

# مدلسازی انتقال شیرابه در کف محلهای دفن با استفاده از مدل

## ریاضی POLLUTE

علی دریابیگی زند<sup>۱</sup>، اکبر باغوند<sup>۲</sup>

دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده علوم محیطی<sup>۱</sup>

a\_d\_zand@yao.com

دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست<sup>۲</sup>

baghvand@ut.ac.ir

### چکیده

دفن، سرنوشت نهایی تمام مواد زائدی است که ارزشی ندارند و باید دور ریخته شوند. دفن بهداشتی روشی مهندسی جهت دفن مواد زائد جامد در زمین، جهت جلوگیری از آسیب به محیط زیست می باشد. بسیاری از محلهای دفن در ایران فاقد لاینرهای مهندسی می باشند. در عین حال نشت آلاینده ها از لاینرها نیز در طول عمر محل دفن محتمل است. لذا پیش بینی انتقال و حرکت آلاینده ها در محل دفن به لایه های زیرین الزامی می باشد. بدین منظور ابتدا می بایست اصول مهم در انتقال شیرابه در کف محل دفن مورد بحث قرار گیرد؛ چنانچه در این مقاله ارائه شده است. این مقاله به معرفی یک مدل ریاضی کاربردی در انتقال شیرابه در محل دفن به نام POLLUTE می پردازد و اصول به کار رفته در آن جهت پیش بینی غلظت آلاینده های موجود در شیرابه را مورد بررسی قرار می دهد. استفاده از مدل های ریاضی کاربردی و قابل اطمینان در مطالعات ارزیابی خطر آلودگی آب زیرزمینی در محل دفن، می بایست به عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر در دستور کار متولیان پسماند در کشور قرار گیرد.

### واژه های کلیدی

شیرابه، مدلسازی، محل دفن، خاک، POLLUTE

## ۱- مقدمه

دفن بهداشتی یک روش اقتصادی برای دفع نهایی مواد زائد جامد بوده و پیش بینی می شود این روند در سالهای آتی نیز به ویژه در کشور ایران ادامه پیدا کند. تعداد محلهای دفنی که مجهز به لاینر می باشند در ایران نادر می باشد. محلهای دفن قدیمی تر غالباً فاقد لاینر بوده و تکیه اصلی در آنها بر تقلیل طبیعی بار آلودگی شیرابه در لایه های خاک غیر اشباع که زیر محل دفن قرار گرفته اند و نیز کاهش آنها در آبخوان به واسطه فرایندهای بیولوژیکی و فیزیکی - شیمیایی می باشد. از طرفی در محلهای دفن جدید و مدرن که مجهز به لاینر می باشند نیز احتمال انتقال آلودگی و نشت ترکیبات مختلف از کف محل دفن به سمت لایه های زیرین وجود دارد. نشت آلاینده های آلی و معدنی از محل دفن می تواند موجب آلودگی لایه های خاک در زیر محل دفن و نهایتاً منابع آب زیرزمینی گردد [۲،۱].

انتقال شیرابه محل دفن در خاکها متأثر از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختلف بوده و این عوامل بر غلظت نهایی آلاینده ها در خاک و آب زیرزمینی تأثیرگذارند. لذا درک صحیح از انتقال شیرابه در خاک زیر محل دفن به منظور پیش بینی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی در اثر شیرابه محل دفن امری ضروری می باشد. تعداد محلهای دفن مجهز به لاینرهای مهندسی در کشور بسیار اندک است و از طرفی به دلیل محدودیتهای اقتصادی و فنی، مجهز کردن کلیه آنها به لاینرهای نفوذناپذیر، لااقل تا چند سال آتی، بسیار دشوار و بعید می نماید لذا تکیه اصلی در این محلها بر توانایی طبیعی لایه های زیرین محل دفن در تقلیل بار آلودگی شیرابه می باشد. همچنین با توجه به پرهزینه بودن مطالعات صحرائی و عدم امکان بررسی کیفیت و کمیت انتقال آلاینده ها در یکایک محلهای دفن در کشور، مدلهای ریاضی می توانند به عنوان ابزاری مهم در ارزیابی اثرات شیرابه و انتقال آلاینده های موجود در آن در لایه های زیرین محل دفن و متعاقب آن تصمیم گیری برای اقدامات پیشگیرانه و یا کنترلی مورد استفاده قرار گیرند.

