

ارزیابی طرح بهینه برای مدفن زباله از طریق محاسبات انتقال آلودگی

کاظم بدو*

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۸۲/۵/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۶/۲۸)

چکیده - محاسبات انتقال آلودگی برای چهار گزینه مختلف مدفن زباله (لندفیل) با استفاده از کد رایانه ای POLLUTE انجام پذیرفت. ضرایب انتشار یون کلر در لایه خاک طبیعی و لایه خاک متراکم شده، با انجام آزمایشات متعدد انتشار روی نمونه خاکهای مدفن زباله ارومیه، اندازه گیری شدند. این ضرایب به همراه پارامترهای هندسی، فیزیکی، و شیمیایی لایه‌های طبیعی و مهندسی و شرایط مرزی حاکم، در محاسبات چهار گزینه در نظر گرفته شده برای طرح مدفن، مورد استفاده قرار گرفتند. با در نظر گرفتن معیار استاندارد آب شرب برای یون کلر در سفره آب زیر زمینی زیر مدفن، چهار گزینه تعریف شده از نظر آلودگی و یا عدم آلودگی در یک مدت زمان معین، مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقایسه نتایج نشان داد که گزینه چهارم که دارای المانهای مهندسی شامل یک لایه زهکش سفره‌ای برای جمع آوری شیرابه و یک لایه رسی متراکم شده در زیر مدفن است، از اطمینان بیشتری برای کنترل و کاهش انتقال آلودگی از کف مدفن به سفره آب زیر زمینی برخوردار است. این گزینه برای استفاده در طراحی محلهای دفن زباله کشور، به عنوان یک طرح بهینه نیمه مهندسی توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: مدفن زباله، طرح بهینه، انتشار یونی، انتقال آلودگی، سفره آب زیر زمینی

Evaluation of Optimum Landfill Design by Contaminant Transport Analysis

K. Badv

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urumia University

Abstract: Contaminant transport analysis was performed for four selected solid waste landfill designs using the computer code POLLUTE. The diffusion coefficients were determined for the natural soils (aquitar) and compacted soils from the Urumia landfill site, using the diffusion tests. These coefficients along with the geometrical, physical, and chemical parameters of the natural soil and engineered layers, as well as the dominant boundary conditions were used in the analysis of the four selected

* - استادیار

designs for the landfill. These designs were evaluated for the contamination of the underlying aquifer in a specified period, using the drinking water standard for chloride ion. The comparisons showed that the fourth design which includes the engineered elements of a blanket type leachate collection layer and a compacted clayey liner underneath the landfill base, has more certainty in controlling the contaminant transport from the landfill base to the underlying aquifer. This type of landfill could be introduced as an optimum and semi-engineered design to be used for solid waste landfills in Iran.

Keywords: Landfill, Optimum Design, Diffusion, Contaminant Transport, Aquifer

۱- مقدمه

محل‌های دفن زباله یکی از اماکن آلوده کننده منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شوند [۲۰۱]. شیرابه تولید شده از زباله‌ها حاوی ترکیب‌های متعدد شیمیایی است که باید با روش‌های مهندسی از کف مدفن زباله جمع‌آوری و تصفیه شود. عدم جمع‌آوری شیرابه باعث حرکت یون‌های شیمیایی از کف مدفن به سفره آب زیرزمینی از طریق لایه‌های خاک زیر مدفن، و آلوده شدن آب در سفره آب زیرزمینی می‌شود [۳ و ۴]. ارزیابی چگونگی انتقال آلودگی و تخمین کمی و کیفی آلودگی در سفره آب زیرزمینی زیر مدفن زباله، با دانستن اطلاعات هیدروژئولوژیک منطقه مدفن زباله، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شیرابه و لایه‌های خاک طبیعی و یا مهندسی زیر مدفن، و با انجام آزمایشات برای تعیین پارامترهای کلیدی، و محاسبات انتقال آلودگی میسر است. مطالعات، آزمایشات، و محاسبات انجام یافته در طراحی و ساخت مدفن زباله مدرن و مهندسی هالتون در شهر تورنتو در کانادا مجموعه خوبی از کار محاسبه، طراحی، و ساخت یک مدفن مهندسی را ارائه می‌کند [۵ و ۶]. طراحی و ساخت مدفن‌های مهندسی - بهداشتی در ایران هنوز جایگاه قانونی خود را پیدا نکرده است و تا کنون زباله‌های شهری عموماً به صورت روباز در روی زمین طبیعی تخلیه و رها شده و در اندک مواردی با روش‌های غیر مهندسی در زیر خاک دفن می‌شوند [۷].

در این مطالعه ابتدا با انجام آزمایشات آزمایشگاهی، ضریب انتشار یون محافظه - کار کلر [Cl⁻] در خاک‌های ریزدانه مدفن زباله ارومیه تعیین شدند. مکانیزم انتشار، عامل حرکتی غالب در انتقال آلودگی از میان خاک‌های ریزدانه رسی و سیلتی

محسوب می‌شود و لذا در محاسبات انتقال آلودگی استفاده از مقادیر غیر واقعی برای ضریب انتشار به نتایج غیر قابل اطمینانی می‌تواند منجر شود [۵]. انتخاب یون کلر به دلیل محافظه کار بودن یعنی نداشتن هرگونه عکس‌العمل شیمیایی با یون‌های خاک انتخاب شد [۴]، و در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی انتقال آلودگی در خاک، از این یون به عنوان عنصر حرکتی استفاده شده است [۸]. همچنین مقدار توصیه شده برای غلظت یون کلر در استاندارد آب آشامیدنی برابر با ۲۵۰ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شده است [۹ و ۱۰]. این مقدار در محاسبات انجام یافته در این مطالعه، به عنوان حد آلودگی در سفره آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. سپس چهار گزینه از طرح مدفن زباله که شامل یک گزینه غیر مهندسی و سه گزینه نیمه مهندسی بودند، با شرایط مرزی معینی تعریف شده و محاسبات انتقال آلودگی برای این گزینه‌ها انجام پذیرفت. این محاسبات با استفاده از پارامترهای واقعی انتشار و پارامترهای دیگر که بر اساس شرایط فرضی معین محاسبه شده بودند انجام پذیرفت. در پایان، چهار گزینه از نظر تاثیر آلودگی یون کلر در سفره آب زیرزمینی زیر مدفن‌ها در یک مدت زمان معین، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. نتیجه این مقایسه و ارزیابی، مدفن نیمه مهندسی بهینه را برای استفاده در طراحی مدفن‌های زباله کشور، با توجه به محدودیت‌های مالی معرفی کرد. اطلاق مدفن نیمه مهندسی برای طرح بهینه از دیدگاه مقایسه آن با حداقل استانداردهای مهندسی موجود بین‌المللی برای مدفن‌های زباله‌های شهری است [۸].

مدل نظری وار برای تحصیل انتقال آلودگی در این مطالعه کد رایانه‌ای POLLUTE-v6 است [۱۱]. این نرم افزار، انتقال

آلودگی از میان لایه‌های زیر لندفیل را در شرایط یک و نیم بعدی تحلیل می‌کند. بدین معنی که قادر است ضمن تحلیل انتقال در جهت قائم در دو جهت بالا به پایین و پایین به بالا (تله هیدرولیکی)، جریان آب را به صورت افقی در یک سفره آب زیرزمینی در زیر لایه های خاک زیر لندفیل نیز مدل کند. در این نرم افزار از روش لایه محدود^۱ در محاسبات استفاده شده است. مزیت این روش این است، که برای به دست آوردن غلظت در یک زمان خاص لازم نیست که تحلیلها برای زمانهای قبل از آن نیز انجام شود و این مسئله باعث کاهش حجم محاسبات می شود. این برنامه قادر است، مسائلی همچون بارندگی به داخل لندفیل، زهکشی از لایه‌های مختلف، کاهش غلظت آلودگی در اثر جذب توسط خاک (جذب فروندولیک، جذب لانگمیر، جذب خطی)، تغییرات خصوصیات لایه های مختلف زیر لندفیل و لایه آبدار از جمله ارتفاع لایه، ضریب انتشار، دانسیته خشک، درصد رطوبت حجمی، و ضریب جذب را در نظر بگیرد. خاک می‌تواند اشباع و یا نیمه اشباع باشد. یکی دیگر از قابلیت‌های این برنامه در نظر گرفتن تغییرات خصوصیات لایه های مختلف در طول زمان است. این برنامه بعد از گرفتن اطلاعات لازم، تغییرات غلظت نسبت به زمان را برای نقاط مرزی و همچنین برای نقاط داخلی لایه‌های خاک به صورت نوشتاری و گرافیکی در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

تا کنون از این کد رایانه‌ای در تحلیل نتایج مشاهده‌ای انتقال آلودگی در اشل های صحرائی و مدل‌های آزمایشگاهی بیشماری استفاده شده است و یکی از نرم افزارهای شناخته شده در طراحی لندفیل ها به شمار می‌رود. پیش بینیهای دقیق به دست آمده از این کد و تطابق خوب نتایج مشاهده‌ای با نتایج نظری حاصل از این نرم افزار، تا کنون صحت و کارایی مناسب این کد رایانه‌ای را به اثبات رسانده است [۲، ۵ و ۶] و [۱۲ تا ۱۵].

