

شبیه سازی سیستمهای تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی در مدفن زباله با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی یک بعدی سه لایه‌ای

کاظم بدو^{1*}، بهزاد عیسی زاده²

1- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

2- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

* ارومیه، صندوق پستی 165

k_badv@mail.urmia.ac.ir

چکیده- نقش سیستمهای زهکش نیمه‌اشباع و کنترل هیدرولیکی در مدفن‌های مهندسی - بهداشتی زباله، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی یک بعدی سه لایه‌ای شبیه سازی شد. در مدل مورد مطالعه بترتیب از بالا به پایین، منبع حاوی محلول کلرورسدیم به عنوان مخزن آلودگی، لایه متراکم شده سیلت اول به عنوان لایه مانع¹ اولیه، لایه ماسه‌ای درشت دانه به عنوان لایه زهکش ثانویه و یا لایه کنترل هیدرولیکی؛ لایه سیلت دوم به عنوان لایه مانع ثانویه و در انتها مخزن آب به عنوان سفره آب زیرزمینی. در دو آزمایش اول، مدل سیستمهای زهکش ثانویه و تله هیدرولیکی طبیعی (حرکت رو به بالای جریان آب در لایه سیلت دوم) شبیه سازی شد. در این حالت، انتقال آلودگی از میان لایه سیلت اول به صورت فرارفت² و نفوذ ملکولی³ رو به پایین و انتقال از میان لایه سیلت دوم به صورت نفوذ ملکولی رو به پایین و فرارفت رو به بالا انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که به کارگیری سیستم تله هیدرولیکی طبیعی در کاهش انتقال آلودگی به مخزن پایین (سفره آب زیرزمینی) مؤثر است. در آزمایش سوم، مدل سیستمهای تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی (حرکت رو به بالای آب از مخزن پایین تا مخزن آلودگی بالا) و در آزمایش چهارم، مدل فقط سیستم تله هیدرولیکی مهندسی (حرکت جریان آب در لایه سیلت اول رو به بالا و در لایه سیلت دوم رو به پایین) را شبیه سازی کرد. نتایج این آزمایشها نشان داد که سیستمهای تله هیدرولیکی در کاهش انتقال آلودگی نقش مؤثری داشته و سیستم تله هیدرولیکی مهندسی نیز از انتقال آلودگی به مخزن پایین به طور چشمگیری جلوگیری کرده و انتقال بطریقه انتشار مولکولی را نیز تضعیف می کند. در تمامی آزمایشها غلظت یون کلر در لایه‌های سیلتی و ماسه‌ای و همچنین در مخازن بالا و پایین تعیین شد و داده‌های مشاهده شده با داده‌های تئوری به دست آمده از برنامه کامپیوتری POLLUTE-V6 مقایسه شد. نتایج نشان داد که بین داده‌های مشاهده شده و تئوری تطابق خوبی وجود دارد.

کلید واژگان: انتقال آلودگی، مدفن زباله، انتشار ملکولی، فرارفت، تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی.

1. Liner
2. Advction
3. Diffusion

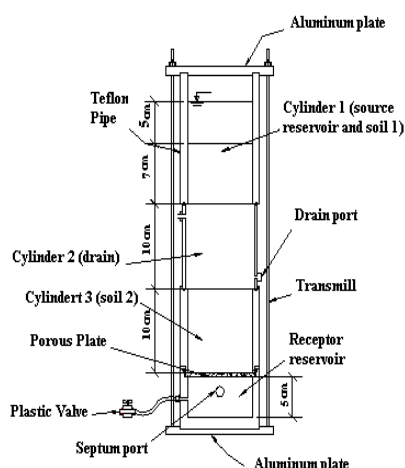
1- مقدمه

بعضی از مدفن‌های پیشرفته دفن زباله با استفاده از سیستم لایه‌ای چندگانه شامل لایه‌های مانع رسی متراکم شده اولیه و ثانویه (در بعضی موارد لایه‌های مانع مرکب رسی همراه با ژئوممبرین)، با لایه‌های درشت دانه به عنوان سیستم جمع‌آوری شیرابه ثانویه یا لایه کنترل هیدرولیکی ساخته می‌شوند. سازوکارهای حرکتی مختلفی در حرکت عناصر آلاینده در خاک نقش دارند. مهمترین سازوکار، نفوذ ملکولی (حرکت بر اثر پتانسیل غلظت) و فرارفت (حرکت بر اثر پتانسیل هیدرولیکی) است (Rowe et al., 1995). وظیفه لایه‌های مانع رسی، کاهش انتقال آلودگی به روش فرارفت و نفوذ ملکولی به آبهای زیرزمینی است. سیستم جمع‌آوری شیرابه ثانویه معمولاً از مصالح درشت دانه تشکیل شده و انتظار داریم که این لایه به صورت نیمه اشباع باقی بماند و آلودگی عبور کرده از لایه‌های بالا، باید از این ناحیه عبور کند (Badv and Rowe, 1996). در بسیاری از شرایط هیدروژئولوژیک در زیر محل‌های دفن زباله، سازوکارهای فرارفت و نفوذ ملکولی هر دو به طور هم‌جهت عامل حرکت عناصر شیمیایی به لایه‌های پایین‌تر خاک و سپس به داخل سفره‌های آب زیرزمینی هستند. لکن در صورت وجود سفره‌های تحت فشار (شرایط آرتزین) و سطح آب زیرزمینی بالا در زیر محل‌های دفن زباله، جریان آب زیرزمینی می‌تواند به طرف بالا و به داخل محل دفن برقرار شده و در نتیجه پدیده فرارفت در جهت بالا و مخالف جهت پدیده نفوذ ملکولی که همواره در جهت پایین (به طرف سفره آبدار) است، برقرار شود. به این حالت، پدیده تله هیدرولیکی طبیعی گفته می‌شود (Badv and Abdolalizadeh, 2003) و (Badv and Mahooti, 2004). در صورت برقرار شدن این وضعیت، سازوکار فرارفت از مجموع عوامل حرکتی حذف شده و سایر سازوکارها (مانند نفوذ ملکولی) عامل حرکت عناصر به طرف سفره‌های آب زیرزمینی می‌شوند.

معمولاً هر دو سیستم جمع‌آوری شیرابه ثانویه و تله هیدرولیکی طبیعی موجب کنترل انتقال آلودگی به آبهای زیرزمینی می‌شود (Rowe et al., 2000). در بعضی موارد ممکن است لایه جمع‌آوری شیرابه ثانویه به عنوان لایه کنترل هیدرولیکی عمل کند. در این صورت از لایه آبدار تا سیستم جمع‌آوری شیرابه اولیه جریان رو به بالا خواهد بود. لکن ممکن است محل دفن زباله دارای فشار آرتزین نباشد. در این حالت می‌توان با استفاده از لایه دانه‌ای بین دو لایه مانع (لایه کنترل هیدرولیکی) و اعمال پتانسیل آب در آن، موجب ایجاد جریان رو به بالا در لایه مانع اولیه و جریان رو به پایین در لایه مانع ثانویه شد. در این حالت شرایط تله هیدرولیکی مهندسی به وجود می‌آید. در این مقاله تأثیر سیستم‌های تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی بر کاهش انتقال آلودگی در سفره آب زیرزمینی، با استفاده از مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی بررسی شده است.

