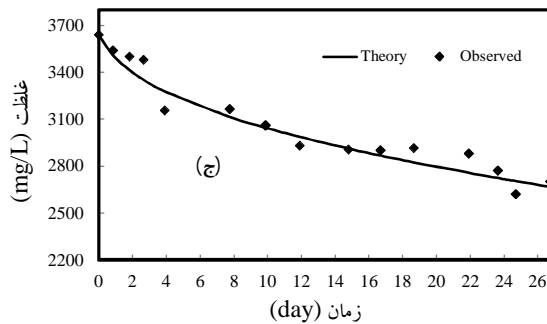
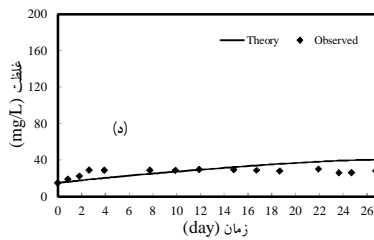
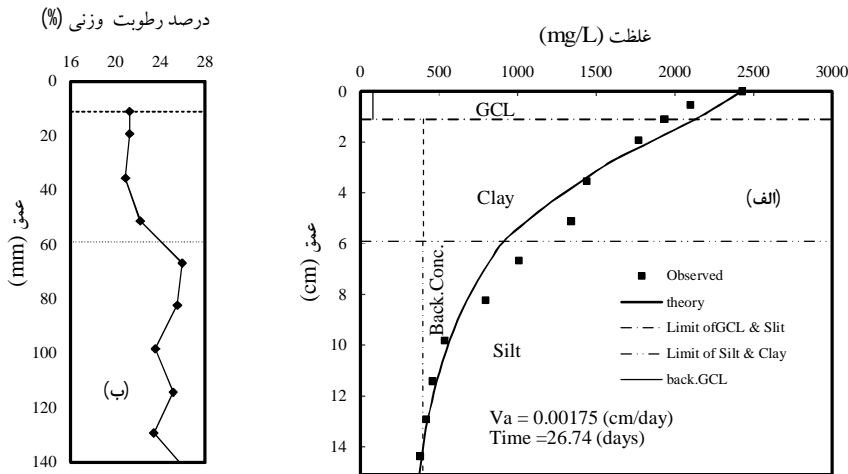
نتایج تئوری غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک، توسط نرم افزار POLLUTE پیش‌بینی و با نتایج مشاهده‌ای مقایسه شدند. در شکل 5 نتایج آزمایش AD2 نشان داده شده است. مقایسه نتایج و تطابق خوب داده‌ای مشاهده‌ای با پیش‌بینی‌های تئوریک در این آزمایش نیز رضایت‌بخش بوده و صحت رفتار



شکل 5- (الف): نمودار غلظت - ارتفاع، (ب): نمودار درصد رطوبت - ارتفاع، (ج): نمودار غلظت - زمان منبع آلودگی، (د): نمودار غلظت - زمان منبع دریافت کننده آلودگی، در آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی شامل دو لایه GCL و سیلت (AD2).

نتایج سه آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده تطابق خوب رفتار فیزیکی و تئوریک این مدل سه لایه‌ای است. در این آزمایش نیز ضرایب انتشار مولکولی قبلاً اندازه‌گیری شده بخوبی توانستند رفتار مدل مرکب سه لایه‌ای را پیش‌بینی کنند.

آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی با استفاده از سه لایه رسی، سیلتی، و عایق GCL نتایج تئوری غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک، توسط نرم‌افزار POLLUTE پیش‌بینی و با نتایج مشاهده‌ای مقایسه شدند. در شکل 6 نتایج آزمایش AD3 نشان داده شده است. در جدول 3 کلیه داده‌ها و



شکل 6- (الف): نمودار غلظت - ارتفاع، (ب): نمودار درصد رطوبت - ارتفاع، (ج): نمودار غلظت - زمان منبع آلودگی، (د): نمودار غلظت - زمان منبع دریافت کننده آلودگی، در آزمایش فرارفت - انتشار مولکولی شامل سه لایه GCL، رس و سیلت (AD3).

نتیجه‌گیری کلی

در این لایه‌ها تعیین شد. سپس گزینه‌های انتخابی لاینرها تحت شرایط انتقال انتشار مولکولی-فرارفت با وجود جریان آب آهسته داری رو به پائین از مخزن (منبع) حاوی محلول کلرورسدیم، از میان لایه‌های لاینر، و به داخل مخزن دریافت کننده آلودگی که نقش یک سفره آب زیرزمینی را بازی می‌کرد، قرار گرفتند. نتایج حاصل از این مطالعه را به شرح زیر می‌توان خلاصه نمود:

در این مطالعه سه گزینه از لایه‌های مانع انتقال آلودگی در مدفن زباله با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی از نظر هم‌ارزی مورد بررسی قرار گرفتند. گزینه‌های انتخابی شامل یک لایه رسی روی لایه سیلتی، یک لایه عایق رسی-ژئوسینتتیک روی لایه سیلتی، و یک لایه عایق رسی-ژئوسینتتیک روی لایه رسی، روی لایه سیلتی بودند. ابتدا ضریب انتشار مولکولی یون کلر