۲- آزمایشهای انتشار روی لایه‌های خاک مانع انتقال

به دلیل اهمیت پارامترکلیدی انتشار در انتقال از میان خاک

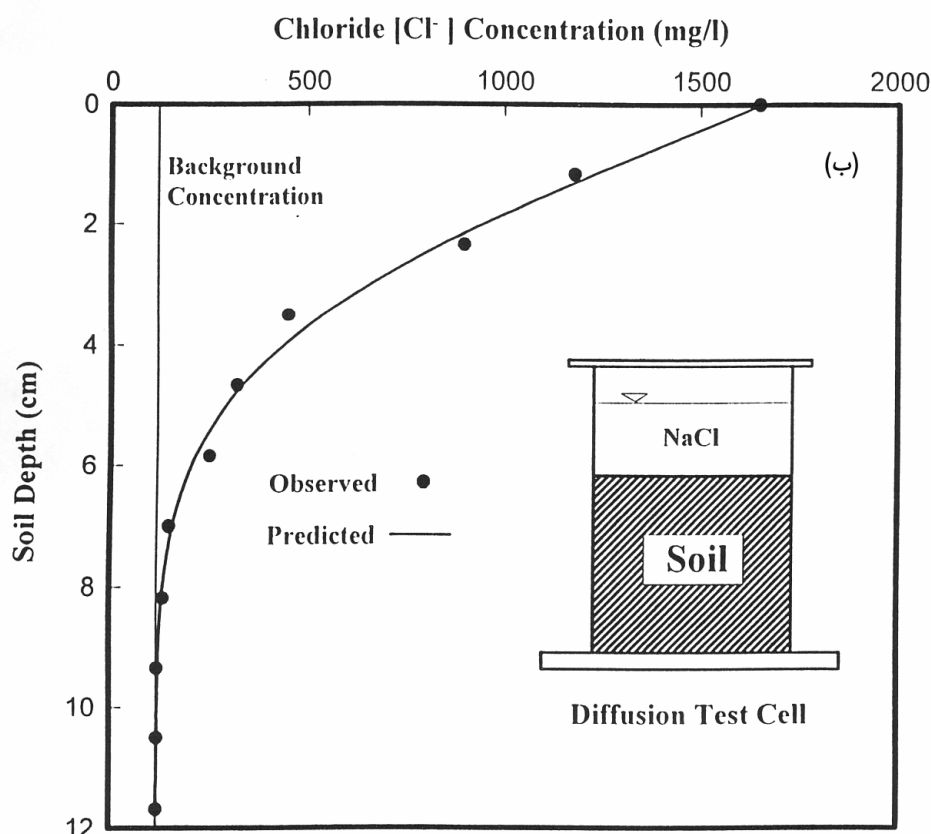
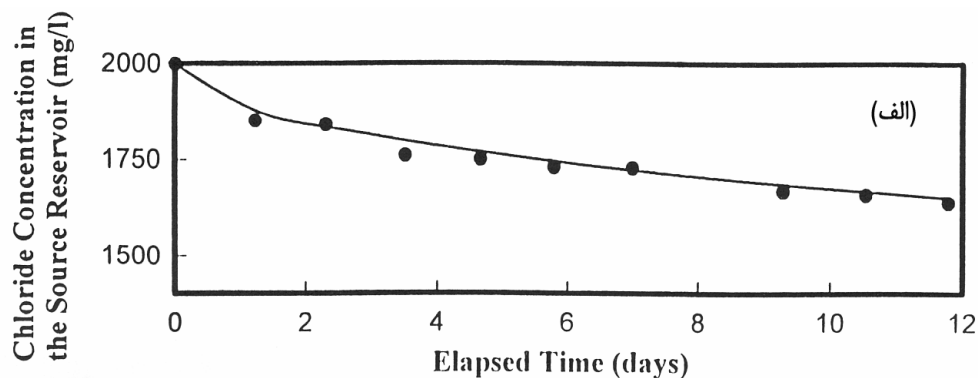
ریزدانه طبیعی زیرمدفن و خاک ریزدانه متراکم شده مهندسی (لایتر رسی در گزینه های مدفن نیمه مهندسی)، استفاده از مقادیر واقعی این پارامتر نتایج واقعیت‌تری را در محاسبات انتقال به دست می‌دهد. به این منظور تعدادی آزمایش انتشار روی خاکهای ریزدانه از مدفنه‌های قدیم و جدید زیاله در ارومیه، انجام پذیرفت. آزمایشها در دو حالت دانسیته طبیعی و دانسیته متراکم شده با تراکم استاندارد روی خاکهای نمونه انجام پذیرفت. کلیه آزمایشها برای کنترل تکرار پذیری نتایج، دو بار با نمونه‌ها و شرایط کاملاً مشابه انجام پذیرفتند و در ادامه نتایج متوسط دو آزمایش برای هر نمونه خاک ارائه شده است.

۲-۱- مواد و روشها

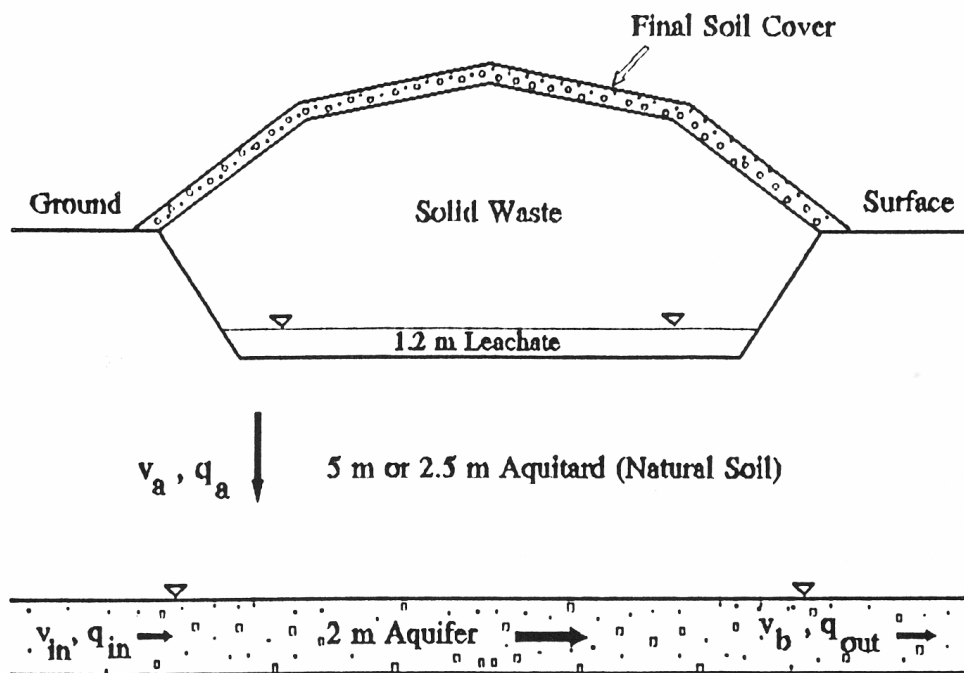
سه نمونه خاک تهیه شده از منطقه مدفن قدیمی زیاله به ترتیب D1، D2 و D3 و پنج نمونه خاک تهیه شده از منطقه مدفن جدید زیاله به ترتیب D4 الی D8 نامگذاری شدند. جدول (۱) خصوصیات مکانیکی این نمونه ها را نشان می‌دهد. دانسیته صحرائی نمونه ها (در شرایط طبیعی) با استفاده از کلوخه های خاک تعیین شد [۷]. قبل از آزمایشهای انتشار، کلیه نمونه ها در هوای آزاد خشک شده، از الک شماره ۴ (۴/۷ میلی‌متر) رد شده و به رطوبت مورد نظر رسانده شدند. سپس نمونه خاکها با تراکم طبیعی (کلیه نمونه ها به جز نمونه D8) و یا تراکم استاندارد (نمونه D8) در داخل لوله آزمایش انتشار که کف آن با یک صفحه شیشه ای مسدود است، متراکم شدند (داخل شکل ۱). درجه رطوبت، درجه اشباع، و سپس درجه رطوبت حجمی نمونه خاک داخل لوله آزمایش محاسبه گردید. نمونه‌های متراکم شده با تراکم استاندارد، همانند تراکم صحرائی، به صورت اشباع کامل نبوده و دارای درجه اشباعی حدود ۹۳ الی ۹۷ درصد بودند. محلول کلرور سدیم (NaCl) با غلظت معین یون کلر، روی نمونه خاک متراکم شده ریخته شده (مخزن آلودگی) و آزمایش انتشار آغاز شد. در طول آزمایش نمونه محلولهایی از مخزن آلودگی برای کنترل تغییرات غلظت نسبت به زمان برداشت شده و برای ثابت ماندن

جدول ۱ - خصوصیات مکانیکی خاکهای مورد استفاده در آزمایشهای انتشار

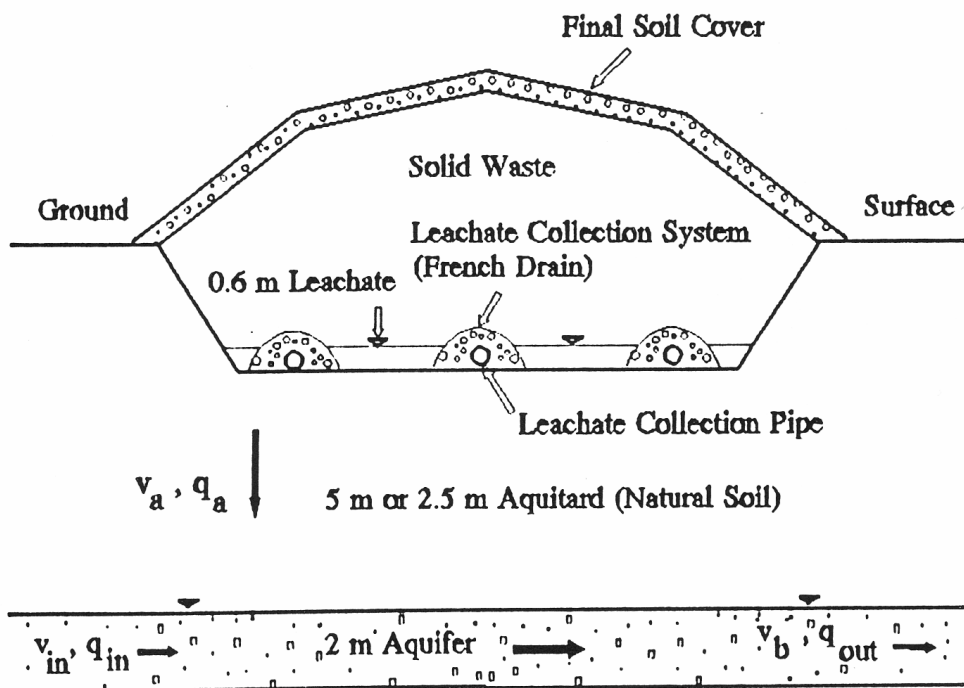
پارامتر	نمونه D1	نمونه D2	نمونه D3	نمونه های D4 الی D8
نوع خاک	CH	ML	CL	CH
حد روانی (%)	۵۳/۹	۴۲	۴۲	۵۴/۵
حد خمیری (%)	۱۰/۳	۳۴	۱۷	۲۵/۵
چگالی ویژه	۲/۷۴	۲/۸۵	۲/۸۶	۲/۷۶
دانسیته ظاهری در صحرا (g/cm ³)	۱/۵	۱/۹	۱/۸	۱/۵



شکل ۱ - نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده برای آزمایش انتشار روی نمونه خاک D8، الف: نتایج مشاهده‌ای و پیش بینی شده غلظت نسبت به زمان در مخزن آلودگی، ب: نتایج مشاهده‌ای و پیش بینی شده غلظت نسبت به ارتفاع خاک. شکل شماتیک لوله آزمایش انتشار در داخل شکل (ب) مشاهده می‌شود.