2- مشخصات خاکهای مورد استفاده در آزمایشها

سه نوع خاک به نام خاک سیلت (1) (ML1)، سیلت (2) (ML2) و ماسه درشت دانه یکنواخت (SU) در آزمایشها استفاده شد. غلظت اولیه یون کلر در خاک، که از این پس غلظت پیشینه خاک¹ نامیده خواهد شد، در خاک ریزدانه اول، در حد بالایی بود. ابتدا در آزمایش ATH-1 از این خاک استفاده شد. در بقیه آزمایشها (ATH-2,3,4) برای کاهش تأثیر غلظت پیشینه، از خاک ریزدانه دیگری با غلظت پیشینه پایین استفاده شد. خاک ماسه‌ای درشت دانه برای شبیه‌سازی لایه زهکش به صورت نیمه اشباع یا لایه کنترل هیدرولیکی به صورت اشباع به کار گرفته شد. خاکهای ریز دانه از محل دفن زباله ارومیه واقع در منطقه نازلو تهیه شد. این خاکها بعد از خشک شدن، خردشده و از الک شماره 4 عبور داده



شکل 1 مدل آزمایشگاهی فرارفت - نفوذ ملکولی برای بررسی انتقال آلودگی از میان سه لایه خاک

قطر داخلی این استوانه 8/9 سانتی متر و دقیقاً برابر با قطر داخلی استوانه‌های پلی اتیلنی است. دو سوراخ در پایین و بالای این استوانه وجود دارد. سوراخ پایین برای زهکشی به کار رفته و سوراخ بالایی برای ورود هوا و ایجاد فشار اتمسفری در لایه زهکش است. کل سیستم مدل توسط 4 میله فولادی و صفحات آلومینیومی به هم بسته و آب‌بندی می‌شود. در محل اتصال لوله‌ها و نشیمنگاه دیسک متخلخل (از اورینگ برای آب‌بندی استفاده شد.

4- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایه خاک سیلتی و زهکش نیمه اشباع میانی (جهت حرکت در لایه سیلتی دوم رو به بالا - سیستم تله هیدرولیکی طبیعی)

با استفاده از مدل ساخته شده دو آزمایش مختلف بر روی دو لایه خاک سیلتی ولایه زهکش ماسه‌ای در میان دو لایه سیلتی انجام شد. این آزمایشها ATH-1 و ATH-2 نام‌گذاری شد که بترتیب 27 روز و 22 روز به طول انجامید. شکل 2 مدل فیزیکی آزمایشها را نشان می‌دهد.

شده‌اند. سپس در تمام آزمایشها با درجه رطوبت 2 تا 4 درصد بیشتر از درجه رطوبت بهینه متراکم شدند (Mitchel, 1993). مشخصات فیزیکی خاکهای مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

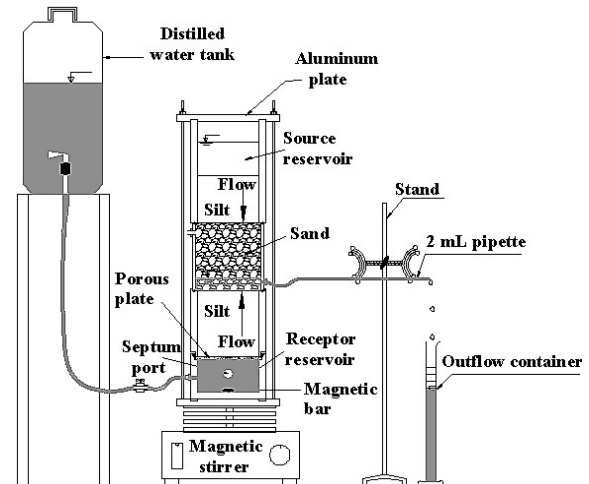
جدول 1 مشخصات فیزیکی خاکهای مورد استفاده در آزمایشها

ویژگی	سیلت (1)	سیلت (2)	ماسه درشت دانه
حد روانی (%)	18	18/2	-
حد خمیری (%)	13	14/3	-
نشانه خمیری (%)	5	4/9	-
چگالی ویژه	2/68	2/68	2/84
رطوبت بهینه (%)	9/9	8/2	-
چگالی ماکزیمم (gr/cm ³)	2/1	2/125	-
ضریب نفوذپذیری (m/s)	-	-	1/52 * 10 ⁻²

3- مدل آزمایشگاهی فرارفت - نفوذ مولکولی با سه لایه خاک

برای مدل‌سازی شرایط هیدروژئولوژیک متشکل از دو لایه مانع و یک لایه زهکش ثانویه یا لایه کنترل هیدرولیکی، مدل آزمایشگاهی مطابق شکل 1 طراحی و ساخته شد. در این مدل بترتیب از بالا به پایین، محلول کلرورسدیم به منزله شیرابه زباله در کف مدفن، لایه‌های خاک ریزدانه اول و دوم به منزله لایه‌های مانع و لایه دانه‌ای در میان دو لایه مانع به عنوان لایه زهکش ثانویه یا لایه کنترل هیدرولیکی، و در زیر لایه خاک ریز دانه، مخزن دریافت کننده آلودگی، یک سفره آب زیرزمینی در زیر لایه‌های خاک را شبیه‌سازی می‌کنند. میان دو استوانه مدل، استوانه دیگری به ارتفاع 10 سانتی متر اضافه شد که این استوانه محفظه لایه زهکش ثانویه یا لایه کنترل هیدرولیکی است.

لایه فراهم شود. یک مخزن حاوی آب مقطر به مخزن دریافت کننده آلودگی متصل شد تا پتانسیل هیدرولیکی رو به بالا در این لایه ایجاد کند. در این مرحله، محلول که قبلاً غلظت یون کلر آن مشخص شده در داخل مخزن بالا روی لایه سیلت اول به ارتفاع 5 سانتیمتر ریخته شد. بلافاصله پس از این مرحله، نمونه‌گیری از مخازن بالا و پایین انجام می‌شود و این عمل در طول مدت آزمایش به طور روزانه انجام می‌شود. شکل 2 مدل آماده شده را در حین انجام آزمایش نشان می‌دهد.



