ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ضایعات پودر سنگ در ساخت لایه مانع انتقال آلودگی در محل‌های دفن زباله

کاظم بدو *[۱] و عبدالله شایسته [۲]

[۱] استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

چکیده

در این تحقیق استفاده از ضایعات پودر سنگ ناشی از فرآوری سنگ در کارگاه‌های سنگبری جهت استفاده به عنوان مصالح لایه مانع انتقال آلودگی (لاینر) در محل‌های دفن زباله، در اشل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. لزوم دارا بودن نفوذپذیری کم لاینر موجب می‌شود که مکانیزم غالب انتقال آلودگی از میان لاینر، مکانیزم انتشار مولکولی (دیفیوژن) باشد. مصالح اصلی پودر سنگ مرمر بوده و از ماسه، خاک رس، و سیمان به عنوان مواد افزودنی به پودر سنگ استفاده شد. پودر سنگ و دیگر مواد افزودنی با درصدهای مختلف ترکیب و ماده حاصله در لوله‌های پلی‌اتیلن با روش تراکم استاندارد متراکم شده و آزمایش‌های انتشار مولکولی برای تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلراید روی آن‌ها انجام پذیرفت. ضرایب انتشار مولکولی به دست آمده برای مصالح ترکیبی با ضریب انتشار مولکولی توصیه شده برای لاینرهای رسی مقایسه شده و سپس ماده ترکیبی تولید شده از ۶۵٪ پودر سنگ و ۳۵٪ خاک رسی از نظر انتشار مولکولی نسبت به سایر مواد ترکیبی مناسب تشخیص داده شد. این ماده به دلیل دارا بودن مقداری کانی رسی و دارا بودن ۱۷٪ دانه‌های هم‌اندازه رس، دارای خاصیت جذب یونی نیز می‌باشد که برای لاینرها در کف محل‌های دفن زباله از نظر جذب یون برای تصفیه عناصر شیمیایی موجود در شیرابه زباله ضروری است. این ماده ترکیبی سپس برای میزان نفوذپذیری بررسی گردید. آزمایش نفوذپذیری با استفاده از دستگاه نفوذپذیری سه محوری انجام پذیرفت و ضریب نفوذپذیری $1/2 \times 10^{-10}$ m/s برای این ماده ترکیبی به دست آمد. این مقدار از ضریب نفوذپذیری در مقایسه با ضریب نفوذپذیری حداقل توصیه شده برای لاینرهای رسی متراکم در محدوده قابل قبولی قرار داشته و لذا لاینر ساخته شده از این ماده ترکیبی از نظر پدیده حرکتی فرارفت (ادوکشن) نیز مناسب است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که ترکیب حاصل از ۶۵٪ ضایعات پودر سنگ مرمر و ۳۵٪ خاک رسی به دلیل قرار گرفتن ضریب انتشار مولکولی و ضریب نفوذپذیری آن در محدوده توصیه شده برای لاینرها و همچنین قابلیت تراکم‌پذیری و عمل جذب یونی مناسب، می‌تواند به عنوان مصالح جایگزین در ساخت لاینرهای رسی در محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: محل‌های دفن زباله، لاینر رسی، ضایعات سنگبری، پودر سنگ مرمر، انتشار مولکولی، نفوذپذیری.

۱- مقدمه

عایق‌های رسی متراکم (لاینر رسی) به دلیل اقتصادی بودن و پتانسیل بالای جذب آلودگی در محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورت نایاب بودن خاک رس مواد ترکیبی مانند مخلوط بنتونیت و ماسه به عنوان مصالح لاینر در اماکن نگهداری مواد زائد جامد و مایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. Kennay و همکاران [۱] و Daniel و Wu [۲] با انجام آزمایش‌هایی ضمن ارزیابی نحوهٔ استفاده از مخلوط ماسه و بنتونیت به عنوان مصالح لاینر، ضرایب نفوذپذیری این مادهٔ ترکیبی را اندازه گرفته و با لاینرهای رسی مقایسه کردند. بدو و محله‌ای [۳] نیز این مادهٔ ترکیبی را از نظر انتشار مولکولی مطالعه کرده و ضریب انتشار مولکولی یون کلراید را در مخلوط‌های ماسه و بنتونیت اندازه گرفته و با مقادیر مشابه در لاینرهای رسی مقایسه کردند. نحوهٔ استفاده از مواد با دانه‌بندی ریز مانند خاکستر تولیدی از کوره‌ها و همچنین مواد پودری مانند میکروسیلیس[1] به عنوان مواد افزودنی به خاک رس و یا مواد دیگر، برای ساخت لاینرها، توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۷]. Kalkan و Akbulut [۴] طی آزمایش‌هایی اثر مثبت میکروسیلیس را در نفوذپذیری، فشار تورمی و مقاومت فشاری لاینرهای رسی نشان دادند. Kayabaly [۶] از زئولیت اصلاح شده با بنتونیت به عنوان مادهٔ افزودنی به رس استفاده کرده و نشان داد که از این ترکیب می‌توان برای ساخت لاینر در محل‌های دفن زباله استفاده کرد. Parshant و همکاران [۷] خاکستر پوزولانی را با خاک رس ترکیب کرده و طی

1- Silica fume

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۱/۹/۵ پذیرش ۹۲/۳/۲۵

Archive of SID
www.SID.ir

آزمایش‌هایی نشان دادند که از این ماده در ساخت لاینرها می‌توان استفاده کرد. معیارهای متعددی برای ارزیابی لاینرها از نقطه نظر کنترل انتقال آلودگی توصیه شده است [۸-۱۰]. از میان این معیارها پائین بودن ضریب نفوذپذیری و ضریب انتشار مولکولی از اهمیت بیشتری برخوردار است و لاینرهای ساخته شده از خاک رس و یا مواد ترکیبی دیگر باید برای این دو ویژگی کنترل شوند [۱۱-۱۴]. در کارگاه‌های سنگبری در هنگام بریدن سنگ‌ها به قطعات کوچک‌تر، مواد زائدی به نام پودر سنگ تولید شده که معمولاً دور ریخته می‌شوند. این مواد از نظر اندازه دانه‌ها قابل مقایسه با دانه‌های رس و سیلت بوده و قابلیت استفاده به عنوان مواد افزودنی در ساخت لاینرها را دارا هستند. مقدار تولید این مادهٔ زائد در سنگبری‌ها قابل ملاحظه است و در صورت دارا بودن توجیه فنی از نظر استفاده از آن به عنوان مادهٔ افزودنی در ساخت لاینرها، تأمین آن بدون صرف هزینهٔ اولیه بوده و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است. در این مطالعه قابلیت استفاده از پودر سنگ مرمر از زائدات سنگبری‌های شهرستان ارومیه به عنوان مواد ترکیبی افزودنی در ساخت مصالح لاینر در محل‌های دفن زباله، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مبانی نظری انتقال آلودگی از میان لاینرها