شکل ۲- شکل شماتیک مدفن زباله غیر مهندسی (گزینه اول)



شکل ۳- شکل شماتیک مدفن زباله با زهکش های فرانسوی (گزینه دوم)

ارتفاع محلول معادل حجمی آن آب مقطر اضافه شد. پس از مدت زمان معین (۸ الی ۱۲ روز) محلول کلورسیدیم از مخزن آلوده بالای خاک تخلیه شده، و خاک از لوله آزمایش بیرون کشیده شده و به قطعات تقریباً مساوی بریده شدند. آب منفذی قطعات خاک که اکنون دارای یونهای کلر و سدیم انتقال یافته به طریقه انتشار است، توسط دستگاه استحصال آب منفذی خاک، استخراج شد [۷]. سپس نمونه محلولهای برداشت شده از مخزن آلوده و محلول های آب منفذی به دست آمده از قطعات خاک، برای تعیین غلظت یون کلر توسط دستگاه یون متر مجهز به الکتروود انتخابی یون کلر، تحلیل شدند. نتایج مشاهده شده غلظت در دو نمودار غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک برای هر آزمایش انتشار ترسیم شدند.

۲-۲- تعیین ضرایب انتشار

ضرایب انتشار یون کلر در هر خاک با استفاده از دو نمودار مشاهده شده در پایان هر آزمایش و با استفاده از نرم افزار POLLUTE تعیین شدند. در این روش با استفاده از داده های هندسی، فیزیکی، و شیمیایی هر آزمایش، ضریب انتشاری که بهترین منحنی برازش شده (منحنی پیش بینی شده) را روی داده های مشاهده شده در نمودارهای غلظت - زمان و غلظت - ارتفاع خاک (به طور جداگانه) نتیجه دهد، به عنوان محدوده ضریب انتشار یون کلر در آن خاک تعیین می شود [۷، ۱۲ و ۱۳]. جدول (۲) نتایج به دست آمده در آزمایشات انتشار را نشان می دهد. ضرایب انتشار به دست آمده توسط نتایج غلظت - زمان در مخزن آلودگی $[D_{e(res)}]$ در محدوده (m^2/s) $1/49 \times 10^{-10}$ الی (m^2/s) $7/41 \times 10^{-10}$ ، و ضرایب انتشار به دست آمده توسط نتایج غلظت - ارتفاع خاک $[D_{e(soil)}]$ در محدوده (m^2/s) $4/63 \times 10^{-10}$ الی (m^2/s) $10/0 \times 10^{-10}$ قرار دارند. با تلفیق این دو محدوده، دامنه تغییرات ضریب انتشار در خاک های ریزدانه آزمایش شده در این مطالعه در محدوده (m^2/s) $1/49 \times 10^{-10}$ الی (m^2/s) $10/0 \times 10^{-10}$ قرار می گیرند. این مقادیر به خوبی با مقادیر ارائه شده توسط محققان دیگر برای

یون کلر و خاکهای مشابه همخوانی دارد [۱۶]. نمونه ای از نمودارهای مشاهده ای و پیش بینی شده برای آزمایش انتشار خاک D8 در شکل (۱) نشان داده شده است.

در محاسبات انتقال آلودگی برای چهار گزینه مدفن، برای خاک طبیعی زیر مدفن^۲ از ضریب انتشار میانگین (m^2/s) $8/6 \times 10^{-10}$ و برای لایه خاک رسی کوبیده شده با تراکم استاندارد از ضریب انتشار میانگین (m^2/s) $4/6 \times 10^{-10}$ استفاده شد. این دو مقدار میانگین، از نتایج مشاهده ای و نظری مربوط به نمونه های خاک که از صحت بیشتری برخوردارند استفاده شده، و در داخل محدوده مقادیر به دست آمده در آزمایشها قرار دارد. در تعدادی از مطالعات، ضرایب انتشار حاصل از نتایج مشاهده ای و تئوریک مخزن آلودگی به همراه نتایج حاصل از ستون خاک ارائه شده است. در این مطالعه نیز از همین رویه برای ارائه کامل نتایج استفاده شده است [۱۶].

۳- گزینه های مختلف مدفن زباله

چهار گزینه مختلف برای مدفن زباله در نظر گرفته شدند. گزینه اول غیر مهندسی و سه گزینه دیگر دارای المانهای مهندسی مختلف بوده و در مقایسه با حداقل استاندارد مهندسی مدفن زباله (Subtitle D Landfill) [۱۷]، گزینه های نیمه مهندسی محسوب می شوند. مقطع عرضی چهار گزینه در نظر گرفته شده در شکل های (۲) الی (۵) نشان داده شده و در ادامه توضیح داده شده اند.

در اثر اختلاف پتانسیل موجود بین ارتفاع شیرابه در کف مدفن و ارتفاع آب زیر زمینی (که همتراز با مرز بین لایه رسی و سفره آبدار فرض شده است)، یونهای شیمیایی موجود در شیرابه (در این مطالعه یون کلر) با مکانیزم های جابه جایی با حرکت (حرکت آلاینده ها به همراه جریان آب زیر زمینی با سرعت دارسی v_a) و انتشار (حرکت آلاینده ها در اثر پتانسیل غلظت و با ضریب انتشار D_e) در جهت قائم از کف مدفن به طرف سفره آبدار حرکت می کنند. در بالا دست مدفن، آب زیر زمینی در سفره با سرعت و دبی (در واحد سطح) ورودی v_{in} و

جدول ۲ - داده‌ها و نتایج آزمایشهای انتشار

شماره نمونه خاک	مدت زمان آزمایش (روز)	ارتفاع خاک (cm)	ارتفاع NaCl در منبع (cm)	θ (cm^3/cm^3)	C_o (mg/l)	C_b (mg/l)	ρ (g/cm^3)	$D_{e(\text{res})} \times 10^{10}$ (m^2/s)	$D_{e(\text{soil})} \times 10^{10}$ (m^2/s)
D1	۱۰	۱۲/۱	۳	۰/۴۳	۲۰۰۷	۳۷۳	۱/۴۱	۱/۴۹	۹/۶۸
D2	۱۰	۱۳	۳/۱	۰/۴۲	۲۱۰۰	۴۸۱	۱/۳۷	۱/۵۰	۹/۲۴
D3	۱۰	۱۲/۷	۳/۱	۰/۳۸	۱۹۸۰	۸۶۵	۱/۴۹	۴/۴۰	۱۰/۰
D4	۹	۱۱/۸	۳/۴	۰/۴۲	۱۹۹۵	۱۱۸	۱/۴۰	۴/۵۱	۹/۸۸
D5	۹	۱۱/۸	۳/۱	۰/۳۵	۱۹۱۳	۱۱۸	۱/۴۶	۷/۴۱	۸/۱۰
D6	۱۰	۱۱/۷	۳	۰/۳۹	۱۹۹۵	۱۱۸	۱/۴۱	۲/۳۱	۸/۷۳
D7	۱۰	۱۱/۸	۳	۰/۳۸	۲۰۵۰	۱۱۸	۱/۴۲	۳/۷۰	۷/۴۴
D8	۱۱/۸	۱۱/۷	۳/۴	۰/۳۰	۲۰۰۰	۱۱۸	۱/۷	۶/۲۵	۴/۶۳

۱ درجه رطوبت حجمی خاک

۲ غلظت اولیه یون کلر در مخزن هنگام شروع آزمایش

۳ غلظت پیشینه (background) یون کلر در خاک

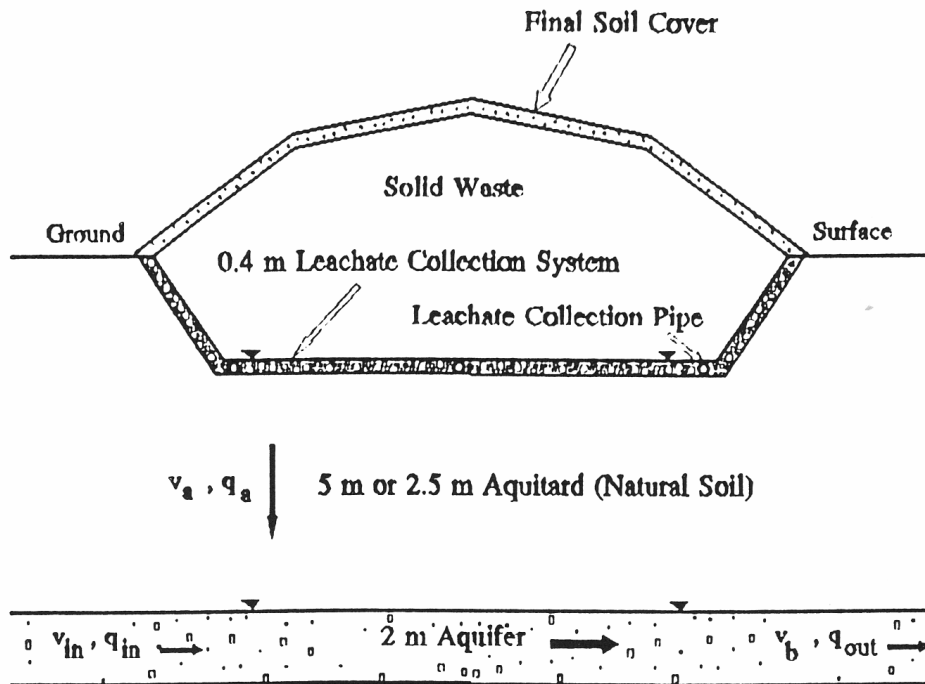
۴ دانسیته خشک خاک

شرط مرزی متفاوت (۱) غلظت ثابت ماده آلوده و (۲) جرم محدود ماده آلوده در نظر گرفته شدند [۱۱]. در حالت دوم برای زهکشهای شیرابه، دو حالت (۱) با جمع آوری شیرابه (m/a، متر در سال ۰/۲ و ۰/۱) و (۲) بدون جمع آوری شیرابه (m/a، متر در سال ۰/۰) در نظر گرفته شدند. حالت دوم به معنی انسداد زهکشها در اثر عوامل فیزیکی و شیمیایی است که در مدت زمان بهره برداری از مدفن امری محتمل محسوب می‌شود [۱۹]. ضخامت سفره آبدار ۲ متر و ابعاد مدفن در پلان ۲۰۰ متر طول (در جهت جریان آب در سفره آبدار) و ۱۰۰ متر عرض در نظر گرفته شده است. جدول (۳) داده‌های استفاده شده در محاسبات انتقال را برای چهار گزینه در نظر گرفته شده نشان می‌دهد.