شکل 2 مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایه مانع و زهکش نیمه‌اشباع میانی با سیستم تله هیدرولیکی طبیعی

در انتهای آزمایش، محلول مخزن بالا تخلیه شده و مدل باز شد. سپس استوانه بالایی به آرامی جدا شد. لایه زهکش که قبلاً توسط خطوط سیاه تا بالای قسمت اشباع در فاصله‌های مساوی تقسیم بندی شده است، به وسیله قاشق برداشته شده و در سینی‌های کوچک استیل ریخته و وزن شد. سپس لایه‌های ماسه در داخل گرمخانه قرار داده و درجه رطوبت هر لایه محاسبه شد. بعد از اینکه لایه زهکش برداشته شد، استوانه پایینی نیز جدا شد. خاک لایه‌های سیلتی بالا و پایین به وسیله سمبه چوبی از داخل استوانه‌ها بیرون آورده و در قطعه‌هایی مساوی بریده شد تا در دستگاه بادی استحصال آب حفره‌ای قرار گرفته و آب حفره‌ای آنها با فشار استحصال شود. هر محلول نماینده ارتفاع مشخصی از خاک خواهد بود. قسمتی از هر قطعه خاک نیز برای تعیین درجه رطوبت برداشته شد. نمونه‌های ماسه لایه زهکش نیمه‌اشباع که در داخل گرمخانه قرار گرفته بود، بعد از خشک شدن برای اندازه‌گیری یون کلر استفاده شد. هر قطعه که نماینده غلظت در پروفیل ارتفاع خاک است به روش شستشو، کلر سنجی شد (Barone et al., 1990).

مشخصات فیزیکی، شیمیایی و هندسی آزمایشها نیز در جدول 2 نشان داده شده است. در این آزمایشها دو سازوکار انتقال فرارفت و نفوذ ملکولی در حرکت یونهای شیمیایی از میان لایه‌های خاک نقش دارند. این دو آزمایش با خاکهای متفاوت انجام شد. لایه بالا و پایین از جنس خاک سیلتی بوده و در رطوبت 2 تا 4 درجه بیشتر از رطوبت بهینه، متراکم شد. ابتدا محفظه پایین (مخزن دریافت کننده آلودگی) روی صفحه آلومینیومی قرار گرفت و مخزن تا لبه قرارگیری سنگ متخلخل از آب مقطر پر شد. برای جلوگیری از نفوذ دانه‌های سیلت به داخل زهکش، یک لایه منسوج نفاخته¹ به عنوان فیلتر و جداکننده بر روی لایه سیلتی تعبیه شد. استوانه مربوط به زهکش در محل خود جایگذاری شده و ماسه زهکش در پنج لایه ریخته و به وسیله سمبه فلزی متراکم شد و دوباره یک لایه منسوج نفاخته دیگر بر روی زهکش قرار گرفته و استوانه بالایی حاوی خاک سیلتی تعبیه شد. یک پایت² 2 میلی‌لیتری به صورت افقی به سوراخ پایین استوانه زهکش وصل شد تا امکان زهکشی ثقلی از این

1 . Non- Woven

2 . Pipette

جدول 2 مشخصات لایه‌های خاک و سایر مشخصات برای آزمایش‌های ATH-1 و ATH-2، (الف): مشخصات خاک‌های ریزدانه سیلتی و قسمتهای اشباع و نیمه‌اشباع ماسه درشت دانه، (ب): سایر مشخصات آزمایشها

جنس خاک	ارتفاع نمونه (cm)	درجه رطوبت حجمی	درجه اشباع (%)	درصد رطوبت (%)	چگالی خشک (gr/cm^3)	غلظت پیشینه یون کلر در خاک (mg/L)	ضریب نفوذ ملکولی (cm^2/day)
آزمایش ATH-1	ML 1	7	0/286	97	15/2	2950	0/7
	SU	10	0/281	97/5	14/79	2950	0/703
		7/8	0/068~0/0429	16/3 ~ 10/3	4/62 ~ 2/63	1/652	0/163 ~ 0/103
آزمایش ATH-2	ML 2	2/2	0/418	100	25/3	30	0/998
		7	0/238	98	11/7	350	0/673
	SU	10	0/231	97	11/3	2/04	0/631
		7/8	0/076~0/0275	18/7 ~ 6/7	4/6 ~ 1/78	1/67	0/186 ~ 0/066
		2/2	0/411	100	24/6	1/67	0/998

(الف)

ATH-2	ATH-1	ویژگی
5	5	ارتفاع محلول (cm)
کلور سدیم	کلور سدیم	نوع محلول
1900	2750	غلظت اولیه یون کلر در محلول (mg/L)
1/7	1/7	گرادیان هیدرولیکی لایه سیلتی اول
0/071	0/25	سرعت دارسی لایه سیلتی اول (cm/day)
-0/024	-0/16	سرعت دارسی لایه سیلتی دوم (cm/day)
22	26/85	مدت زمان آزمایش (day)

(ب)

نیز در جدول 3 نشان داده شده است. در این آزمایش، فقط سازوکار نفوذ ملکولی در حرکت یونهای شیمیایی از میان لایه‌های خاک در جهت پایین نقش دارد. لایه ماسه درشت دانه نیز مانند حالت قبل متراکم می‌شود با این تفاوت که این لایه به طور کامل اشباع است. مخازن آب مقطر به مدل متصل شد تا در کل مدل جریان رو به بالا برقرار شود. در این مرحله محلول NaCl که قبلاً با غلظت یون کلر مشخص تهیه شده به داخل مخزن بالا روی لایه سیلتی اول به ارتفاع 5 سانتیمتر ریخته می‌شود و در پایان آزمایش

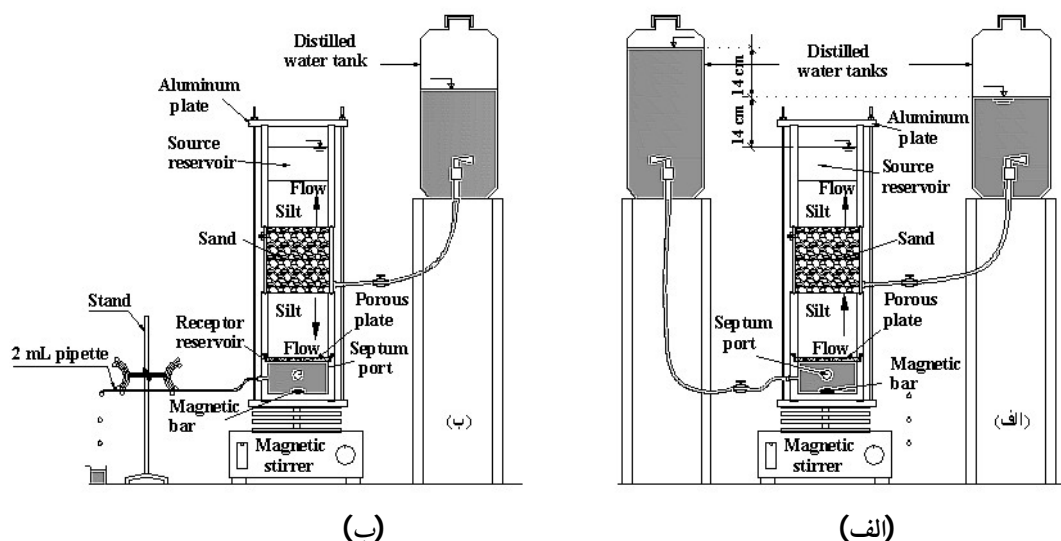
5- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایه خاک سیلتی و لایه کنترل هیدرولیکی میانی (جهت حرکت در هر سه لایه رو به بالا- سیستم تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی)

با استفاده از مدل ساخته شده یک آزمایش بر روی دو لایه خاک سیلتی و لایه ماسه درشت دانه میانی انجام شد. این آزمایش ATH-3 نام‌گذاری شد و 16 روز به طول انجامید. شکل 3- الف مدل فیزیکی آزمایش را نشان می‌دهد. مشخصات فیزیکی، شیمیایی و هندسی آزمایش‌ها

عیسی‌زاده

میلی لیتری با سر سوزن 10 سانتی متری استفاده شد. برای نمونه‌گیری، سرنگ را در فاصله‌های 1 سانتیمتری در داخل ماسه فرو برده و در هر مرحله مقدار 3 میلی لیتر محلول برداشته شد. این محلول نماینده غلظت خاک در ارتفاع نمونه‌برداری شده است.