انتقال آلاینده‌ها از میان لایه‌های مانع انتقال آلودگی (لاینرها) با مکانیزم‌های حرکتی فرارفت (ادوکشن) و انتشار مولکولی (دیفیوژن)، به همراه عمل جذب و تجزیه، با معادله زیر تعریف می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

$$(\theta + \rho K_d)\frac{\partial c}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \theta v \frac{\partial c}{\partial z} - \theta \lambda c \qquad (۱)$$

در این معادله θ درجه رطوبت حجمی خاک (در خاک اشباع همان تخلخل خاک، n است)، ρ دانسیته خشک خاک (M/L^3)، K_d ضریب توزیعی یون در خاک (L^3/M، که برای یون کلر مقدار آن صفر است)، c غلظت یون در خاک در زمان t (M/L^3)، D ضریب پخش شدگی هیدرودینامیکی که از مجموع ضریب انتشار مولکولی مؤثر (D_e) و ضریب پخش‌شدگی مکانیکی (D_{md}) تشکیل شده است (L^2/T)، z عمق در خاک (L)، v سرعت جریان آب زیرزمینی ($v = v_d/n$، L/T)، و λ ثابت تجزیه (نصف عمر ماده شیمیایی /Ln2) می‌باشد. انتقال به طریق انتشار مولکولی در صورت وجود اختلاف غلظت عنصر شیمیایی بین دو نقطه از خاک (گرادیان غلظت) و در غیاب جریان آب اتفاق می‌افتد. به انتقال عناصر شیمیایی توسط جریان آب، فرارفت گفته می‌شود.

شرط مرزی در بالای لاینر که در آن ماده آلوده حاوی یون‌های شیمیایی با غلظت معین از میان لاینر رو به پائین حرکت کرده و باعث کاهش غلظت در کف لاینر و در طول زمان می‌شود، با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$c_s(t) = c_o - \frac{1}{H_f}\int_0^t f_s d\tau - \frac{q_c}{H_f}\int_0^t c_s(\tau) d\tau \qquad (۲)$$

در این معادله $c_s(t)$ غلظت ماده آلوده (یون شیمیایی معین) در بالای لاینر پس از مدت زمان t (M/L^3)، c_o غلظت اولیه یون در بالای لاینر، H_f ارتفاع معادل شیرابه حاوی یون در بالای لاینر (L)، f_s جرم یون عبور کرده در واحد سطح لاینر و در واحد زمان ($M/L^2/T$)، و q_c حجم شیرابه جمع‌آوری شده از سطح لاینر در واحد سطح و در واحد زمان ($L^3/L^2/T$) می‌باشد.

شرط مرزی در کف لاینر و در سطح تماس آن با یک محیط دریافت کننده آلودگی (مانند یک سفره آب زیرزمینی در زیر لاینر) که یون‌های شیمیائی در طی مدت زمان معین پس از عبور از لاینر به آن وارد می‌شوند، با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$c_R(t) = \int_o^t [\frac{f_R(\tau)}{h}] d\tau \qquad (۳)$$

در این معادله، $c_R(t)$ غلظت یون در سفره (در مرز بین سفره و لاینر) در زمان t ، $f_R(\tau)$ جرم وارد شده به سفره در واحد سطح و در واحد زمان ($M/L^2/T$)، و h ضخامت سفره (L) می‌باشد. اگر لاینر در کف خود با یک لایه ناتراوا (مرز غیر قابل نفوذ مانند یک لایه سنگ) در تماس باشد، جریان آب از میان لاینر برقرار نشده و در نتیجه مکانیزم حرکتی فرارفت در انتقال یون‌ها نقش نداشته و حرکت یون‌ها فقط به وسیله انتشار مولکولی مسیر خواهد بود. در این صورت معادله (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(\theta + \rho K_d)\frac{\partial c}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \qquad (۴)$$

اگر یون‌های شیمیایی با کانی‌های خاک (لایه لاینر) اندرکنش نداشته و عمل جذب و دفع یونی انجام ندهند (مانند یون کلراید که جذب خاک نمی‌شود)، و عمل تجزیه نیز وجود نداشته باشد، در این صورت معادله (۴) به این صورت نوشته می‌شود:

Archive of SID

www.SID.ir

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\,\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \qquad (۵)$$

معادله (۵) شرایط خاصی از انتقال آلودگی در خاک را نشان می‌دهد که در آن مکانیزم‌های انتقال به صورت فرارفت و پخش‌شدگی، و عمل جذب و تجزیه وجود نداشته و تنها عامل حرکت یون‌ها، عمل انتشار مولکولی خالص (Pure diffusion) است. معادله (۵) که به قانون دوم فیک (Fick's second law) معروف است، شبیه معادله تحکیم در خاک است. حل معادله (۱) با شرایط مرزی تعریف شده توسط معادلات (۲) و (۳) و حالت خاصی از آن که در قالب معادله (۵) حالت انتشار مولکولی خالص را تعریف می‌کند، توسط Rowe و Booker [۱۵ و ۱۶] ارائه شده و در کد کامپیوتری POLLUTE [۱۷] تعبیه شده است. این کد برای تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلراید در لاینرها آزمایش شده و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

در کد کامپیوتری POLLUTE [۱۷] از روش لایهٔ محدود برای آنالیزها استفاده شده است. این روش امکان آنالیز انتقال آلودگی از میان چندین لایهٔ افقی خاک را با حجم و زمان محاسبات کمتر فراهم می‌کند. بیشترین کاربرد این کد در محاسبات انتقال آلودگی از میان لایه‌های یک محل دفن زباله که یک سفرهٔ آب زیرزمینی در زیر آن قرار دارد، می‌باشد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مواد