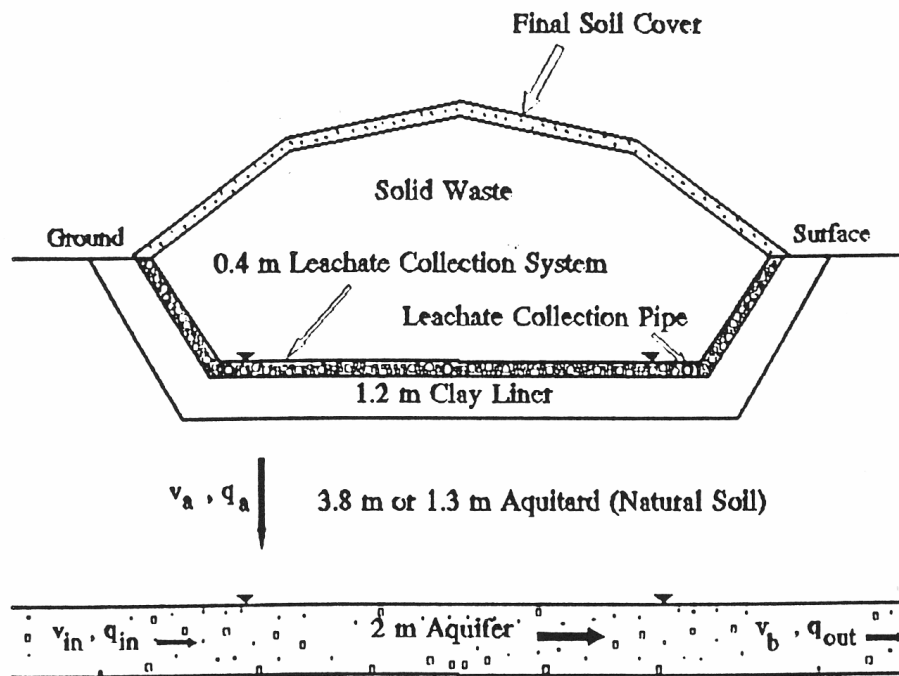
۳-۱ گزینه اول: مدفن غیر مهندسی

شکل (۲) مقطع عرضی یک مدفن غیر مهندسی را نشان می‌دهد. در کف مدفن هیچ لایه مهندسی (لایه زهکش شیرابه و لایه رسی کوبیده شده یا لاینر) تعبیه نشده، و زباله‌ها در تماس

q_{in} وارد شده و در پایین دست مدفن با سرعت و دبی (در واحد سطح) خروجی v_b و q_{out} خارج می‌شود. آب ورودی به سفره از بالا (q_a ، v_a) با آب ورودی افقی در سفره (q_{in} ، v_{in}) جمع شده و آب خروجی (q_{out} ، v_b) را تشکیل می‌دهد [۱۱]. شکل‌های (۲) تا (۴). پس از رسیدن به سفره آبدار حرکت افقی آب یونها را در جهت جریان آب زیر زمینی انتقال می‌دهد. در تمام گزینه‌ها محاسبات انتقال برای دو حالت متفاوت ۲/۵ متر و ۵/۰ متر برای ضخامت زمین طبیعی و همچنین دو ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی متفاوت (m/s) $5/0 \times 10^{-11}$ و بیست برابر آن یعنی (m/s) $1/0 \times 10^{-9}$ برای زمین طبیعی، انجام پذیرفت. انتخاب این محدوده از ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی برای خاک زمین طبیعی، به دلیل بافت نسبتاً متراکم خاک‌های ریزدانه سیلتی - رسی منطقه دفن زباله ارومیه بوده و از منابع اطلاعات موجود استخراج شده است [۱۸]. در هر گزینه، سرعت دارسی رو به پایین (v_a) و سرعت خروجی (v_b) براساس ضخامت لایه خاک و ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی آن محاسبه شد. در کف مدفن زباله نیز دو



شکل ۴ - شکل شماتیک مدفن زباله با زهکش سفره ای (گزینه سوم)



شکل ۵ - شکل شماتیک مدفن زباله با زهکش سفره ای و لایه رسی کوبیده شده (گزینه چهارم)

جدول ۳ - داده های استفاده شده در محاسبات انتقال آلودگی برای چهار گزینه مدفن

مقادیر	پارامترها
۱/۳ - ۲/۵ - ۳/۸ - ۵	ضخامت لایه خاک طبیعی (Aquitard) (m)
$۸/۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	ضریب انتشار موثر خاک طبیعی (m^2/s)
۱/۲	ضخامت لایه خاک کوبیده شده (Liner) (m)
$۴/۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	ضریب انتشار موثر خاک کوبیده شده (m^2/s)
۲	ضخامت سفره آبدار (m)
۰/۴۴	درجه تخلخل خاک طبیعی
۰/۳	درجه تخلخل خاک کوبیده شده
۰/۳۵	درجه تخلخل سفره آبدار
۱/۵	دانسیته خشک خاک طبیعی (g/cm^3)
۱/۷	دانسیته خشک خاک کوبیده شده (g/cm^3)
$۵/۰ \times ۱۰^{-۱۱}$ و $۱/۰ \times ۱۰^{-۹}$	ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی خاک طبیعی (m/s)
$۵/۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی خاک کوبیده شده (m/s)
۴۸۰۰	غلظت اولیه یون کلر در کف مدفن (mg/l)
۱۱۸	غلظت اولیه یون کلر در خاک (mg/l)
۰/۰۴۶ الی ۰/۰۰۱۷	سرعت داری رو به پائین، v_a (m/yr) ^۱
۶	سرعت ورودی آب در سفره آبدار، v_{in} (m/yr)
۰/۹۶ الی ۶/۶۱	سرعت خروجی آب در سفره آبدار، v_b (m/yr)
۱/۲ - ۰/۶ - ۰/۴	ارتفاع شیرابه در کف مدفن (m)
۰/۲ - ۰/۱ - ۰	میزان زهکشی شیرابه در لایه زهکش، Q_c (m/a)
۲۰۰	طول مدفن (m)
۱۰۰	عرض مدفن (m)

۱. (m/yr) به معنی متر بر سال است.

(طرح فوکوکا) استفاده شد. در میان مصالح سنگی زهکش لوله‌های پلی اتیلنی سوراخ دار برای جمع آوری و انتقال شیرابه از کف مدفن تعبیه شده‌اند. هرچند استفاده از این نوع سیستم جمع آوری شیرابه دیگر چندان متداول نیست لکن استفاده از این نوع زهکش در مدفن‌های زباله کشور به دلیل محدودیتهای اعتباری قدمی مثبت در جهت کنترل شیرابه می‌تواند محسوب شود. در مقایسه با گزینه اول، به دلیل وجود زهکشهای فرانسوی مقداری از شیرابه در کف مدفن

مستقیم با زمین طبیعی رسی هستند. ارتفاع شیرابه انباشته شده در کف مدفن ۱/۲ متر فرض شده است. در زیر لایه رسی، لایه آبدار وجود دارد که جریان آب زیر زمینی با سرعت مشخص به صورت افقی در آن جریان دارد.

۲-۳ گزینه دوم: مدفن با زهکشهای فرانسوی

شکل (۳) مقطع عرضی این گزینه از طرح مدفن را نشان می‌دهد. از این نوع زهکشها در مدفن آزمایشی کهریزک تهران

جمع آوری شده و ارتفاع انباشت شیرابه در کف کاهش خواهد یافت. بدین جهت این ارتفاع در محاسبات گزینه دوم حدود ۰/۶ متر فرض شده است. این میزان کاهش، باعث کاهش شیب هیدرولیکی و سرعت دارسی رو به پایین و کاهش سرعت خروجی از کف مدفن در سفره آبدار (v_b) خواهد شد.

۳-۳ گزینه سوم: مدفن با زهکش سفره‌ای

شکل (۴) مقطع عرضی این گزینه از طرح مدفن را نشان می‌دهد. در این طرح یک لایه زهکش شیرابه با ضخامت ۴۰ سانتی متر که از سنگدانه‌هایی به قطر ۲ الی ۵ سانتی متر تشکیل شده و به صورت سفره‌ای در سرتاسر کف و دیواره‌های مدفن امتداد دارد، استفاده شده است. زمین طبیعی زیر لایه زهکش از خاک ریز دانه تشکیل شده و دارای نفوذپذیری هیدرولیکی کمی است؛ در غیر این صورت نمی‌توان از زهکش استفاده کرد. به دلیل سهولت و راندمان بالای جمع آوری و انتقال شیرابه در این طرح، ارتفاع انباشت شیرابه در کف مدفن کم و حداکثر برابر با ضخامت لایه یعنی ۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در این طرح نیز دو حالت (۱) زهکشی صفر (انسداد زهکش) و (۲) زهکشی به میزان (متر در سال) $Q_c = 0/2$ در نظر گرفته شده است.

۳-۴ گزینه چهارم: مدفن با زهکش سفره‌ای و لایه رسی متراکم

مقطع عرضی این گزینه از طرح مدفن در شکل (۵) نشان داده شده است. در این طرح علاوه بر لایه زهکش سفره-ای شیرابه، یک لایه رسی کوبیده شده به ضخامت ۱/۲ متر و با ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی $(m/s) 5/0 \times 10^{-11}$ در زیر لایه زهکش و در روی زمین طبیعی اجرا شده است. این طرح به دلیل برخورداری از دو المان مهندسی (لایه های زهکش و لاینر رسی کوبیده شده) نسبت به سه طرح بالا مهندسی تر بوده و از نظر تیپ به مدفن استاندارد D Subtitle که دارای یک لایه ژئوممبرین بین لایه زهکش و لاینر رسی است، نزدیکتر است [۱۷]. در این طرح ضخامت لایه زمین طبیعی در یک حالت ۳/۸ متر

(مجموعاً با ضخامت لاینر رسی ۵ متر) و در حالت دیگر ۱/۳ متر (مجموعاً با ضخامت لاینر رسی ۲/۵ متر) در نظر گرفته شده است. در دو حالت فوق برای محاسبه سرعت دارسی رو به پایین، از ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی معادل دو لایه (لاینر رسی و لایه زمین طبیعی) استفاده شده است.

۴- مدل نظری مکانیزمهای حرکتی و شرایط مرزی

انتقال آلاینده‌ها از میان لایه های خاک با مکانیزمهای حرکتی جابه جایی با حرکت، و انتشار، به همراه عمل جذب و تجزیه، با معادله زیر تعریف می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

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

در این معادله θ درجه رطوبت حجمی خاک (در خاک اشباع همان درجه 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 دو ضریب انتشار موثر (D_e) و ضریب پخش شدگی مکانیکی (D_{md}) تشکیل شده است (L^2/T)، z عمق در خاک (L)، و v سرعت جریان آب زیر زمینی ($v = v_a/n$) است.