مانند آنچه قبلاً گفته شد لایه‌های ریز دانه جدا و به قطعات مساوی بریده شد. اما ماسه درشت دانه دیگر به صورت نیمه اشباع نبوده و نمی‌توان از روش شستشویی استفاده کرد. برای تعیین پروفیل غلظت - عمق این لایه از یک سرنگ شیشه ای 5



شکل 3 مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایه مانع و لایه کنترل هیدرولیکی میانی، (الف): سیستم تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی، (ب): سیستم تله هیدرولیکی مهندسی

جدول 3 داده های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از آزمایشها، (الف): تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی (ATH-3)، (ب): تله هیدرولیکی مهندسی (ATH-4)

آزمایش ATH-3			خصوصیات آزمایش
SU	ML2	ML2	جنس خاک
10	10	7	ارتفاع خاک (cm)
5	5	5	ارتفاع محلول (cm)
0/429	0/219	0/222	درجه رطوبت حجمی
100	98/4	92	درجه اشباع (%)
26/6	10/5	10/9	درصد رطوبت
4000	4000	4000	غلظت اولیه یون کلردر شروع آزمایش (mg/L)
10	600	600	غلظت پیشینه یون کلر در خاک (mg/L)
1/616	2/084	2/035	چگالی خشک خاک (gr/cm^3)
0/998	6/4	0/6	ضریب نفوذ ملکولی $D*10^{-10}$ (cm^2/day)
16	16	16	مدت زمان آزمایش (روز)

(الف)

آزمایش ATH-4			خصوصیات آزمایش
SU	ML2	ML2	جنس خاک
10	10	7	ارتفاع خاک (cm)
5	5	5	ارتفاع محلول (cm)
0/429	0/212	0/225	درجه رطوبت حجمی
100	98/4	90/1	درجه اشباع (%)
26/6	10/11	11/18	درصد رطوبت
3140	3140	3140	غلظت اولیه یون کلردر شروع آزمایش (mg/L)
50	650	650	غلظت پیشینه یون کلر در خاک (mg/L)
1/62	2/1	2/1	چگالی خشک خاک (gr/cm^3)
0/998	0/64	0/586	ضریب نفوذ ملکولی $(cm^2 day) D^* 10^{-10}$
22	22	22	مدت زمان آزمایش (روز)

(ب)

7- مدلسازی تئوری

معادله انتقال آلودگی از میان خاک به صورت فرارفت- نفوذ ملکولی یک بعدی با رابطه زیر توصیف می‌شود (Rowe et al., 1995):

$$(\theta + \rho K_d) \frac{\partial c}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \theta v \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

که در آن θ ، درجه رطوبت حجمی، v ، سرعت نفوذ $v_a = n v$ ، v_a ، سرعت داریسی، c ، غلظت ماده آلوده در زمان t و عمق (z) مورد نظر، D ، ضریب پخش هیدرودینامیکی، و K_d ، ضریب جذب است.

ضریب پخش هیدرودینامیکی مجموع ضریب مؤثر نفوذ ملکولی D_e و ضریب پخش مکانیکی D_{md} است:

$$D = D_e + D_{md} \quad (2)$$

این نکته قابل ذکر است که ضریب مؤثر نفوذ ملکولی مؤثر با تغییر رطوبت حجمی خاک تغییر می‌کند (Porter et al., 1960) و (Kemper and Van Schaik, 1966). برای تخمین ضریب نفوذ ملکولی خاک نیمه اشباع از روی

6- مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی از میان دو لایه خاک سیلتی و لایه کنترل هیدرولیکی میانی (جهت حرکت رو به بالا در لایه سیلتی اول و رو به پائین در لایه سیلتی دوم - سیستم تله هیدرولیکی مهندسی)

در این قسمت سعی شده مد فنی مدلسازی شود که در آن فقط از سیستم‌های تله هیدرولیکی مهندسی و جمع‌آوری شیرابه اولیه استفاده می‌شود. با استفاده از مدل ساخته شده یک آزمایش بر روی دو لایه خاک سیلتی و یک لایه ماسه‌ای درشت دانه میان آنها انجام شد. این آزمایش ATH-4 نامگذاری شد و طول مدت آزمایش 22 روز بود. شکل 3- ب مدل فیزیکی آزمایش به صورت طرحواره‌ای را نشان می‌دهد. مشخصات این آزمایش در جدول 3 آورده شده است. در این آزمایش نیز نمونه‌گیری از مخزن بالا صورت گرفت. در انتهای آزمایش مدل مانند آزمایشهای قبلی باز می‌گردد.

عیسی‌زاده

شیمیایی و جایگذاری با آب مقطر و سطح مقطع خاک و f_s ، توده جرم انتقال پیدا کرده به داخل خاک که به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_s = \theta v c - \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \quad (8)$$

راه حل معادله (1) توسط Rowe and Booker (1994) ارائه و در نرم افزار کامپیوتری POLLUTE تعبیه شده است. در این نرم افزار از روش لایه های محدود استفاده شده و تاکنون در مدلسازی‌های آزمایشگاهی حرکت یک بعدی آلودگی در خاک و همچنین تحلیل انتقال آلودگی در مدفن‌های زباله با موفقیت استفاده شده است.

8- نتایج آزمایشها و مدلسازی

1-1- نتایج آزمایشهای ATH-1 و ATH-2

یکی از اهداف این سری آزمایشها بررسی کارایی ضریب نفوذ ملکولی به دست آمده برای یون کلر از سایر آزمایشها و به کارگیری آن در شرایط مختلف و نیز کنترل صحت رابطه (3) است پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و هندسی مدل آزمایشگاهی به برنامه کامپیوتری POLLUTE معرفی شده و منحنیهای محاسبه شده همراه با داده‌های مشاهده شده مشابه در مدل، در نمودارهای غلظت- ارتفاع خاک و غلظت- زمان ترسیم می‌شوند. شکلهای 4، 5 و 6 نتایج به دست آمده از آزمایشهای انتقال آلودگی در حالات ذکر شده در بالا را برای آزمایشهای ATH-1 و ATH-2 نشان می‌دهند.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب نفوذ ملکولی محاسبه شده (اصلاح شده) توسط معادله (3) برای خاکهای استفاده شده در مدل با درجات رطوبت حجمی معین، از دقت کافی در پیش‌بینی رفتار مدل فیزیکی برخوردار است. با مشاهده نتایج در شکل 4 می‌توان دید که غلظت در منبع آلودگی بالا برای هر دو آزمایش کاهش و آلودگی به لایه‌های پایین انتقال پیدا کرده است. همچنین در منبع پایین، غلظتها در حد پایین است و نشان می‌دهد که سیستم تله هیدرولیکی طبیعی می‌تواند انتقال آلودگی را به لایه‌های پایین کاهش دهد.