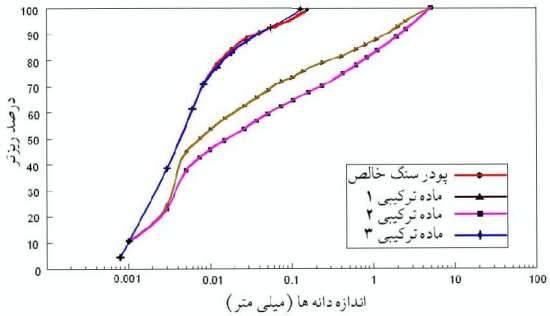
مصالح استفاده شده در این مطالعه شامل پودر سنگ مرمر به عنوان ماده اصلی، خاک رس، ماسه، و سیمان می‌باشند. پودر سنگ به عنوان یک ماده زائد از سنگبری‌های شهرستان ارومیه تهیه شد. خاک رسی از منطقه نازلوی ارومیه که یک منطقه نسبتاً غنی از خاک رس بوده و عموماً در کارگاه‌های آجرپزی مستقر در این منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد، تهیه شد. این خاک دارای دانسیتهٔ خشک $1/7\ gr/cm^3$، چگالی ویژه ۲/۶۸، حد روانی ۳۵٪، و حد خمیری ۱۹٪ می‌باشد. ماسه از نوع ریزدانه و سیمان از نوع پورتلند معمولی می‌باشد. این مصالح با درصدهای وزنی با هم مخلوط شده و سه نمونه از ترکیب آن‌ها به وجود آمد. نمونه ترکیبی نوع اول شامل ۶۷٪ پودر سنگ مرمر، ۲۸٪ ماسه، و ۵٪ خاک رس، نمونه ترکیبی نوع دوم شامل ۶۵٪ پودر سنگ مرمر و ۳۵٪ خاک رس، و نمونه ترکیبی نوع سوم شامل ۹۰٪ پودر سنگ مرمر و ۱۰٪ سیمان می‌باشد. در این ترکیبات، انتخاب درصد مواد ریزدانه (درصد خاک رس در نمونه‌های ترکیبی اول و دوم، و درصد سیمان در نمونهٔ ترکیبی سوم) بر اساس مطالعات مشابه انجام شده در گذشته توسط محققین دیگر و همچنین قضاوت مهندسی، صورت پذیرفت. بررسی مطالعات گذشته نشان داد که محدودهٔ مواد ریز دانهٔ استفاده شده برای تهیهٔ مواد مرکب، از ۵٪ الی ۴۰٪ متغیر است [۱-۷]. آزمایش‌های دانه‌بندی، چگالی ویژه، و تراکم استاندارد روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. شکل (۱) منحنی دانه‌بندی این سه نمونه ترکیبی را نشان می‌دهد. در این شکل منحنی دانه‌بندی پودر سنگ مرمر خالص نیز نشان داده شده است. برای تعیین چگالی ویژه متوسط نمونه‌های ترکیب شده، ابتدا چگالی ویژه مواد به تنهائی تعیین و سپس چگالی ویژه نمونه‌های ترکیبی محاسبه شدند.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک روی نمونه‌های ترکیبی تهیه شده با استفاده از پودر سنگ مرمر

پارامترها	پودر سنگ مرمر خالص	نمونه ترکیبی ۱	نمونه ترکیبی ۲	نمونه ترکیبی ۳
درصد و نوع مواد ترکیبی	٪۱۰۰	٪۶۷ پودر سنگ+ ٪۲۷ ماسه+٪۵ خاک رس	٪۶۵ پودر سنگ+ ٪۳۵ خاک رس	٪۹۰ پودر سنگ + ٪۱۰ سیمان
چگالی ویژه متوسط	۲/۶۶	۲/۶۵	۲/۷۰	۲/۷۲
دانسیته خشک حداکثر (kg/m^3)	۱۶۱۰	۱۷۳۰	۱۶۳۰	۱۶۸۰
رطوبت بهینه (٪)	۲۱/۵	۱۹	۲۰	۲۱

Archive of SID

www.SID.ir



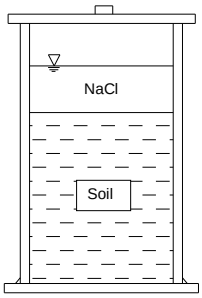
شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مواد ترکیبی تهیه شده با استفاده از پودر سنگ مرمر

۳-۲- آزمایش‌های انتشار مولکولی

آزمایش‌های انتشار مولکولی روی سه نمونه ترکیبی تهیه شده به منظور تعیین ضریب انتشار مولکولی یک عنصر شیمیائی مشخص (در این مطالعه یون کلراید) در این مواد، انجام پذیرفت. هدف از این آزمایش‌ها مقایسهٔ ضرایب دیفیوژن به دست آمده، با ضریب انتشار مولکولی توصیه شده برای یک لاینر رسی متراکم شده در یک محل دفن زباله برای همان عنصر شیمیایی است تا بدین‌وسیله بتوان تشخیص داد که کدام نمونه ترکیبی از نظر انتقال آلودگی به طریق انتشار مولکولی دارای استاندارد لازم بوده و می‌تواند در ساخت یک لاینر رسی در کف محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرار گیرد.

آزمایش‌های انتشار مولکولی با استفاده از یک لوله از جنس پلی‌اتیلن به قطر داخلی ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر که یک طرف آن با یک صفحه شیشه مسدود شده است، انجام پذیرفت. ابتدا مصالح با درصد وزنی مورد نظر به صورت خشک با هم مخلوط شده، آب به نمونه اضافه گردید طوری که نمونه ترکیبی دارای درجه رطوبتی حدود ۳٪ بیش از درجه رطوبت بهینه را دارا باشد. این مقدار درجه رطوبت برای رسیدن به حداقل ضریب نفوذپذیری در نمونه ضروری بوده و در ساخت لاینرها توصیه می‌شود. بنابراین مواد ترکیبی ۱، ۲، و ۳ پس از افزودن آب دارای درجه رطوبت حدود ۲۲٪، ۲۳٪، و ۲۴٪ بودند. سپس نمونه‌ها در داخل لوله آزمایش در سه لایه با استفاده از روش تراکم پروکتر استاندارد (ASTM D698) متراکم شدند. سطح نهائی نمونه پس از عمل تراکم در داخل لوله صاف شده و ارتفاع نهائی نمونه اندازه گرفته شد. نمونه‌هایی از مواد ترکیبی برای تعیین درجه رطوبت تهیه شده و درجه رطوبت نمونه‌ها قبل از آزمایش مشخص گردیدند. محلول کلرور سدیم با غلظت مشخص یون کلراید که قبلاً تهیه شده بود، در بالای نمونه متراکم شده و در فضای خالی بالای آن در داخل لوله ریخته شد و ارتفاع محلول بلافاصله اندازه‌گیری شد و زمان شروع آزمایش ثبت گردید. مخزن حاوی این محلول، منبع آلودگی نامیده می‌شود. مسدود بودن کف لوله حاوی نمونه متراکم شده توسط یک صفحه شیشه، مانع جریان آب (محلول کلراید سدیم) به داخل نمونه شده و در نتیجه پدیده حرکتی فرارفت (ادوکشن) اتفاق نمی‌افتد. شکل (۲) به طور مصور لوله آزمایش انتشار مولکولی را نشان می‌دهد. در طول آزمایش از منبع آلودگی به مقدار حدود ۲ میلی‌لیتر جهت تعیین غلظت کلراید و مشاهده روند تغییرات غلظت در طول زمان، نمونه‌برداری شده و معادل حجم نمونه، آب مقطر به مخزن اضافه گردید تا سطح محلول در بالای نمونه ثابت بماند. رقیق شدن محلول داخل مخزن در اثر اضافه نمودن آب مقطر در محاسبات تعیین غلظت توسط مدل نظری استفاده شده در نظر گرفته می‌شود. قبل و بعد از نمونه‌گیری محلول داخل مخزن به صورت دستی هم زده شد تا غلظت محلول یکنواخت باشد. در طول آزمایش انتشار مولکولی، یون‌های کلراید و سدیم به دلیل اختلاف غلظت (بالا بودن غلظت در منبع آلودگی بالای نمونه و کم بودن غلظت در داخل نمونه) توسط پدیده انتشار مولکولی به داخل نمونه نفوذ می‌کنند. در اثر حرکت یون‌ها به داخل نمونه در طول آزمایش به تدریج از غلظت یون‌ها در منبع آلودگی کاسته شده و غلظت آن‌ها در داخل نمونه افزایش می‌یابد. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها، دو آزمایش انتشار مولکولی روی هر نمونه انجام پذیرفت و نتایج مشابهی به دست آمد. در ادامه نتایج یک آزمایش برای هر نمونه نشان داده شده است.