جدول 3- داده‌ها و نتایج بدست آمده در آزمایش‌های فرارفت - انتشار مولکولی

AD3-GCL/Clay/Silt			AD2-GCL/Silt		AD1-Clay/Silt		شماره آزمایش
Silt	Clay	GCL	Silt	GCL	Silt	Clay	مشخصات لایه‌ها
9/3	4/7	1	14	1	9/3	5/7	ارتفاع لایه‌ها (cm)
2/78	2/68	2/65	2/78	2/65	2/78	2/68	چگالی ویژه (Gs)
24/97	21/56		21/46		25/81	24/12	درصد رطوبت وزنی متوسط (%)
84/47	96/25		84		84	98/5	درجه اشباع متوسط (%)
0/38	0/361		0/351		0/39	0/395	درجه رطوبت حجمی متوسط (%)
0/00175			0/00167		0/0037		سرعت داریسی (cm/day)
3640			3120		3980		غلظت اولیه یون کلر در محلول آلوده (mg/l)
396	400	78	396	78	236	400	غلظت اولیه یون کلر در خاک (mg/l)

می‌توان نتیجه گرفت که کمترین میزان انتقال آلودگی در آزمایش AD2 (690 میلی‌گرم بر لیتر) اتفاق می‌افتد ولی از آنجا که غلظت اولیه منبع آلودگی در آزمایش AD2 کمتر از آزمایش‌های AD1 و AD3 می‌باشد و انتقال آلودگی در این آزمایش‌ها نیز کمتر است (به ترتیب 1030 و 940 میلی‌گرم در لیتر)، لذا می‌توان سه ترکیب لاینر استفاده شده در سه آزمایش انجام شده را از نظر عملکرد، معادل هم دانست. نتایج نشان داد که این سه گزینه لاینر از نظر کنترل (کاهش) انتقال آلودگی دارای عملکرد خوبی هستند.

4- مقایسه غلظت‌های مشاهده‌ای و نظری مدل شده نشان داد که توافق خوبی بین آنها وجود داشته و مدل نظری استفاده شده قادر است بخوبی رفتار مدل‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند.

1- انجام دو آزمایش برای هر نمونه انتخابی لاینرهای رسی و سیلتی نتایج یکسانی را برای ضریب انتشار مولکولی برای هر لاینر به دست داد که مقادیر متوسط به ترتیب $6/25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ برای لاینر رسی و $8/97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ برای لاینر سیلتی بدست آمدند. این مقادیر با مقادیر گزارش شده برای خاک‌های مشابه همخوانی دارد.

2- با توجه به این که خاک‌های مورد استفاده ریزدانه و دارای ضریب نفوذپذیری پایینی بودند، مکانیزم انتقال غالب در آزمایش‌ها انتشار مولکولی بوده و مکانیزم فرارفت نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال آلودگی ندارد.

3- در طول آزمایش‌ها، غلظت یون کلر در منبع آلودگی در آزمایش AD1 از 3980 به 2950، در آزمایش AD2 از 3120 به 2430 و در آزمایش AD3 از 3640 به 2700 (میلی‌گرم در لیتر) کاهش یافت. با مقایسه مقادیر فوق

منابع مورد استفاده

ماهوتی اع، 1382. مطالعه حرکت آلاینده‌ها از میان سیستم‌های دو و سه لایه خاک و بررسی اثر تله هیدرولیکی و زهکش ثانویه با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه.

- 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(B1): 107-118.
- Badv K and Farsimadan R, 2009. Swelling and diffusion characteristics of the experimental GCLs. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B Engineering* 33(B1): 15-30.
- Badv K and Mahooti AA, 2004. Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil systems. *Journal of Science and Technology, Transaction B* 28(B5): 559-572.
- Badv K and Mahooti AA, 2005. Chloride transport in layered soil systems with hydraulic trap effect. *Environmental Technology* 26(8): 885-897.
- Badv K and Rowe RK, 1996. Contaminant transport through a soil liner underlain by an unsaturated stone collection layer. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 416-430.
- Kemper WD and Van Schaik JC, 1966. Diffusion of salts in clay-water systems. *Proceedings Soil Science Society of America* 30: 534-540.
- Lake CB, 2000. Contaminant transport through geosynthetic clay liners and a composite liner system. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Western Ontario, Canada.
- Lake CB, MacNeill SG and Rowe RK, 2004. A GCL equivalency assessment for a proposed municipal solid waste landfill. Pp. 349-355. 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS/IAH- CNC Conference, Quebec City, Quebec, Canada.
- Lake CB and Rowe RK, 2000. Diffusion of sodium and chloride through geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 18(24): 103-131.
- Porter, LK, Kemper, WD, Jackson RD and Stewart BA, 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. Pp. 460-463. *Proceedings Soil Science Society of America* 24, Cincinnati, Ohio, U.S.A.
- Rowe RK and Badv K, 1996a. Chloride migration through clay underlain by fine sand or silt. *ASCE - Journal of Geotechnical Engineering* 122(1): 60-68.
- Rowe RK and Badv K, 1996b. Advective-diffusive contaminant migration in unsaturated coarse sand and fine gravel. *ASCE - Journal of Geotechnical Engineering* 122(12): 965-975.
- Rowe, RK and Booker JR, 1984. A novel technique for the analysis of 1-D pollutant migration. Pp. 699-709, *Proceedings of the International Conference on Numerical Methods for Transport and Coupled Problems*, London, United Kingdom.
- Rowe RK and Booker JR, 1985. 1-D pollutant migration in soils of finite depth. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 111(GT4): 479-499.
- Rowe RK and Booker JR, 1994. POLLUTE Computer Code - 1D Pollutant Migration Through a Non-Homogeneous Soil. Version 6, Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada.
- Rowe RK, Booker JR and Quigley RM, 1995. *Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. E & F N Spon (Chapman & Hall), London, p. 390.
- Rowe RK and Brachman RWI, 2004. Assessment of equivalency of composite liners. *Geosynthetics International* 4: 273-286.