ضریب انتشار ملکولی همان خاک در حالت اشباع یا نزدیک اشباع می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (Rowe and Badv, 1996-a & b):

$$D_e = \frac{D_{e(ref)} \theta}{\theta_{ref}} \quad (3)$$

در این معادله، D_e ضریب مؤثر نفوذ ملکولی مؤثر یون در خاک نیمه اشباع، $D_{e(ref)}$ ضریب مؤثر نفوذ ملکولی مؤثر یون در خاک اشباع، θ رطوبت حجمی خاک نیمه اشباع و $\theta_{ref} = n$ رطوبت حجمی خاک اشباع برابر با درجه پوکی خاک است. یعنی در حالت غیر اشباع ضریب نفوذ ملکولی تابعی خطی از درصد رطوبت حجمی است.

برای مدلسازی سیستم چند لایه‌ای (مانند سیستم سه لایه‌ای که در این مطالعه استفاده شده)، طوری که شرایط جریان پایدار یک بعدی در آن برقرار باشد، باید سرعت داری بین لایه‌ها، جریان پیوسته‌ای را تامین کند

$$(4) v_{a(i)} = \theta_{(i)} v_{(i)} = v_{a(i+1)} = \theta_{(i+1)} v_{(i+1)}:$$

از این گذشته لازم است برای لایه‌های i و $i+1$ ، بقای جرم و پیوستگی غلظت در مرز لایه‌ها در عمق (z_i) ، تامین و در مرز لایه‌ها معادله‌های زیر برقرار شود:

$$(v_a c - \theta D \frac{\partial c}{\partial z})_{i|z=z_i} = (v_a c - \theta D \frac{\partial c}{\partial z})_{i+1|z=z_{i+1}} \quad (5)$$

و

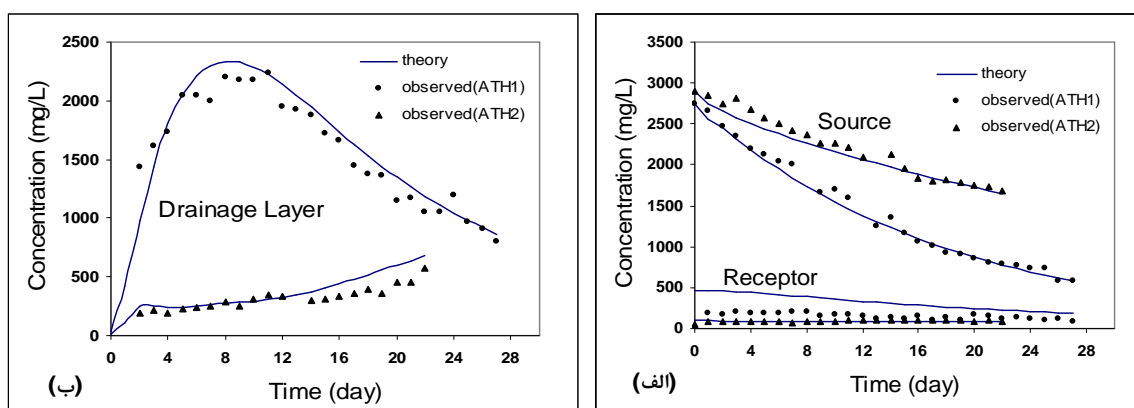
$$c_i(z = z_i) = c_{i+1}(z = z_{i+1}) \quad (6)$$

تحلیل آزمایشها شامل حل این نوع معادلات با شرایط مرزی مشخص است. اعمال شرط مرزی مخزن آلودگی که غلظت $c_s(t)$ ، نسبت به زمان در طی فرایند انتقال آلودگی به داخل خاک و همچنین نمونه برداری کاهش می‌یابد، بصورت زیر مدلسازی می‌شود

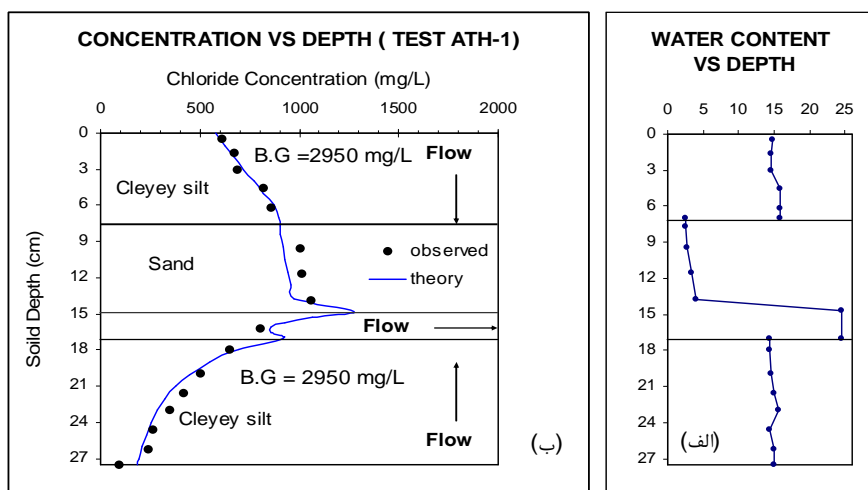
(Rowe et al., 1995):

$$c_s(t) = c_0 - \frac{1}{H_f} \int_0^t f_s d\tau - \frac{q_c}{H_f} \int_0^t c_s(\tau) d\tau \quad (7)$$

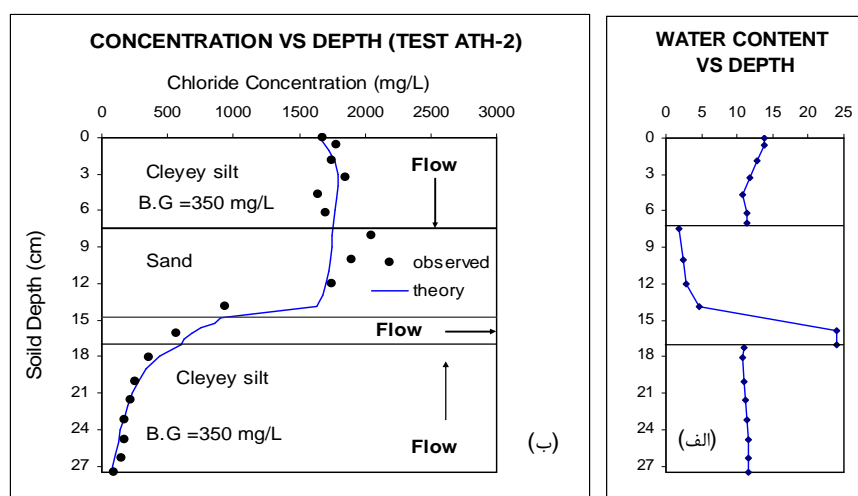
که C_0 ، غلظت اولیه در منبع، H_f ، ارتفاع سیال در منبع آلودگی، q_c ، حجم سیال برداشته شده برای تحلیل