در پایان آزمایش، آخرین نمونه‌برداری از منبع آلودگی انجام پذیرفته، زمان پایان آزمایش ثبت شده، و محلول بالای نمونه تخلیه می‌شود. صفحه شیشه از کف لوله جدا شده، لوله حاوی نمونه به صورت افقی روی میز قرار گرفته، توسط یک سنبه چوبی نمونه از داخل لوله خارج و توسط یک اره سیمی به قطعات ۱/۵ سانتیمتری بریده شدند.



شکل ۲- نمای مصور آزمایش انتشار مولکولی

Archive of SID

www.SID.ir

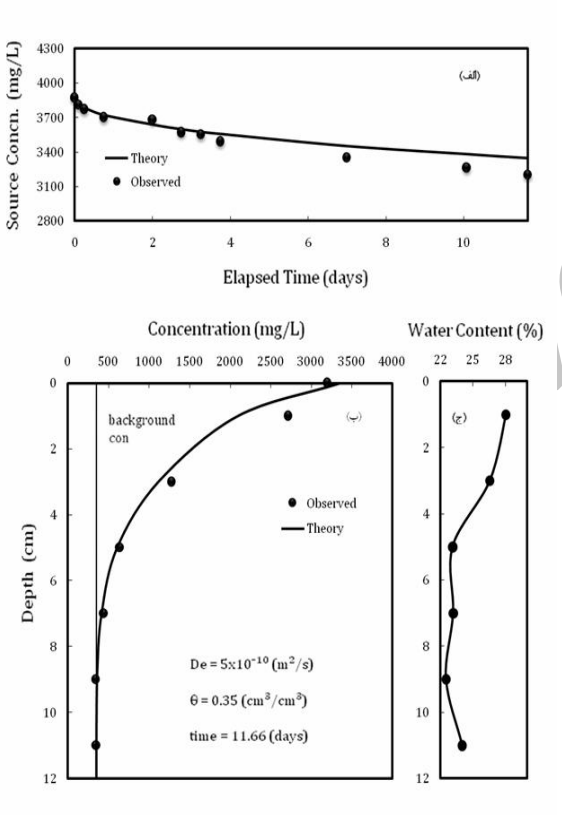
قطعات بریده شده به ترتیب شماره گذاری شده تا موقعیت ارتفاعی هر قطعه مشخص شود. برای تعیین درجه رطوبت نهائی در ارتفاع نمونه، یک نمونه برای تعیین درجه رطوبت از هر قطعه تهیه شده و درجه رطوبت در ارتفاع نمونه تعیین و پروفیل درجه رطوبت-ارتفاع برای نمونه آزمایش شده ترسیم گردید. برای تعیین غلظت یون کلراید در ارتفاع نمونه در پایان آزمایش انتشار مولکولی، آب حفره‌ای قطعات بریده شده با استفاده از دستگاه استحصال آب حفره‌ای خاک تهیه گردید. برای این کار قطعه نمونه آلوده به عنصر کلراید در داخل سیلندر مخصوص تعبیه شده و سپس با اعمال فشار تدریجی و با سرعتی کم و متناسب با خصوصیات تحکیمی نمونه، آب حفره‌ای آن استحصال می‌شود. شکل (۳) تصویر دستگاه استحصال آب حفره‌ای را نشان می‌دهد. نمونه‌های محلول آب حفره‌ای استحصال شده، متناسب با ارتفاع نمونه شماره‌گذاری شده و سپس غلظت یون کلراید برای هر نمونه تعیین و نمودار غلظت- ارتفاع مشاهده‌ای برای هر نمونه ترکیبی آزمایش شده، ترسیم گردید. اندازه‌گیری یون کلراید با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری غلظت (یون‌متر) که دارای الکترود کلراید می‌باشد، انجام پذیرفت. در پایان هر آزمایش انتشار مولکولی، سه نمودار با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای شامل (۱) نمودار غلظت-زمان منبع آلودگی، (۲) نمودار غلظت-ارتفاع نمونه، و (۳) نمودار درجه رطوبت-ارتفاع نمونه، ترسیم گردیدند. تمامی آزمایش‌ها در درجه حرارت محیط آزمایشگاه که برابر با $^{\circ}C$ ۲±۲۳ بود انجام پذیرفت. جدول (۲) پارامترها و داده‌های مربوط به آزمایش‌های انتشار مولکولی انجام پذیرفته را نشان می‌دهد. آزمایش مربوط به پودر سنگ مرمر خالص، نمونه ترکیبی ۱، نمونه ترکیبی ۲، و نمونه ترکیبی ۳، به ترتیب با DIF-0، DIF-1، DIF-2، و DIF-3 شماره‌گذاری شدند. در جدول (۲) ضرایب انتشار مولکولی به دست آمده برای نمونه‌ها نیز قید شده که در ادامه توضیح داده شده است.