شرط مرزی در کف مدفن که در آن یونهای شیرابه با غلظت معین به لایه های زیرین خاک حرکت کرده و باعث کاهش غلظت در کف و در طول زمان می‌شود، با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$c_s(t) = c_0 - \frac{1}{H_f} \int_0^t f_s dt - \frac{q_c}{H_f} \int_0^t c_s(\tau) d\tau \quad (2)$$

در این معادله $c_s(t)$ غلظت یون در کف مدفن پس از مدت زمان t (M/L^3)، c_0 غلظت اولیه یون در کف مدفن، H_f ارتفاع معادل شیرابه در کف مدفن (و یا داخل لایه زهکش) (L)، f_s جرم یون عبور کرده در واحد سطح کف مدفن و در واحد زمان ($M/L^2/T$)، و q_c حجم شیرابه زهکشی شده از کف مدفن در واحد سطح و در واحد زمان ($L^3/L^2/T$) است.

شرط مرزی در سفره آبدار در زیر مدفن که یونهای

شیمیایی در طی مدت زمان معین پس از عبور از لایه‌های بالاتر به آن وارد می‌شوند، با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$c_R(t) = \int_0^t \left[\frac{f_R(\tau)}{h} \right] d\tau \quad (3)$$

در این معادله $c_R(t)$ غلظت یون در سفره آبدار (در مرز بین سفره و لایه بالاتر) 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) است.

حل معادله (۱) با شرایط مرزی تعریف شده توسط معادلات (۲) و (۳) توسط بوکزورو و با استفاده از روش لایه محدود ارائه شده [۱۴ و ۱۵] و در کد رایانه ای POLLUTE که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، تعبیه شده است [۱۱].

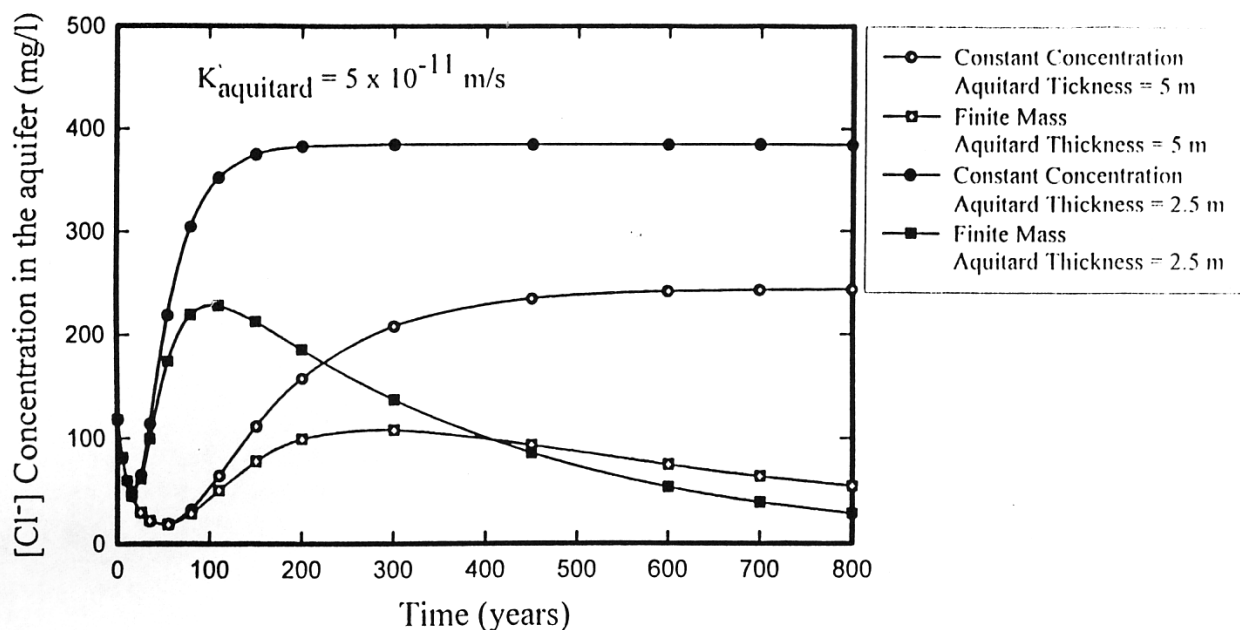
۵- بحث و نتیجه‌گیری

شرایط مرزی و هندسی متنوعی برای مدفن‌ها در محاسبات در نظر گرفته شده است و تاثیر این شرایط روی غلظت یون کلر در سفره آبدار در طول زمان، با هم مقایسه شده اند. به طور خلاصه این شرایط را در ۵ مورد می‌توان خلاصه کرد: (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی، (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن، (۴) تاثیر ضریب نفوذپذیری لایه زمین طبیعی (و یا سرعت دارسی رو به پایین)، و (۵) تاثیر سرعت خروجی از کف در سفره آبدار.

جدول (۳) تعدادی از داده‌های استفاده شده در محاسبات را برای هر چهار گزینه نشان می‌دهد. نتایج محاسبات به صورت نمودارهای غلظت یون کلر در سفره آبدار نسبت به زمان، در شکل‌های (۶) الی (۱۲) نشان داده شده اند. در زیر نتایج محاسبات برای هر گزینه به صورت مستقل مورد بحث قرار گرفته است. در خاتمه کلیه نتایج در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به صورت نمودار درختی نشان داده شده و چهار گزینه مدفن از نظر آلوده کردن سفره که همان بالا رفتن غلظت یون کلر از میزان استاندارد است، با هم مقایسه شده اند. به عنوان یک ویژگی مشترک برای هر چهار گزینه، نتایج

محاسبات در حالت شرط مرزی غلظت ثابت و شرط مرزی غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، نشان می‌دهد که در ابتدا در یک فاصله زمانی محدود، غلظت در سفره آبدار به میزانی کمتر از غلظت پیشینه خاک کاهش یافته، سپس تدریجاً افزایش می‌یابد. کاهش ابتدایی غلظت، در اثر نفوذ یونهای پیشینه خاک به داخل سفره و سپس شسته شدن این یونها در اثر حرکت افقی آب زیر زمینی در سفره با سرعت کف خروجی، است. در طی این مدت یونهای موجود در شیرابه، از کف مدفن، در جهت پایین به طرف سفره حرکت می‌کنند لکن با یک تاخیر زمانی به سفره می‌رسند. پس از رسیدن یونهای شیرابه به سفره آبدار (با مکانیزمهای حرکتی جابه جایی با حرکت و انتشار)، غلظت در سفره رو به افزایش می‌گذارد. در حالت شرط مرزی غلظت ثابت، این افزایش در طی مدت معین به یک میزان مشخص رسیده و سپس ثابت می‌ماند. لکن در حالت شرط مرزی با غلظت و یا جرم محدود، به دلیل محدود بودن تعداد یونها در شیرابه کف مدفن، غلظت در طی مدت معین به یک میزان حداکثر رسیده و سپس کاهش می‌یابد. در هر دو شرط مرزی فوق (و سایر حالت‌های در نظر گرفته شده)، معیار ارزیابی، افزایش غلظت در سفره آبدار از میزان استاندارد ۲۵۰ میلی گرم در لیتر است که در زیر برای هر گزینه مورد بحث قرار می‌گیرد.

مدفن غیر مهندسی: شکل (۶) تغییرات غلظت یون کلر در سفره آبدار را در طول زمان برای این نوع مدفن نشان می‌دهد. در حالتی که ضخامت زمین طبیعی ۵ متر است، با شرایط در نظر گرفته شده در هر دو حالت غلظت ثابت و جرم محدود، غلظت یون کلر هرگز به حد مجاز نمی‌رسد. لکن وقتی ضخامت زمین به ۲/۵ متر کاهش یابد، فقط در حالت غلظت ثابت، غلظت پس از حدود ۶۳ سال از حد مجاز تجاوز می‌کند. کاهش ضخامت زمین طبیعی باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی و سرعت دارسی و همچنین افزایش گرادیان غلظت (در اثر کوتاه شدن مسیر حرکت انتشاری) می‌شود. در نتیجه سرعت و



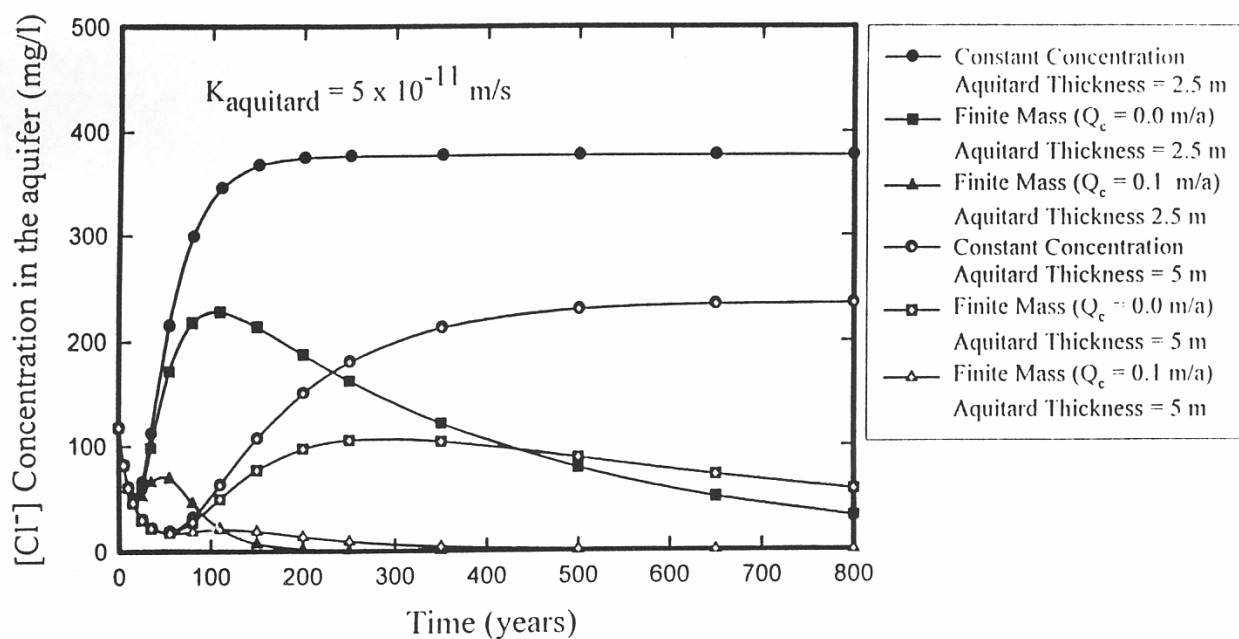
شکل ۶ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله غیرمهندسی (گزینه اول). (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی

غیر مهندسی، تاثیر مثبت زهکشی را در کنترل و کاهش غلظت در سفره نمایان می سازد. شکل (۸) نیز نتایج حالتی را که ضریب نفوذپذیری زمین به بیست برابر یعنی $1/0 \times 10^{-9}$ (m/s) افزایش یافته است، نشان می دهد. افزایش این ضریب باعث افزایش سرعت داری در لایه زمین طبیعی و افزایش سرعت کف خروجی در سفره می شود. در هر دو حالت غلظت ثابت و جرم محدود با عدم زهکشی، و ضخامت ۵ متر برای زمین طبیعی، پس از حدود ۳۵ سال غلظت در سفره به حد مجاز افزایش می یابد. در حالت جرم محدود و عدم زهکشی تغییرات غلظت در سفره به مدت حدود ۱۱۰ سال بالای حد مجاز باقی مانده و سپس کاهش می یابد (منحنی با مربعات توخالی). در صورت زهکشی، آلودگی در سفره با تاخیر یعنی پس از ۵۰ سال اتفاق می افتد (منحنی با مثلثهای توخالی).