شکل 4 نتایج مشاهده شده و تئوری غلظت یون کلر نسبت به زمان برای آزمایشهای ATH-1 و ATH-2، (الف): غلظت در منبع آلودگی و منبع دریافت کننده آلودگی، (ب): غلظت در زهکش میانی



شکل 5 نتایج مشاهده شده و تئوری آزمایش ATH-1، (الف): پروفیل درجه رطوبت نسبت به ارتفاع، (ب): پروفیل غلظت در مقابل ارتفاع خاک



شکل 6 نتایج مشاهده شده و تئوری آزمایش ATH-2، (الف): پروفیل درجه رطوبت نسبت به ارتفاع، (ب): پروفیل غلظت در مقابل ارتفاع خاک

هیدرولیکی بر کاهش غلظت آلودگی در مخزن بالا (رقت شدگی) برای 50، 100 و 200 روز انجام شده است (شکل 8). ضمن اینکه برای روشن شدن تأثیر جریان رو به بالا (تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی) در انتقال آلودگی به لایه‌های پایین، تحلیلهایی با جریان رو به پایین و سرعت داری صفر انجام شد. نتیجه این تحلیلهای را در شکل 9 می‌توان دید. این نمودارها نشان می‌دهد که جریان رو به بالا حتی مقدار انتقال به طریقه نفوذ ملکولی (سرعت داری صفر) را نیز تضعیف می‌کند. در این نمودارها (v) به معنی سرعت داری است.

9- نتیجه‌گیری

در این مطالعه چهار مدل آزمایشگاهی توانست شرایط هیدروژئولوژیک از مدفن‌های دارای سیستم‌های زهکش اولیه و ثانویه و همچنین سیستم تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی را شبیه‌سازی کند. در این مدل از نوعی منبع آلودگی که در زیر آن لایه خاک ریز دانه، سپس لایه خاک درشت دانه و زیر آن دوباره لایه ریزدانه و در نهایت سفره آب زیرزمینی قرار دارد، تشکیل شده بود. در آزمایشهای ATH-1 و ATH-2 مقداری از آلودگی همواره از لایه درشت دانه میانی زهکشی شد و جهت جریان آب در لایه ریز دانه دوم در جهت بالا، مدلسازی شد (تله هیدرولیکی طبیعی).

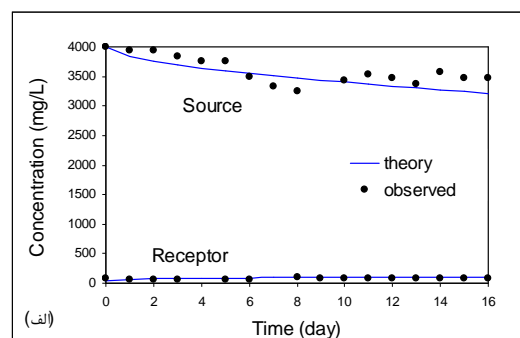
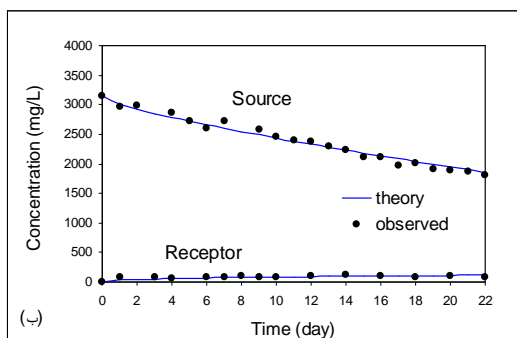
مطابق این شکلها همخوانی خوبی بین محاسبات تئوری نتیجه شده از POLLUTE و داده‌های مشاهده شده در مدل آزمایشگاهی وجود دارد.

از نمودار مربوط به زهکش می‌توان دید که غلظت در زهکش برای آزمایش ATH-1 ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. دلیل این افزایش، سرعت داری بالایی بود که در چند روز اول به مدل اعمال شد و چون غلظت پیشینه خاک ریزدانه بالا بود، این موجب شسته شدن یون کلر در جهت بالا شد. در این نمودارها (B.G) به معنی غلظت پیشینه است.

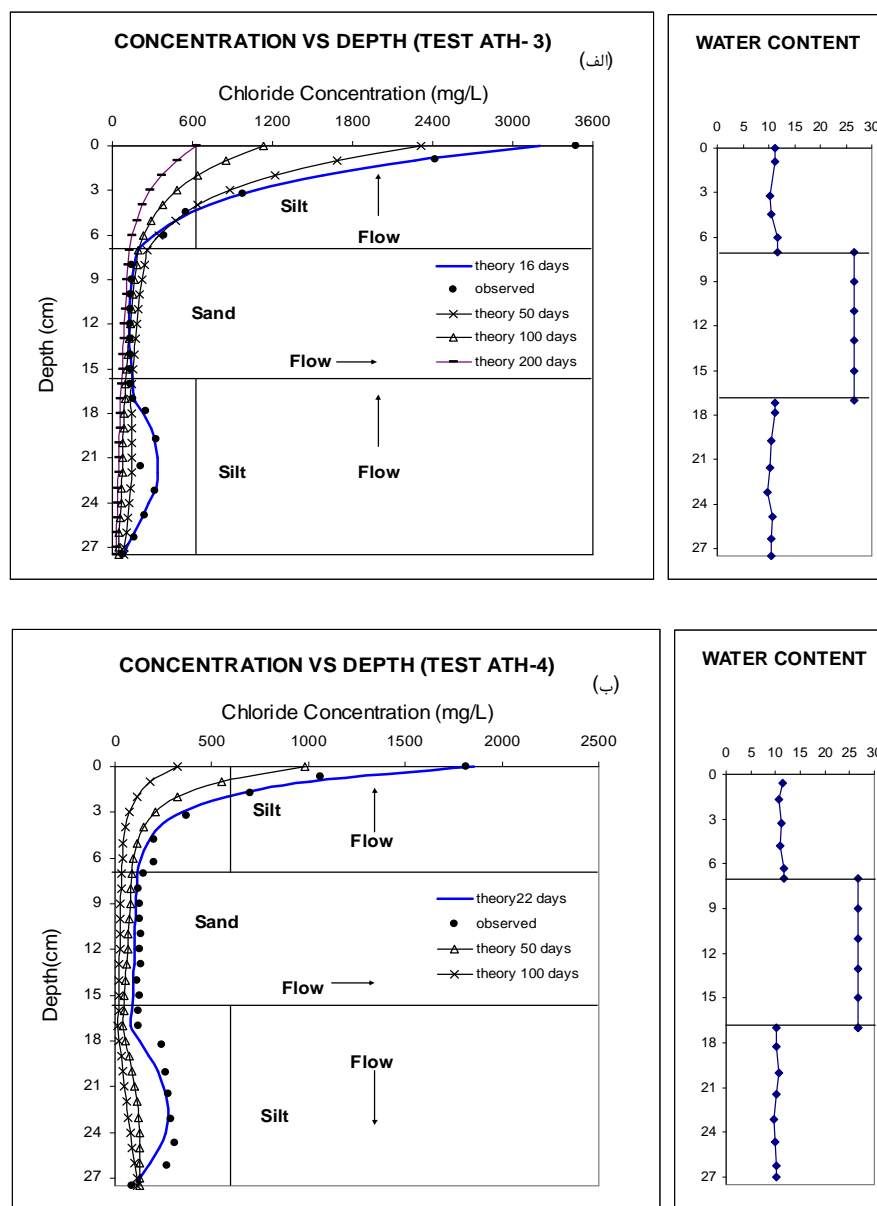
نکته مهم در این شکلها آن است که قسمت زهکش نیمه اشباع، تأثیر چندانی در کاهش انتقال نشان نمی‌دهد، زیرا سرعت داری در هر دو آزمایش در حدی بود که موجب شد سازوکار فرارفت نسبت به نفوذ ملکولی سازوکار (انتقال) غالب باشد. همچنین این شکلها نشان می‌دهد که تله هیدرولیکی طبیعی توانسته انتقال آلودگی به مخزن پایین را کاهش دهد.