شکل ۳- تصویر دستگاه استحصال آب حفره‌ای خاک

۴- نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی و بحث

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

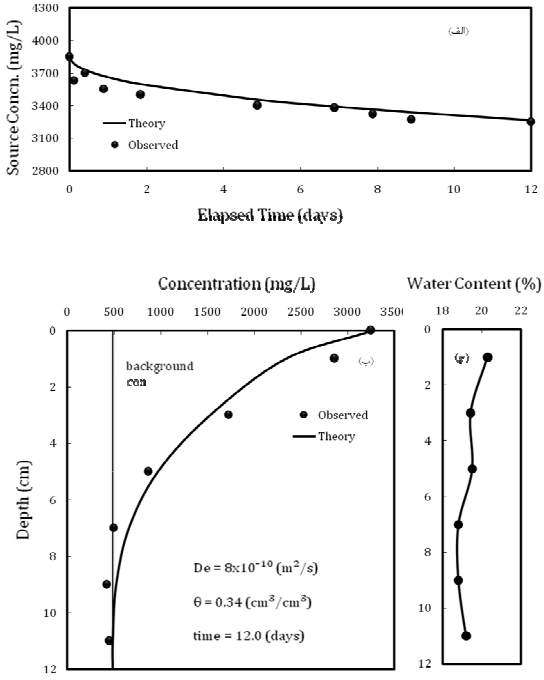
شکل‌های (۴) الی (۷) به ترتیب نتایج حاصل از آزمایش‌های انتشار مولکولی روی پودر سنگ خالص (آزمایش DIF-0)، ماده ترکیبی ۱ (آزمایش DIF-1)، ماده ترکیبی ۲ (آزمایش DIF-2)، و ماده ترکیبی ۳ (آزمایش DIF-3)، را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها نتایج حاصل از هر آزمایش انتشار مولکولی به صورت نمودارهای غلظت – زمان، غلظت – عمق، و درجه رطوبت – عمق، نشان داده شده‌اند. در این نمودارها داده‌های مشاهده‌ای به صورت دایره‌های توپر، و داده‌های پیش‌بینی شده حاصل از محاسبه توسط کد کامپیوتری POLLUTE که در ادامه توضیح داده شده است، به صورت منحنی‌های برازش شده روی داده‌های مشاهده‌ای دیده می‌شوند.



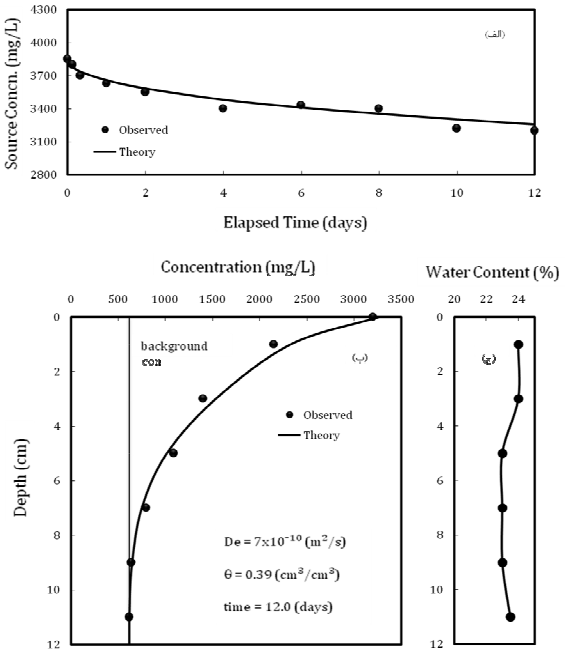
شکل ۴- نتایج مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده آزمایش انتشار مولکولی یون کلراید در پودر سنگ مرمر خالص (DIF-0): الف) تغییرات غلظت نسبت به زمان، ب) تغییرات غلظت نسبت به عمق، ج) تغییرات درجه رطوبت نسبت به عمق

Archive of SID

www.SID.ir



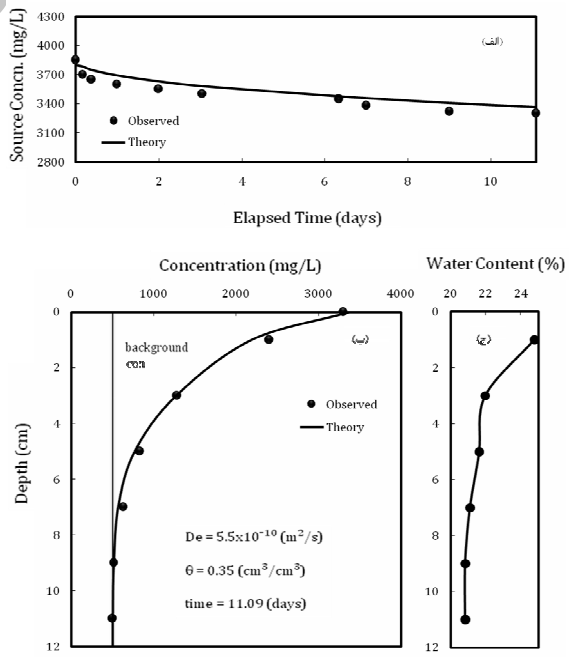
شکل ۵- نتایج مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده آزمایش انتشار مولکولی یون کلراید در ماده ترکیبی ۱ (DIF-1):
الف) تغییرات غلظت نسبت به زمان، ب) تغییرات غلظت نسبت به عمق، ج) تغییرات درجه رطوبت نسبت به عمق



شکل ۷- نتایج مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده آزمایش انتشار مولکولی یون کلراید در ماده ترکیبی ۳(DIF-3):
الف) تغییرات غلظت نسبت به زمان، ب) تغییرات غلظت نسبت به عمق، ج) تغییرات درجه رطوبت نسبت به عمق

۴-۲- نتایج عددی

برای به دست آوردن ضریب انتشار مولکولی یون کلراید در نمونه آزمایش شده، داده‌های هندسی، فیزیکی و شیمیایی آزمایش به همراه ضریب انتشار مولکولی تخمینی، به کد کامپیوتری معرفی شده، و نتایج محاسبه شده غلظت- زمان و غلظت - عمق روی نتایج مشاهده‌ای ترسیم (برازش) و با هم مقایسه می‌شوند. این کار با سعی و خطا انجام پذیرفته و در نهایت آن ضریب انتشار مولکولی که بهترین برازش بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه شده را نتیجه دهد، به عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلراید در آن نمونه انتخاب می‌شود. ضرایب انتشار مولکولی نتیجه شده از آزمایش‌ها در جدول (۲) نشان داده شده‌انـــد. مطابق جدول (۲) ضرایب انتشار مولکولی به دست آمده از آزمایش‌ها به ترتیب برای پـودر سنگ مرمر خالص ۸×۱۰^{-۱۰} m^2/s، ماده ترکیبی ۱ $۵/۳ \times ۱۰^{-۱۰}$ m^2/s، ماده ترکیبی ۲ $۵/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$ m^2/s و ماده ترکیبی ۳ ۷×۱۰^{-۱۰} m^2/s می‌باشد.