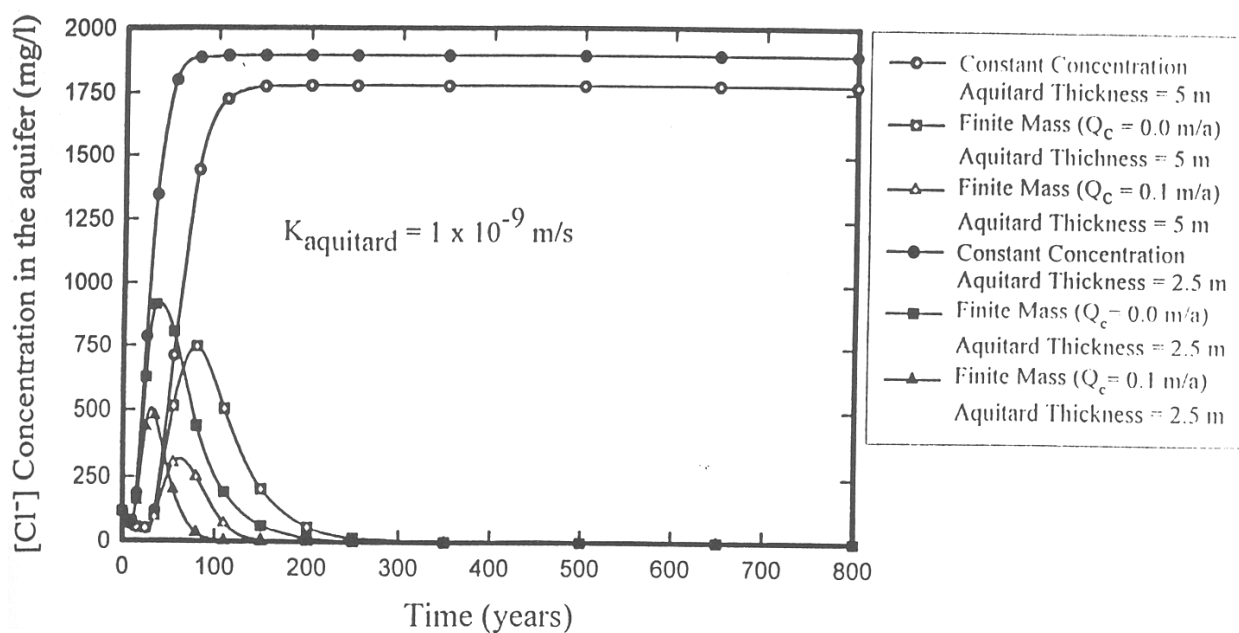
مدفن با زهکش سفره‌ای: نتایج محاسبات این مدفن در شکلهای (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در شکل (۹) که

میزان حرکت یونها با مکانیزمهای حرکتی جابجایی با حرکت و انتشار افزایش می یابد (این تاثیر برای سایر گزینه های مدفن در شرایط مشابه مصداق دارد که در ادامه بحث شده است).

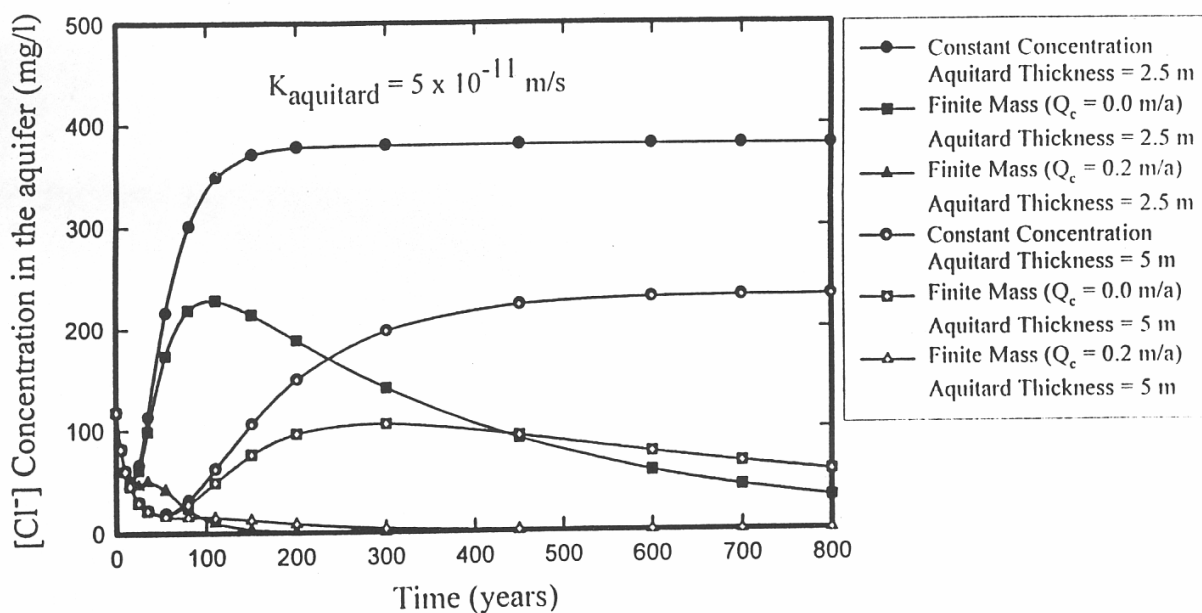
مدفن با زهکشهای فرانسوی: شکلهای (۷) و (۸) نتایج محاسبات این نوع مدفن را نشان می دهد. در شکل (۸) برای حالتی که ضریب نفوذ پذیری هیدرولیکی زمین طبیعی (m/s) $5/0 \times 10^{-11}$ است، تاثیر (۱) غلظت ثابت نسبت به جرم محدود، (۲) زهکشی شیرابه (به میزان ۰/۱ متر در سال) نسبت به عدم زهکشی (انسداد زهکش)، و (۳) ضخامت ۵ متر برای زمین طبیعی نسبت به ۲/۵ متر، روی تغییرات غلظت یون کلر در طول زمان، نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در حالت ضخامت ۵ متر برای زمین طبیعی در هیچ وضعیتی غلظت به حد مجاز نمی رسد، و در حالت ۲/۵ متر فقط در وضعیت غلظت ثابت پس از حدود ۶۳ سال غلظت در سفره از حد مجاز تجاوز خواهد کرد. مقایسه این نتایج با نتایج مدفن



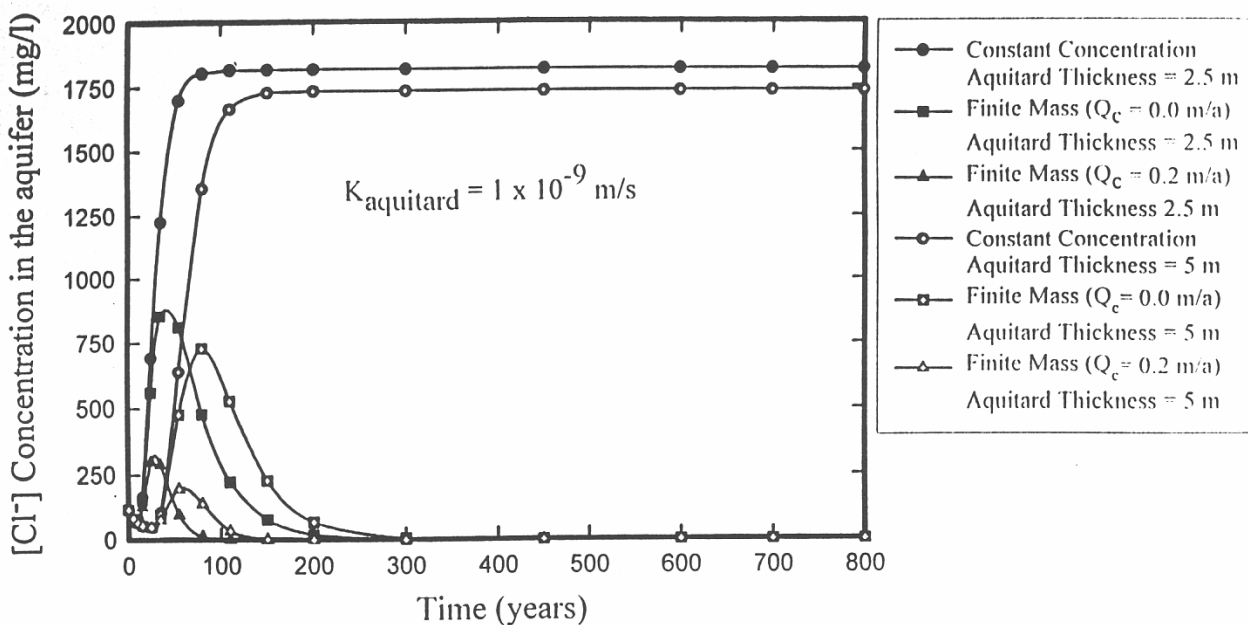
شکل ۷ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکشهای فرانسوی (گزینه دوم) در حالت (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی، $K_{aquitard} = 5 \times 10^{-11}$ (m/s)، (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن.