8-2- آزمایشهای ATH-3 و ATH-4

نتایج آزمایشهای ATH-3 و ATH-4 در شکلهای 7 تا 9 نشان داده شده است. مطابق این شکلها تطابق خوبی بین داده‌های مشاهده شده حاصل از مدلسازی و داده‌های تئوری نتیجه شده از POLLUTE دیده می‌شود. در این آزمایشها همچنین تحلیلهایی برای مقایسه تأثیر تله



شکل 7 نتایج داده‌های مشاهده شده و تئوری غلظت نسبت به زمان در منبع بالا و منبع پایین، (الف): آزمایش ATH-3 و (ب): آزمایش ATH-4



شکل 8 نتایج داده‌های مشاهده شده و تئوری غلظت و درجه رطوبت نسبت به ارتفاع، (الف):

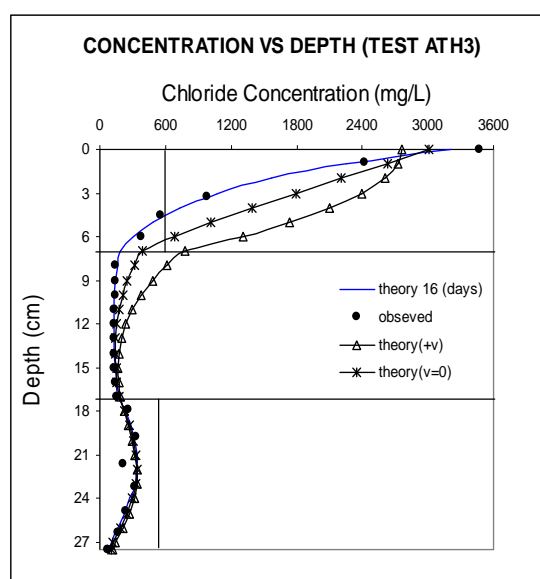
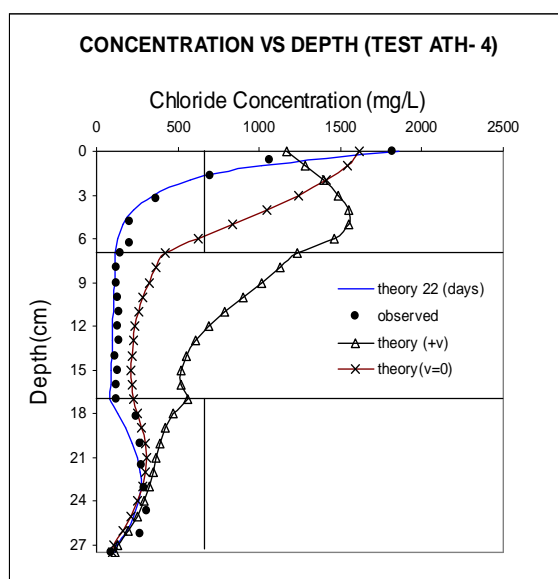
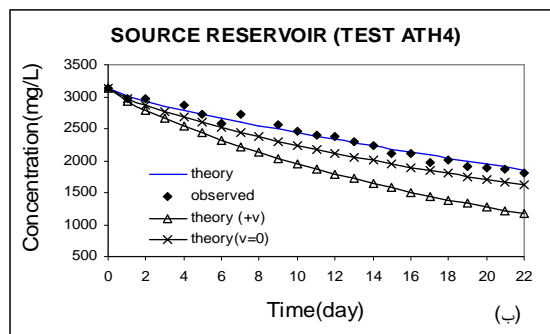
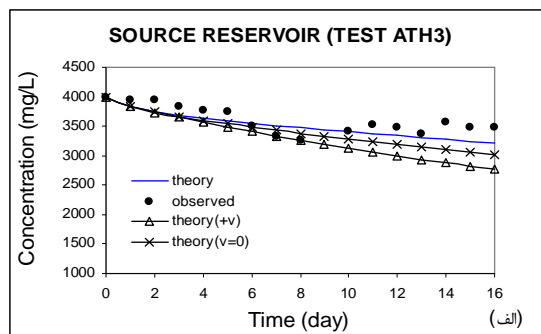
آزمایش ATH-3 و (ب): آزمایش ATH-4

1- با توجه به نتایج آزمایشها و تطابق نتایج تحلیلی تئوری نرم‌افزار کامپیوتری POLLUTE با مشاهدات آزمایشگاهی، مشخص می‌شود که مدلسازی آزمایشگاهی با موفقیت همراه بوده و روشهای به کار رفته در آزمایشها منطقی و قابل اطمینان است. با توجه به پیش‌بینی مناسب نرم‌افزار POLLUTE، می‌توان با دقت کافی از این نرم

در آزمایش ATH-3 جریان آب همواره در کل مدل رو به بالا بود (تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی) و در آزمایش ATH-4 جریان آب در لایه ریز دانه اول رو به بالا و در لایه ریز دانه دوم رو به پایین بود و شرایط تله هیدرولیکی مهندسی را شبیه‌سازی کرد. نتایجی که از این آزمایشها گرفته شد به شرح زیر است:

افزار در پیش بینی انتقال آلودگی در داخل خاک در شرایط مختلف استفاده کرد و کمک مناسبی برای مهندسان در

طراحی محل‌های دفن زباله است.



شکل 9 مقایسه پروفیل‌های به دست آمده از آزمایشها، با پروفیل‌های تئوری به دست آمده برای حالتی که سرعت دارسی صفر یا مثبت در نظر گرفته شده است، (الف): آزمایش ATH-3 و (ب): آزمایش ATH-4

مستقیم دارد، این امر موجب شده که انتقال آلودگی تحت تاثیر درجه رطوبت حجمی قرار گیرد و غلظت کاهش یابد. لکن در مطالعه حاضر سرعت دارسی در حدی بود که هر دو سازوکار انتقال فرارفت و نفوذ ملکولی در انتقال آلودگی نقش داشتند و نقش فرارفت نسبت به نفوذ ملکولی غالب بود.