شکل ۶- نتایج مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده آزمایش انتشار مولکولی یون کلراید در ماده ترکیبی ۲ (DIF-2):
الف) تغییرات غلظت نسبت به زمان، ب) تغییرات غلظت نسبت به عمق، ج) تغییرات درجه رطوبت نسبت به عمق

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- داده‌های مربوط به آزمایش‌های انتشار مولکولی نمونه سنگ مرمر خالص و نمونه‌های ترکیبی

پارامترها	آزمایش DIF-0	آزمایش DIF-1	آزمایش DIF-2	آزمایش DIF-3
ارتفاع نمونه (cm)	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
ارتفاع محلول (cm)	۶	۶	۶	۶
درجه رطوبت حجمی متوسط نمونه (cm^3/cm^3)	۳۶	۳۴	۳۵	۳۹
درجه اشباع متوسط نمونه (%)	۹۲	۹۹	۸۸	۱۰۰
درجه رطوبت متوسط نمونه (%)	۲۳	۱۸/۹	۲۱/۵	۲۴
غلظت اولیه یون کلراید در منبع آلودگی (mg/L)	۳۸۵۰	۳۸۷۰	۳۸۵۰	۳۸۵۰
غلظت پیشینه یون کلراید در نمونه (mg/L)	۳۵۰	۴۵۰	۴۸۰	۶۰۰
دانسیته خشک نمونه (gr/cm^3)	۱/۶۱	۱/۷۶	۱/۶۳	۱/۶۵
مدت زمان آزمایش (روز)	۱۱/۷	۱۲	۱۱/۱	۱۲
ضریب انتشار مولکولی یون کلراید در نمونه (m^2/s)	$۵/۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	۸×۱۰^{-۱۰}	$۵/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۷×۱۰^{-۱۰}

۴-۳- بحث در نتایج آزمایش‌ها

مقایسه نتایج به دست آمده برای ضرایب انتشار مولکولی یون کلراید در نمونه‌های ترکیبی آزمایش شده نشان می‌دهد که ضرایب انتشار مولکولی مربوط به پودر سنگ خالص و ماده ترکیبی ۲ (۶۵٪ پودر سنگ و ۳۵٪ خاک رس) نسبت به مواد ترکیبی ۱ و ۳ کمتر است. پودر سنگ خالص در هنگام اجرای لاینر نمی‌تواند به راحتی متراکم شود و به دلیل دانه‌ای بودن و خاصیت چسبندگی ناچیز در حین اجرا خوب غلطک نمی‌خورد. لاینرها باید دارای خاصیت جذب یونی کافی باشند تا بتوانند مقداری از عناصر شیمیایی موجود در شیرابه را به خود جذب کرده و مقداری از عناصر مضر شیرابه را پالایش کنند [۱۱]. خاک‌های رسی به دلیل دارا بودن کانی‌های مناسب از خاصیت جذب یونی خوبی برخوردارند. مطابق منحنی دانه‌بندی نشان داده شده در شکل (۱)، پودر سنگ مرمر خالص دارای حدود ۲۸٪ دانه‌های هم‌اندازه رس است (دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر). لیکن این مواد فاقد کانی‌های رسی هستند و لذا از خاصیت جذب یونی برخودار نیستند. بنابر این پودر سنگ مرمر خالص به دلیل ضعف در تراکم‌پذیری و جذب یون به تنهایی نمی‌تواند به عنوان مصالح لاینر مورد استفاده قرار گیرد؛ هر چند از نظر انتشار مولکولی دارای ضریب انتشار مولکولی قابل قبولی است.

ضریب انتشار مولکولی ماده ترکیبی ۲ نسبت به دو ماده ترکیبی دیگر کمتر و در حد ضریب انتشار مولکولی یک لاینر رسی متراکم شده است [۱۲، ۱۳، ۱۸-۲۲]. این ماده دارای ۳۵٪ خاک رسی و ۱۷٪ دانه‌های هم اندازه رس است. این مقدار رس، تراکم‌پذیری این ماده را بهبود بخشیده و باعث می‌شود که در زیر غلطک به خوبی متراکم شود. ضمناً وجود این مقدار رس قابلیت جذب یونی کافی به ماده ترکیبی داده و باعث می‌شود که دارای خاصیت پالایندگی قابل قبولی از نقطه نظر جذب عناصر شیمیایی مضر باشد. استانداردها مقدار حداقل دانه‌های هم اندازه رس را برای خاک مورد استفاده در ساخت لاینرها حدود ۲۰٪ توصیه کرده‌اند [۱۱]. بنابراین ماده ترکیبی ۲ در مقایسه با پودر سنگ خالص و دو ماده ترکیبی دیگر از استاندارد کافی از نقطه نظر انتشار مولکولی و جذب یون برخوردار است.

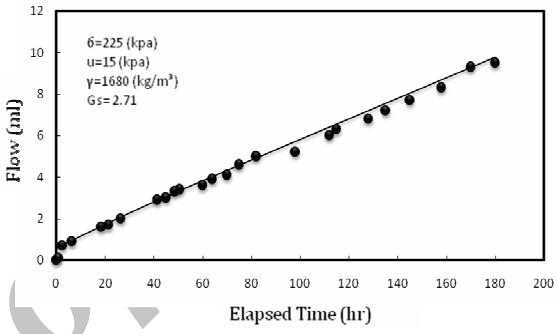
۵- آزمایش نفوذپذیری

با توجه به نتایج قابل قبول ماده ترکیبی ۲ از نظر انتشار مولکولی و دارا بودن درصد رس کافی برای عمل جذب، این ماده باید برای دارا بودن استاندارد لازم از نظر نفوذپذیری نیز کنترل شود. برای این منظور ضریب نفوذپذیری این ماده ترکیبی با استفاده از دستگاه نفوذپذیری سه محوری [۲۳] و روش استاندارد ASTM D5084 [۲۴] اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، دو نمونه مشابه از ماده ترکیبی ۲ به طور هم‌زمان مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور مشابه بودن شرایط تنشی نمونه‌ها در آزمایش نفوذپذیری با شرایط تنشی صحرایی، تنش کل وارده به اطراف نمونه ۲۲۵ kPa و فشار آب حفره‌ای ۱۵ kPa بود. شکل (۸) نمودار جریان-زمان را برای یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودار دبی جریان آب عبور کرده از نمونه به دست آمده و سپس با استفاده از فرمول

Archive of SID

www.SID.ir

دارسی Q=kiA و با معلوم بودن گرادیان هیدرولیکی اعمال شده بر نمونه در حین آزمایش و سطح مقطع نمونه، ضریب نفوذپذیری ماده ترکیبی ۲ برابر با $۱/۲ \times ۱۰^{-۱۰}$ m/s به دست آمد. این مقدار از ضریب نفوذپذیری در محدوده توصیه شده برای لاینرهای رسی متراکم قرار دارد [۱۲، ۲۵، ۲۶]. محدودهٔ توصیه شده برای ضریب نفوذپذیری لاینرهای رسی مقدار $۱/۲ \times ۱۰^{-۱۰}$ m/s و یا کمتر است. نتایج آزمایش نفوذپذیری روی ماده ترکیبی ۲ نشان داد که این ماده دارای نفوذپذیری قابل قبول برای جلوگیری از حرکت آلاینده‌ها به همراه جریان آب و به طریقه پدیده حرکتی فرارفت (ادوکشن) می‌باشد.