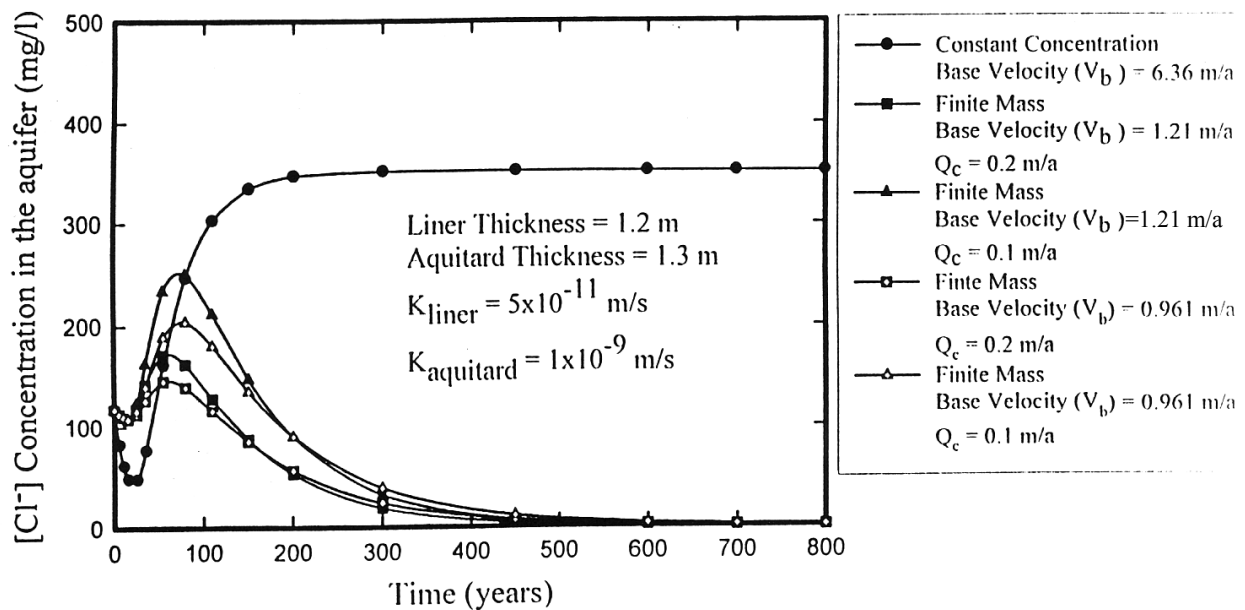
شکل ۸ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکشهای فرانسوی (گزینه دوم) در حالت (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی، $K_{aquitard} = 1 \times 10^{-9}$ (m/s)، (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن.



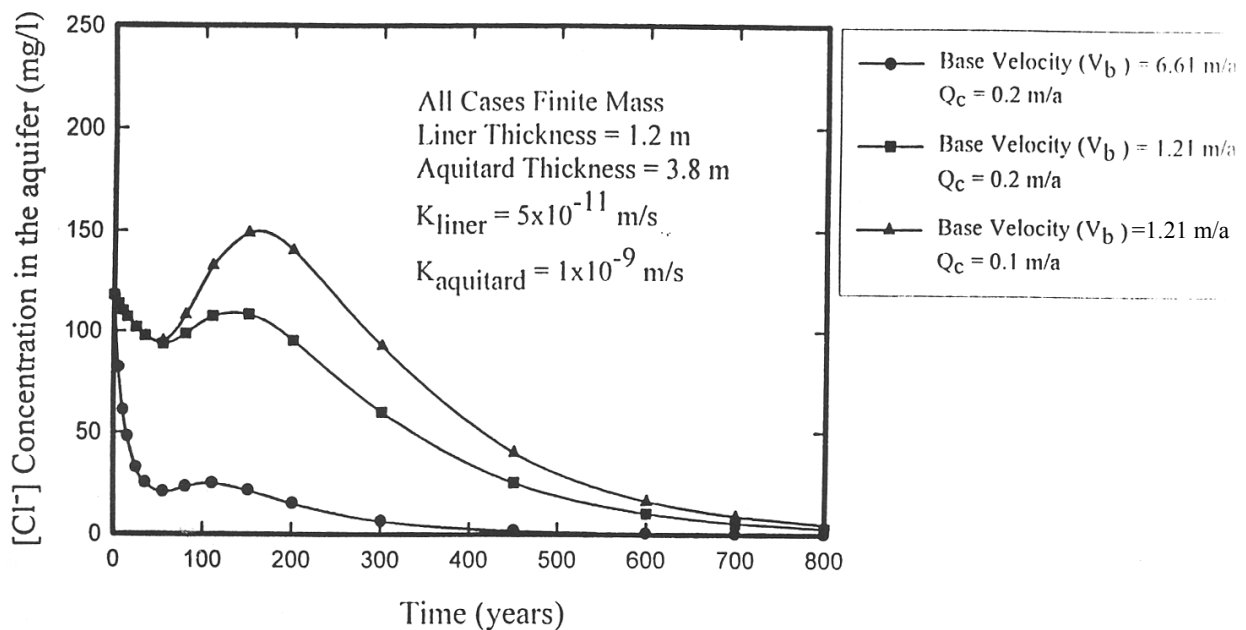
شکل ۹ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکش سفره ای (گزینه سوم) در حالت (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی، و (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن. $K_{aquitarad} = 5 \times 10^{-11}$ (m/s)



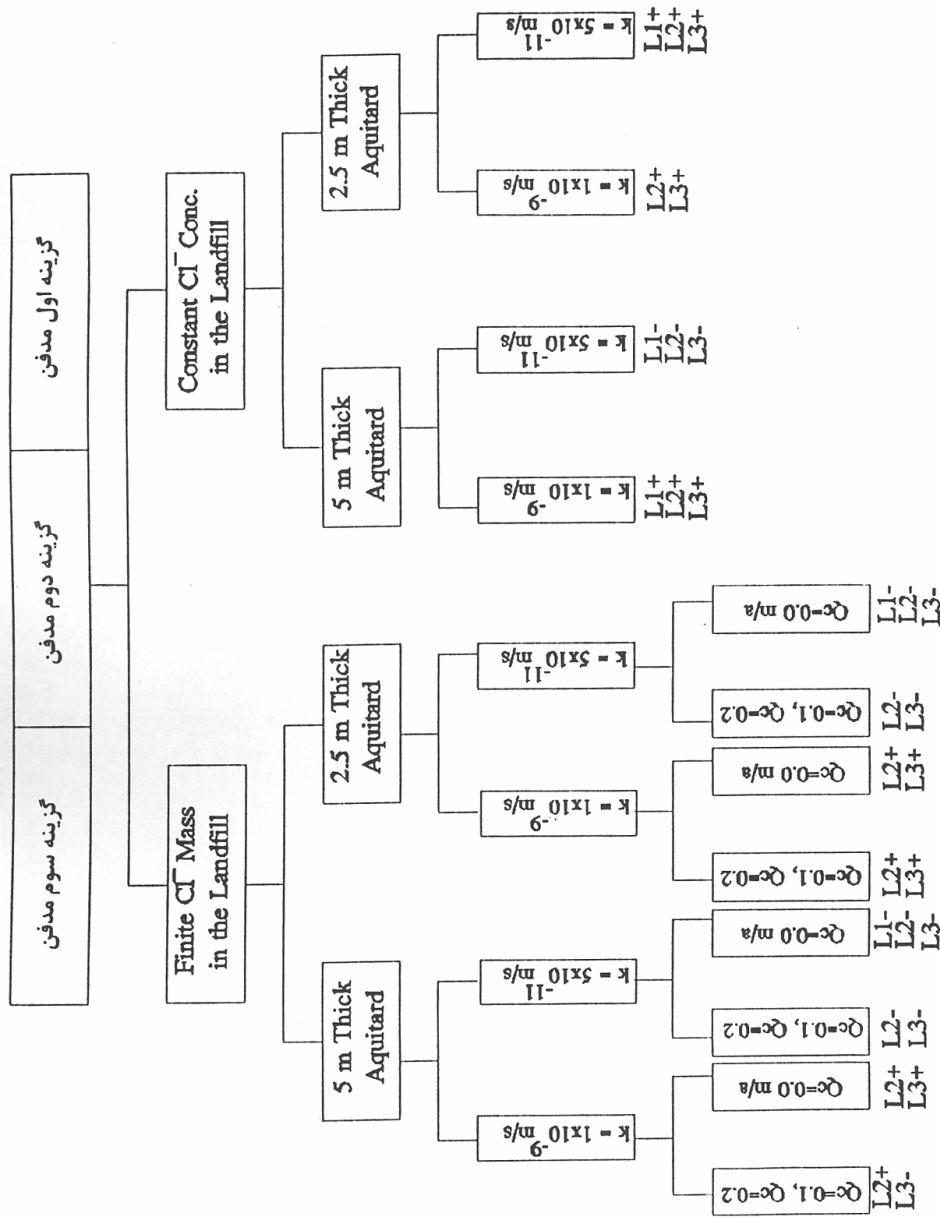
شکل ۱۰ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکش سفره ای (گزینه سوم) در حالت (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر ضخامت لایه زمین طبیعی، و (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن. $K_{aquitarad} = 1 \times 10^{-9}$ (m/s)



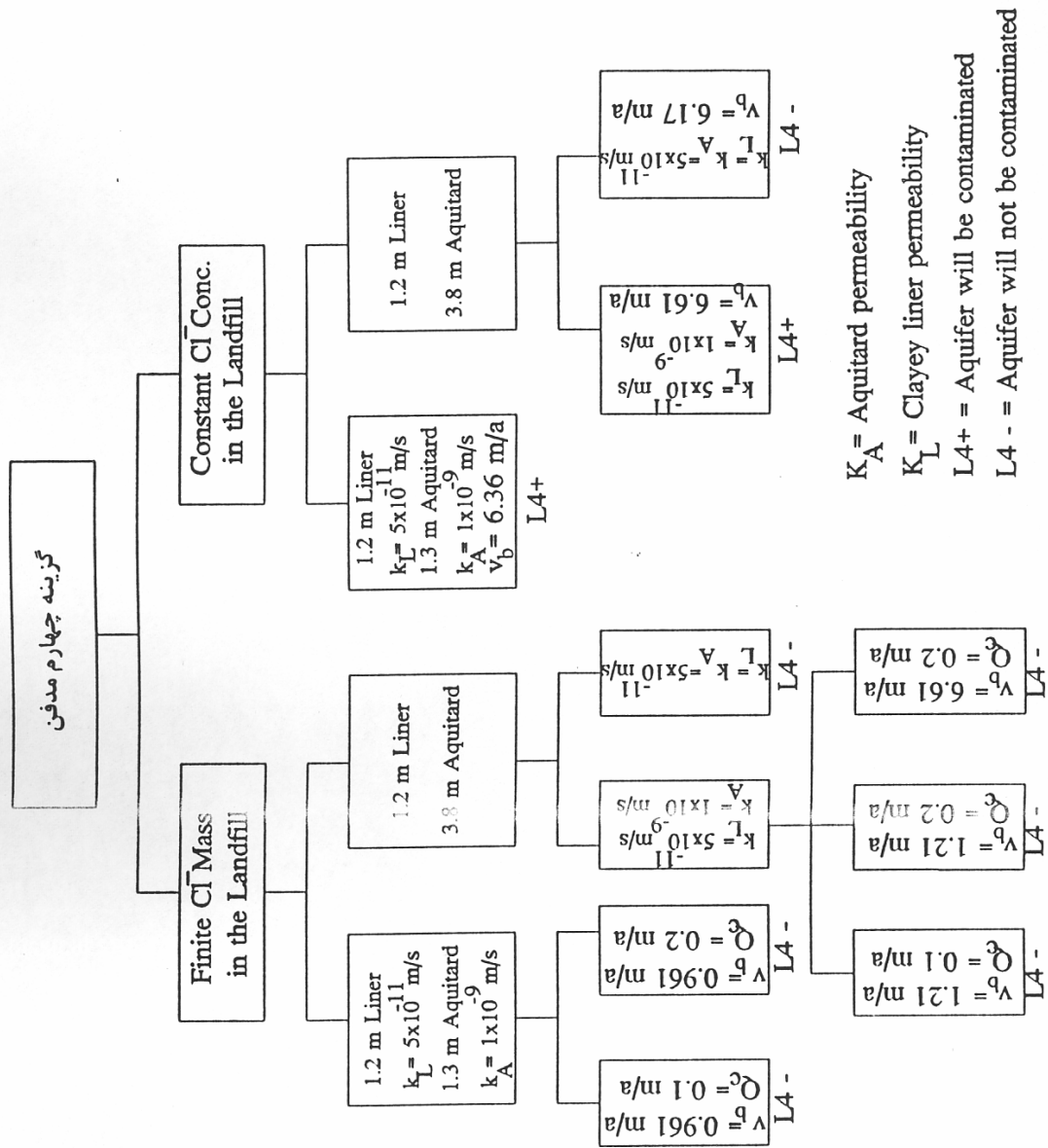
شکل ۱۱ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکش سفره ای و لاینر رسی کوبیده شده (گزینه چهارم) در حالت ضخامت ۱/۳ متری برای زمین طبیعی، (۱) تاثیر غلظت ثابت نسبت به غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۲) تاثیر میزان سرعت خروجی آب در سفره آبدار، و (۳) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن.