3- وقوع حالت تله هیدرولیکی نقش مهمی را در کاهش انتقال آلودگی به لایه‌های پایین تر ایفا می‌کند زیرا در عمل، عامل انتقال فرارفت از عوامل انتقال آلودگی به لایه‌های پایین حذف می‌شود. چنانچه مقایسه آزمایش‌های انجام شده

2- یکی از مهمترین نتایج در دو آزمایش اول (ATH-2 و ATH-1) آن است که اندازه سرعت دارسی جریان آب، در انتقال آلودگی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. تأثیراتی که زهکش به صورت نیمه اشباع در مطالعات (Rowe and Badv (1996 بر انتقال آلودگی داشته در این آزمایشها محسوس نیست. دلیل این پدیده سرعت دارسی پایین در مطالعات این دو محقق بود و با توجه به اینکه سازوکار نفوذ ملکولی در انتقال آلودگی حاکم بود و ضریب نفوذ ملکولی بر طبق رابطه ارائه شده توسط این دو محقق با درجه رطوبت حجمی نسبت

- systems.” Iranian Journal of Science and Technology Transaction B, 28(B5), 559-572.
- [2] Badv, K., and Abdolizadeh, R., (2003). “A laboratory investigation on the hydraulic trap effect in minimizing chloride migration through silt.” Iranian Journal of Science and Technology, 28(B1), 107-118.
- [3] 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.
- [4] Barone, F.S., Rowe, R.K., and Quigley, R.M. (1990). “Laboratory determination of chloride diffusion coefficient in an intact shale.” Canadian Geotechnical Journal, 27, 177-184.
- [5] Kemper, W.D. and Van Schaik, J.C. (1966). “Diffusion of salts in clay-water systems.” Proceeding Soil Science Society of America, 30, 534-540.
- [6] Mitchel, J.K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- [7] Porter, L.K., Kemper, W.D., Jackcon, R.D., and Stewart, B.A. (1960). “Chloride diffusion in soil as influenced by moisture content.” Proceeding Soil Science Society of America, 24, 460-463.
- [8] 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.
- [9] Rowe, R.K., Badv, K., (1996a). “Chloride migration through clayey silt underlain by fine sand or soil.” Journal of Geotechnical Engineering, 122(1), 324-337.
- نشانیگر این است که در پایان همه آزمایشها هیچ اثری از آلودگی در مخزن دریافت کننده دیده نشد. لکن در محلهایی که بتوان از خود سیستم هیدروژئولوژیک منطقه استفاده و به مدفن تله هیدرولیکی طبیعی تحمیل کرد، در آن صورت مقدار آب مورد نظر برای ایجاد پتانسیل در لایه کنترل هیدرولیکی به مقدار چشمگیری کاهش می یابد. همچنین مقایسه آزمایشهای ATH-3 و ATH-4 نشان داد که در صورت نبود شرایط ایجاد تله هیدرولیکی طبیعی، می توان با استفاده از سیستم تله هیدرولیکی مهندسی از انتقال آلودگی به لایه های پایین تر جلوگیری کرد.
- 4- از مقایسه پروفیل های غلظت - عمق در زمانهای 50، 100 و 200 روزه آزمایشهای ATH-3 و ATH-4 دیده می شود که هر چه زمان ایجاد تله هیدرولیکی بیشتر باشد، انتقال آلودگی کمتر می شود. پس از طی مدتی که غلظت در مخزن آلودگی به علت رقیق شدن، کمتر شد، می توان مدتی تزریق آب به لایه کنترل هیدرولیکی را از قطع کرد، سپس وقتی غلظت افزایش یافت، سیستم کنترل هیدرولیکی را مجدداً می توان راه اندازی کرد. بنابراین با کنترل هیدرولیکی مدفن مهندسی، می توان از انتقال آلودگی به آبهای زیرزمینی جلوگیری کرد.
- 5- نتایج نشان داده شده در نمودارهای شکل 9 نشان داد که جریان رو به بالا، موجب تضعیف انتقال به روش نفوذ ملکولی می شود؛ بدین معنا که در حالت جریان صفر، انتقال صرفاً به وسیله پدیده نفوذ ملکولی صورت می گیرد، لکن مقدار آلودگی انتقال یافته بیشتر از حالت جریان رو به بالا است. بنابراین سیستم تله هیدرولیکی ضمن حذف سازوکار فرارفت، موجب تضعیف اثر سازوکار نفوذ ملکولی در جهت پایین نیز می شود.

10- منابع

- [1] Badv, K., and Mahooti, A. (2004). “Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil

- [12] Rowe, R.K., Quigley, R.M., and Booker, J.R. (1995). Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities, E & FN Spon Publishers, London, U.K.
- [10] Rowe, R.K., and Badv, K. (1996b). "Advective-Diffusive contaminant migration in unsaturated sand and gravel." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122 (12), 965-975.
- [11] Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1994). POLLUTE v.6., 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil. Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada.

Simulation of Natural and Engineered Hydraulic Trap Systems in a Landfill, Using one- dimensional
Three-Layer Laboratory Models

K. Badv^{1*}, B. Esazadeh²

1. Assoc. Prof. of Civil Eng. Dept., Urmia Univ.
2. M.Sc. Student of Civil Eng. Dept., Urmia Univ.

* P.O. Box 165, Urmia, Iran
k.badv@mail.urmia.ac.ir

Abstract

The role of unsaturated drainage layer and hydraulic control systems in sanitary-engineered solid waste landfills were simulated using three-layer one-dimensional laboratory models. In the models, from top to bottom, a sodium chloride solution as a contaminant source reservoir, a first compacted silt layer as a primary liner, a coarse sand layer as a secondary leachate collection system or a hydraulic control layer, a second compacted silt layer as a secondary liner, and a bottom water reservoir as a groundwater aquifer, were used. In the first two tests, the model simulated the secondary leachate collection system and natural hydraulic trap system (upward flow through the second clayey silt layer). In this case, the contaminant transport mechanisms through the first silt layer were downward advection and diffusion, and through the second silt layer, diffusion was downward and advection was upward. The results showed that the implementation of the natural hydraulic control system could effectively reduce the contaminant transport to the underlying groundwater reservoir. In the third test, the natural and engineered hydraulic trap systems were simulated (upward flow from the bottom reservoir to the upper reservoir). In the fourth test, the model simulated the engineered hydraulic trap system (downward flow through the first silt layer and upward flow through the second silt layer). The results showed that natural and engineered hydraulic trap systems have important effects on reducing the contaminant transport toward the underlying aquifer. In all experiments the chloride concentration in silt and coarse sand layers and top and bottom reservoirs were measured and the observed concentrations were compared with theoretical concentrations calculated by computer code POLLUTE V6. The results showed that there is good agreement between theoretical and observed data.

Keywords: Contaminant Transport, Landfill, Diffusion, Advection, Natural and Engineered Hydraulic Trap.