شکل ۸- منحنی جریان- زمان در آزمایش نفوذپذیری سه محوری روی نمونه ترکیبی ۲

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بررسی قابلیت استفاده از ضایعات پودر سنگ مرمر ناشی از فراوری سنگ در سنگبری‌های شهرستان ارومیه، به عنوان ماده افزودنی به سایر مصالح طبیعی همچون خاک رس، ماسه، و سیمان در ساخت لاینر در محل‌های دفن زباله، انجام پذیرفت. سه نوع ماده ترکیبی شامل پودر سنگ مخلوط با ماسه و خاک رس (ترکیب ۱)، پودر سنگ مخلوط با خاک رس (ترکیب ۲)، و پودر سنگ مخلوط با سیمان (ترکیب ۳) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. استانداردها میزان معینی از ضریب انتشار مولکولی و ضریب نفوذپذیری را برای لاینرهای ساخته شده از خاک‌های رسی توصیه می‌کنند. لذا مواد ترکیبی تهیه شده، ابتدا از نظر انتشار مولکولی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان دادند که پودر سنگ خالص و ماده ترکیبی ۲ که شامل ۶۵٪ پودر سنگ و ۳۵٪ خاک رس بود دارای ضریب انتشار مولکولی کمتری نسبت به سایر ترکیبات است. ضریب انتشار مولکولی ماده ترکیبی ۲ برابر با $۵/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$ m^2/s می‌باشد که این مقدار در حد ضریب انتشار مولکولی لاینرهای رسی متراکم شده است. ترکیب دانه‌بندی این ماده ترکیبی دارای ۱۷٪ دانه‌های هم اندازه رس (کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر) است که در محدوده توصیه شده برای خاک‌های رسی مورد استفاده برای لاینرها است. پودر سنگ خالص علی‌رغم دارا بودن ضریب انتشار مولکولی کم، به تنهائی، به دلیل مشکلات تراکم‌پذیری و عدم دارا بودن کانی‌های رسی برای جذب عناصر آلاینده در خود، نمی‌تواند در ساخت لاینرها مورد استفاده قرار گیرد. لیکن ماده ترکیبی ۲ به دلیل دارا بودن ۳۵٪ خاک رسی در ترکیب خود و ۱۷٪ دانه‌های هم اندازه رس (به همراه ۶۵٪ درصد پودر سنگ)، دارای قابلیت تراکم‌پذیری و عمل جذب مناسب می‌باشد. این ماده برای کنترل میزان نفوذپذیری، تحت آزمایش نفوذپذیری سه محوری قرار گرفته و ضریب نفوذپذیری $۱/۲ \times ۱۰^{-۱۰}$ m/s را نتیجه داد. این مقدار ضریب نفوذپذیری کمتر از مقدار حداقل توصیه شده برای لاینرهای رسی یعنی ۱×۱۰^{-۹} m/s می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که ترکیب حاصل از ۶۵٪ ضایعات پودر سنگ مرمر و ۳۵٪ خاک رسی به دلیل قرار گرفتن ضریب انتشار مولکولی و ضریب نفوذپذیری آن در محدوده توصیه شده برای لاینرها و همچنین قابلیت تراکم‌پذیری و عمل جذب یونی مناسب، می‌تواند به عنوان مصالح جایگزین در ساخت لاینرهای رسی در محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرار گیرد.

۷- مراجع

[1] Kennay, T. C., Van Veen, V. A., Swallow, M. A., Sungalia, M. A., "Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-and Mixtures", Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29, 638-640.

[2] Daniel, D. E., Wu, Y. K., "Compacted Clay Liners and Covers for Sites", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119 (2), 223-237.

[۳] بدو، ک.، محله‌ی، ح.، "بررسی عوامل مؤثر بر میزان انتقال آلودگی و تعیین ضریب انتشار مولکولی در لاینرهای ماسه بنتونیتی"، ششمین کنفرانس ملّی هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۱۳۸۶، صفحات M4-81 الی M4-88.

[4] Kalkan, E., Akbulut, S., "The Positive Effects of Silica Fume on the Permeability, Swelling Pressure and Compressive Strength of Natural Clay Liners", Engineering Geology, 2004, 73, 145-156.

Archive of SID

www.SID.ir

[5] Akbulut, S., "Improvement of Geotechnical Properties of Granular Soil by Grouting", PhD Thesis, Technical University of Istanbul, Istanbul, Turkey, 1999.

[6] Kayabaly, K., "Engineering Aspects of a Noval Landfill Liner Material: Bentonite-Amended Natural Zeolite", Engineering Geology, 1997, 122, 105-114.

[7] Prashant, J. P., Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., "Pozzolanic Fly Ash as a Hydraulic Barrier in Landfills", Engineering Geology, 2001, 60, 245-252.

[8] Katsumi, T., Benson, C. H., Foose, G. J., Kamon, M., "Performance-Based Design of Landfill Liners", Engineering Geology, 2001, 60, 139-148.

[9] Bouazza, A., "Geosynthetic Clay Liners", Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20, 3-17.

[10] Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., Lin, L., "Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-Standard Liquids", Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18, 133-161.

[11] Rowe, R. K., Booker, J. R., Quigley, R. M., "Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities", E & F N Spon (Chapman & Hall), London, 1995, P 390.

[12] Rowe, R. K., "Liner Systems", Chapter 25 of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, Kluwer Academic Publishing, Norwell, USA., 2001, pp 739-788.

[13] Shackelford, C. D., Daniel, D. E., "Diffusion in a Saturated Soil, II. Results for Compacted Clay", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117, 485-505.

[14] King, K. S., Quigley, R. M., Fernandez, F., Reades, D. W. Bacopoulos, A. "Hydraulic Conductivity and Diffusion Monitoring of the Keele Valley Landfill Liner, Maple, Ontario", Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30, 124-134.

[15] Rowe, R. K., Booker, J. R., "1-D Pollutant Migration in Soils of Finite Depth", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111 (GT4), 479-499.

[16] Rowe, R. K., Quigley, R. M., Brachman, R. W. I., Booker, J. R., "Barrier Systems for Waste Disposal", 2nd edition Spon Press, London, UK., 2004.

[17] Rowe, R. K., Booker, J. R., "POLLUTE v.6., 1D Pollutant Migration Through a Non-Homogeneous Soil", Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada, © 1983, 1990, 1994.

[18] Rowe, R. K., Badv, K., "Chloride Migration Through Clayey Silt Underlain by Fine Sand or Silt", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122, 60-68.

[19] Badv, K., Rowe, R. K., "Contaminant Transport through a Soil Liner Underlain by an Unsaturated Stone Collection Layer", Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33, 416-430.