تا کنون مدلهای زیادی جهت پیش بینی حرکت آلاینده ها در کف محل دفن ایجاد شده اند [۴،۳] لیکن غالب آنها تنها به حل معادلات حرکت پرداخته اند بدون آنکه اثر مکانیسمهای جذب و واپاشی آلاینده ها را در معادلات خود لحاظ کنند. این فرایندها می توانند موجب کاهش حرکت از طریق کاهش جرم آلاینده موجود گردند. مدلی که قادر باشد ترکیبی از معادلات حرکت و واکنشهای بیولوژیکی و شیمیایی را در خود داشته باشد کلید درک صحیح از حرکت شیرابه در زیر محل دفن و مدیریت توانمند این مشکل می باشد که در مدل POLLUTE لحاظ شده است. در این مقاله مفاهیم اساسی در انتقال شیرابه در زیر محل دفن و مدلسازی انتقال و حرکت شیرابه در آن با استفاده از تئوریهای بکار رفته در نرم افزار POLLUTE ارائه شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- شیرابه و حرکت آن در محل دفن

تولید شیرابه یکی از مشکلات اساسی در محلهای دفن زباله می باشد. به ویژه در کشور ایران با توجه به بالا بودن میزان رطوبت زباله حجم شیرابه اولیه تولیدی در محلهای دفن نسبت به کشورهای صنعتی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر است. همچنین این مشکل در شهرهای شمالی کشور که میزان بارندگی در سال بالا بوده و از طرفی سطح آب زیرزمینی بالا می باشد بسیار حادتر است. برخی مطالعات محدود صورت گرفته در ایران نظیر مطالعه ای که توسط رقیمی و همکاران (۱۳۸۳) [۱] در گرگان انجام گرفت نشان داد منابع آب اطراف محل دفن، آلوده به شیرابه شده اند. این امر مؤید حرکت و انتقال شیرابه در زیر محلهای دفن می باشد.

جدول ۱: ترکیب معمول شیرابه در محلهای دفن مواد زائد جامد شهری [۷،۶،۵]

اجزاء	مقدار اجزاء ( بر حسب میلی گرم در لیتر شیرابه)	
	مقدار معمول	دامنه تغییرات
BOD <sub>5</sub>	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰-۳۰۰۰
COD	۱۸۰۰۰	۳۰۰۰-۴۵۰۰۰
TOC (کل مواد آلی کربنی)	۶۰۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰۰
مواد جامد معلق	۵۰۰	۲۰۰-۱۰۰۰
نیتروژن آلی	۲۰۰	۱۰-۶۰۰
نیتروژن آمونیاکی	۲۰۰	۱۰-۸۰۰
نیترات	۲۵	۵-۴۰
فسفر کل	۳۰	۱-۷۰

۲۰	۱-۵۰	اورتو فسفر
۳۰۰۰	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	قلیائیت (بر حسب $\text{CaCO}_3$ )
۶	۵/۳-۸/۵	PH
۳۵۰۰	۳۰۰-۱۰۰۰۰	سختی کل (بر حسب $\text{CaCO}_3$ )
۱۰۰۰	۲۰۰-۳۰۰۰	کلسیم
۲۵۰	۵۰-۱۵۰۰	منیزیم
۳۰۰	۲۰۰-۲۰۰۰	پتاسیم
۵۰۰	۲۰۰-۲۰۰۰	سدیم
۵۰۰	۱۰۰-۳۰۰۰	کلرور
۳۰۰	۱۰۰-۱۵۰۰	سولفات
۶۰	۵۰-۶۰۰	آهن

شیرابه حاوی مواد محلول، معلق و یا ذرات مخلوطی از اجزاء زباله می باشد که ورود آن به منابع آب، مخاطرات بهداشتی و زیست محیطی زیادی را موجب می گردد. شیرابه تمامی مواد بیولوژیکی و شیمیایی موجود در مواد زائد را همراه دارد. زمانیکه میزان رطوبت زباله از حداکثر ظرفیت نگهداشت زباله بیشتر شود، رطوبت اضافی به صورت شیرابه آزاد می گردد. ترکیب معمول شیرابه در محل های دفن مواد زائد در جدول ۱ آمده است. ترکیباتی که در جدول ۱ نشان داده شده اند مربوط به زمانی است که مواد زائد خطرناک که حاوی فلزات سنگین و مواد سمی نظیر کادمیم، سرب، جیوه و غیره هستند، به همراه سایر زائدات دفن نشده باشند. انتخاب یک محل دفن مناسب تأثیر زیادی در کنترل حرکت شیرابه دارد. مناسب ترین مواد برای محدود کردن شیرابه در محل های دفن مواد زائد، پوشش های رسی می باشند زیرا هدایت هیدرولیکی پایین و قابلیت جذب بالایی دارند [۷]. البته شیرابه هایی که دارای محلول های آلی یا نمک های اسیدی و قلیایی هستند موجب ایجاد شکستگی و نیز مجاری نشستی در پوشش های رسی می گردند. در عین حال می توان حساسیت رسیها را با افزودن پلیمرهایی به آنها، در برابر این آلاینده ها کاهش داد [۸].