شکل ۱۲ - تغییرات غلظت یون کلر (Cl) در سفره آبدار نسبت به زمان در مدفن زباله با زهکش سفره ای و لاینر رسی کوبیده شده (گزینه چهارم) در حالت ضخامت ۳/۸ متری برای زمین طبیعی و غلظت یا جرم محدود در کف مدفن، (۱) تاثیر میزان سرعت خروجی آب در سفره آبدار، و (۲) تاثیر میزان زهکشی شیرابه در کف مدفن.



شکل ۱۳ - نمودار درختی شرایط در نظر گرفته شده برای گزینه های اول، دوم، و سوم مدفن زباله و نتایج محاسبات انتقال از نظر آلودگی یا عدم آلودگی سفره آبدار.



شکل ۱۴ - نمودار درختی شرایط در نظر گرفته شده برای گزینه چهارم مدفن زباله و نتایج محاسبات انتقال از نظر آلودگی یا عدم آلودگی سفره آبدار.

نتایج را برای حالت نفوذپذیری کم زمین طبیعی در زیر لایه زهکش نشان می‌دهد، تنها در حالت غلظت ثابت و ضخامت کم زمین، غلظت در سفره پس از حدود ۶۳ سال به حد مجاز می‌رسد. مطابق شکل (۱۰)، با افزایش بیست برابری ضریب نفوذپذیری زمین، در تمام حالتها به جز یک حالت (زهکشی شیرابه و زمین طبیعی ضخیمتر - منحنی با مثلث توخالی)، آلودگی سفره حتمی است و در این یک حالت زهکشی شیرابه توسط زهکش سفره ای به خوبی در کنترل و جلوگیری از آلودگی سفره نقش بازی می‌کند. نتایج برای حالت ۲/۵ متر برای زمین طبیعی نیز به صورت منحنیهای با دایره، مربع، و مثلث توخالی نشان داده شده است. از نتایج محاسبات در حالت نفوذپذیری بالای زمین طبیعی که منجر به آلودگی سفره می‌شود، می‌توان به لزوم تعبیه لایه رسی کوبیده شده (لاینر) در زیر لایه زهکش، پی برد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

مدفن با زهکش سفره ای و لایه رسی متراکم: شکلهای (۱۱) و (۱۲) نتایج محاسبات برای این طرح مدفن را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۱)، فقط در حالت غلظت ثابت، آلودگی در سفره آبدار اتفاق می‌افتد لکن در بقیه حالت ها طرح در نظر گرفته شده به خوبی قادر به کنترل و جلوگیری از آلودگی سفره است. کاهش سرعت خروجی در سفره نیز باعث کاهش غلظت در سفره می‌شود. شکل (۱۲) نتایج محاسبات را برای وضعیت زمین طبیعی ضخیمتر در حالت جرم محدود نشان می‌دهد. مطابق این نتایج در شرایط مختلف در نظر گرفته شده برای زهکشی شیرابه و سرعت خروجی سفره، آلودگی در سفره آبدار

واژه‌نامه

2. aquitard

مراجع

۱. بدو، ک، "تحقیق در وضعیت منابع آب زیر زمینی مورد

اتفاق نمی‌افتد. نقش موثر لایه زهکش سفره ای شیرابه به همراه لاینر رسی کوبیده شده، در کنترل و کاهش آلودگی سفره آبدار، به خوبی در نتایج حاصله مشهود است.

نتیجه‌گیری کلی: به منظور نتیجه‌گیری کلی، نتایج به دست آمده در محاسبات چهار گزینه از طرحهای مدفن که در شکلهای (۶) الی (۱۲) نشان داده شدند، در دو نمودار درختی شماره (۱۳) (گزینه‌های مدفن ۱ و ۲ و ۳) و شماره (۱۴) (گزینه مدفن ۴) نشان داده شده‌اند. به عنوان مثال در این نمودارها کلمه L2- به معنی گزینه (لندفیل) شماره ۲ (مدفن با زهکش فرانسوی) و علامت منفی (-) جلوی آن، به معنی عدم آلودگی سفره (غلظت یون کلر کمتر از حد مجاز ۲۵۰ میلی گرم در لیتر) است. علامت مثبت (+) نیز به معنی آلوده شدن سفره است. مطابق این دو نمودار درختی و با مقایسه نتایج محاسبات، می‌توان گزینه چهارم را به عنوان یک طرح بهینه در طراحی مدفنهاى نیمه مهندسی در کشور استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

کار این مطالعه قسمتی از نتایج پروژه تحقیقاتی - ملی خاتمه یافته به شماره ثبت ۱۳۵۳ در شورای محترم پژوهشهای علمی کشور است که با بودجه تخصیص یافته توسط سازمان محترم مدیریت و برنامه ریزی کشور انجام پذیرفته است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

1. finite layer technique

استفاده جهت آب شرب شهری و منابع آلاینده در شهر

11. Rowe, R.K., and Booker, J.R., "POLLUTE v.6 1D Pollutant Migration Through a Non-Homogeneous Soil," © 1983, 1990, 1994, Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada, Fax: 905-725-9657, e-mail: support@gaea.ca, 1994.
12. Badv, K., and Abdolalizadeh, R., "A Laboratory Investigation on the Hydraulic Trap Effect in Minimizing Chloride Migration Through Silt," *Iranian Journal of Science and Technology*, Transaction B, Vol. 28, No. 1, pp. 107-118.
13. Rowe, R.K., and Badv, K., "Chloride Migration Through Clayey Silt Underlain by Fine Sand or Silt," American Society of Civil Engineers, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 1, pp. 60-68, 1996.
14. Rowe, R.K., Booker, J.R., and Quigley, R.M., *Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*, E & F N Spon (Chapman & Hall), London, p. 390, 1995.
15. Rowe R.K., and Booker J.R., *An Efficient Analysis of Pollutant Migration Through Soil*, Numerical methods of transient and coupled systems, R.W. Lewis, E. Hinton, P. Bettess, and B.A. Schrefler, eds., John Wiley and Sons, Ltd., New York, N.Y., Ch. 2, pp.13-42, 1987.
16. Shackelford, C.D., and Daniel, D.E., "Diffusion in a Saturated Soil. II. Results for Compacted Clay," *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 117: 485-505, 1991.
17. US EPA, "Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities," EPA/625/6-88/018, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH., USA.
18. وزارت نیرو، شرکت مهندسين مشاور الكتروپروژكت، ۱۳۵۰. هیدروژئولوژی دشت ارومیه، جلد ۹/۱.
19. McIsaac, R.S., Rowe, R.K., Fleming, I.R., and Armstrong, M.D., "Leachate Collection System Design and Clog Development," Proceedings of the 6th Environmental Engineering Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineers, London, Canada, Vol. 2, pp. 1340-1349, June-2000.
۲. اردو، ك، "مواد آلاینده موجود در شیرابه تولیدی از محل‌های دفن زباله شهری ارومیه و اثرات آن روی منابع آب سطحی و زیر زمینی منطقه،" گزارش پژوهشی، شورای پژوهش‌های علمی کشور، ۱۸۰ صفحه، ۱۳۸۰.
3. Loizidou, M., and Kapetanios, E.G., *Effect of Leachate from Landfills on Underground Water Quality*, The Science of the Total Environment, Elsevier Science Publishers B.V., Volume 128, pp. 69-81, 1993.
4. Chen, P.H., and Wang, C.Y., "Investigation into Municipal Waste Leachate in the Unsaturated Zone of Red Soil," *Environment International*, Vol. 23, No. 2, pp. 237-245, 1997.
5. Rowe, R.K., Caers, C. J., Reynolds, G., and Chan, C., "Design and Construction of Barrier System for the Halton Landfill," *Canadian Geotechnical Journal* 37 (3): 662-675, 2000.
6. Gartner Lee Ltd., "Halton Waste Management Site 1998 Monitoring report," Report to the Regional Municipality of Halton, Gartner Lee Ltd., Markham, Ontario, Canada, 1999.
۷. اردو، ك، "یافتن طرح‌های بهینه و نمونه اقتصادی برای محل‌های دفن مهندسی - بهداشتی مواد زائد جامد در ایران." گزارش پژوهشی، شورای پژوهش‌های علمی کشور، ۱۵۱ صفحه، ۱۳۸۰.
8. Christopher, M. P., *Principles of contaminant hydrogeology*, Lewis Publishers, Second Edition, p. 235, 1996.
9. US EPA, Office of Groundwater Protection, "Safe Drinking Water Act (SDWA), Washington D.C. 1986.
10. WHO, "Guidelines for Drinking Water Quality," Vol. 1: Recommendations. World Health Organization, ISBN: 92 4 154168 7, 1984.