[20] Rowe, R. K., Caers, C. J., Booker, J. R., Crooks, V. E., "Pollutant Migration through Clay Soils", The 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1985, pp 1293-1298.

[21] Rowe, R. K., Caers, C. J., Barone, F., "Laboratory Determination of Diffusion and Distribution Coefficients of Contaminants using Undisturbed Soil", Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25, 108-118.

[22] Rowe, R. K., Caers, C. J., Reynolds, G., Chan, C., "Design and Construction of Barrier System for the Halton Landfill", Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37, 662-675.

[23] ELE International Inc. "Operating Instructions for Tri-Flex 2 Permeability Test System", ELE Inc., UK, 1994.

[24] ASTM, D5084, "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials using a Flexible Wall Permeameter", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1997.

[25] Mitchell, J. K., Hooper, D. R., Campanella, R. G., "Permeability of Compacted Clay", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering 1965, 91, (SM4) 41-65.

[26] Olson, R. E., Daniel, D. E., "Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine Grained Soils, Permeability and Groundwater Contaminant Transport", ASTM STP, 746, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1981, pp 18-64.

Archive of SID

www.SID.ir

EXTENDED ABSTRACT

Laboratory Investigation of the Use of Rock Flour Residue for the Construction of Landfill Liner

Kazem Badv*, Abdollah Shayesteh

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia 15311-57561, Iran

Received: 26 November 2012; **Accepted:** 15 Jun 2013

Keywords:
Landfill, Liner, Marble rock flour, Diffusion, Hydraulic conductivity

Archive of SID

1. Introduction

The use of marble rock flour residue was investigated in the laboratory for the potential use as a landfill liner material. The clayey soil, sand, and cement were used as the additives. The rock flour and the additive material were mixed, compacted, and tested for diffusion and the hydraulic conductivity. The obtained diffusion coefficients were compared with the recommended diffusion coefficient for a compacted clayey liner. The comparison showed that the mixed material containing 65% rock flour and 35% clayey soil is acceptable with regard to diffusive transport mechanism compared to other mixed materials. The hydraulic conductivity was determined by the flexible wall triaxial hydraulic conductivity apparatus and the value of 1.2×10^{-10} m/s was obtained for this mixed material. This amount of hydraulic conductivity is in the range of values recommended for the compacted clayey liners and therefore this material is acceptable in terms of advective transport. The results showed that the diffusion coefficient and the hydraulic conductivity of the compacted mixed material containing 65% marble rock flour and 35% clayey soil are in the range of the recommended values for the compacted clayey liners.

2. Methodology

2.1. Materials and methods

The marbel rock flour, clayey soil, sand, and cement were used as the materials for this study. These materials were mixed in different percentages to obtain three types of mixed material. The type 1 mix included 67% rock flour, 27% sand, and 5% clayey soil. The type 2 mix included 65% rock flour and 35% clayey soil. The type 3 mix included 90% rock flour and 10% cement. The 100% pure rock flour was also tested. The material were compacted in a polyethylene tube and were tested for chloride ion diffusion coefficient. The mixed material type 2 was tested for the hydraulic conductivity.

2.2. Theoretical modeling

The program POLLUTE [1] was used for the prediction of the chloride diffusion coefficient in the tested material based on the observed chloride concentrations data. The following diffusion coefficients were obtained: 5.3×10^{-10} m^2/s for pure rock flour, 8×10^{-10} m^2/s for type 1 mix, 5.5×10^{-10} m^2/s for type 2 mix, and 7×10^{-10} m^2/s for type 3 mix.

* Corresponding Author
E-mail addresses: k.badv@urmia.ac.ir (Kazem Badv), a.shayesteh@urmia.ac.ir (Abdollah Shayesteh)

www.SID.ir

3. Results and discussion

3.1. Diffusion

The comparison of the results for chloride diffusion coefficients showed that the mix material type 2 has the lowest diffusion coefficient. This material has 30% clayey soil which gives the mixture enough absorption capacity as a liner material [2]. Thus, type 2 mix material is found to be suitable as a liner material in the landfill applications compared to two other mixed material. Fig. 1 shows the observed and predicted concentration profiles for type 2 mix material.

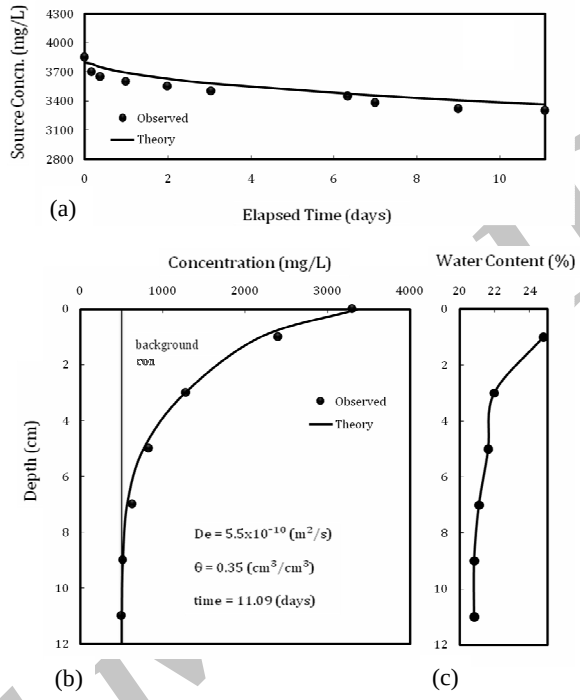


Fig. 1. Observed and predicted results of diffusion test conducted on type 2 mix material: (a) The change of chloride concentration with time, (b) The change of chloride concentration in depth, (c) The change of moisture content in depth

3.2. Hydraulic conductivity

The type 2 mix material was tested for the hydraulic conductivity using the flexible wall hydraulic conductivity apparatus. The hydraulic conductivity value of 1.2×10^{-10} m/s was obtained for this material.

4. Conclusions

The type 2 mix which included 65% rock flour and 35% clayey soil materials resulted in a reasonable low diffusion coefficient of 5.5×10^{-10} m^2/s which is in the range of the reported diffusion coefficients for the compacted landfill liner material. The resulted hydraulic conductivity of 1.2×10^{-10} m/s for this mix material is also acceptable and is in the range of the standard value for the compacted landfill liner material. Thus, the type 2 mix is recommended as an alternative liner material for solid waste landfill liner applications.

5. References

[1] Rowe, R. K., Booker, J. R., "POLLUTE v.6., 1D Pollutant Migration Through a Non-homogeneous Soil", Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada, © 1983, 1990, 1994.

[2] Rowe, R. K., Booker, J. R., Quigley, R. M., "Clayey Barrier Systems for Waste Eisposal Facilities", E & F N Spon (Chapman & Hall), London, 1995, p 390.

Archive of SID

www.SID.ir