به طور کلی در شرایط معمول، شیرابه در کف زمین های محل دفن مواد زائد ایجاد می گردد. نکته ای که می بایست به آن توجه گردد آنست که تقریباً هیچیک از محل های دفن مواد زائد در کل طول عمر مفید خود، به طور کامل نفوذ ناپذیر باقی نمی ماند. شیرابه نشت کرده از محل دفن (با و بدون لاینر) به لایه های زیرین انتقال می یابد. نشت و حرکت شیرابه غالباً عمودی می باشد ولی می تواند حرکت جانبی نیز داشته باشد که معمولاً مقدار آن ناچیز بوده و از آن صرف نظر می گردد [۷]. در عین حال چگونگی حرکت شیرابه در لایه های زیر محل دفن بستگی به مشخصه های خاک محل دفن دارد.

## ۲-۱- مکانیسم های انتقال شیرابه در محل دفن

یک ماده نفوذپذیر محیطی است که امکان نفوذ یا تراوش ماده دیگری که معمولاً مایع یا گاز است در آن وجود دارد. نفوذپذیری خاک محل دفن که غالباً رس می باشد در برخی موارد به دلیل اندرکنش با اجزاء شیرابه افزایش یا کاهش می باشد و یا انسداد منافذ خاک در اثر واکنش های فیزیکی (تجمع ذرات ریز دانه در منافذ)، شیمیایی (واکنش شیرابه با خاک) و بیولوژیکی (رشد بیوفیلیم در اطراف ذرات و کاهش تخلخل مؤثر) عملاً ممکن است باعث تغییرات عمده ای در ویژگی های نفوذپذیری خاکها گردد. انتقال آلاینده های موجود در شیرابه در خاک، بسته به اشباع بودن یا نبودن خاک، عمدتاً متأثر از فرایندهایی مانند همرفت (advection)، پخش (diffusion) و پراکنش (dispersion) می باشد [۹، ۱۰]. این مکانیسمها در ادامه به اختصار معرفی شده اند.

انتقال همرفتی: همرفت عبارتست از حرکت آلاینده همراه با آب در حال حرکت. این حالت شبیه به وضعیتی است که یک جسم روی تسمه نقاله قرار گیرد. به محض اینکه جسم روی تسمه نقاله قرار گرفت، جسم با سرعت تسمه نقاله به حرکت در می آید. سرعت حرکت آلاینده به وسیله همرفت، همان سرعت آب زیرزمینی می باشد. لازم به ذکر است که اگر جریانی وجود نداشته باشد، حرکت آلاینده در خاک در اثر همرفت وجود نخواهد داشت.

انتقال پخشی: پخش عبارتست از حرکت آلاینده از نقاطی با پتانسیل یا غلظت شیمیایی بالاتر به نقاطی با پتانسیل یا غلظت شیمیایی کمتر. این مکانیسم مهمترین عامل کنترل حرکت آلاینده های موجود در شیرابه در خاک غیراشباع کف محل دفن می باشد.

پراکنش: هنگامیکه حرکت آلاینده همراه با جریانهای نسبتاً زیاد باشد (چنانچه در بسیاری از آبخوان ها همینطور است) یک مکانیسم انتقال سوم مطرح می گردد که به آن پراکنش مکانیکی می گویند. این فرایند شامل اختلاطی است که به دلیل تغییرات محلی سرعت جریان آب زیرزمینی رخ می دهد. پراکنش آلاینده ها همچنین شامل اختلاط و انتشار آلاینده به دلیل غیر همگن بودن آبخوان می باشد. اگرچه این مکانیسم کاملاً با فرایند پخش متفاوت است، برای اغلب مقاصد عملی می توان آنرا مانند مکانیسم های قبلی مدل کرد. تاکنون مدل های زیادی در کشورهای پیشرفته در خصوص انتقال آلاینده ها در خاک ایجاد شده است که غالباً برای خاکهای اشباع مورد استفاده بوده اند و تنها تعداد کمی به محیط خاکهای نیمه اشباع پرداخته اند.

### ۳- تئوری به کار رفته در مدل انتقال POLLUTE

حرکت یا انتقال آلاینده ها از میان خاک جهت پیش بینی اثر آلاینده موجود در شیرابه یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در کشورهای پیشرفته، به ویژه در سالهای اخیر بوده است. در بسیاری موارد حرکت آلاینده ها در خاک زیر محل دفن عمدتاً در یک جهت بوده و می توان از حرکت جانبی آن صرف نظر کرد. در این موارد مدل POLLUTE یکی از ابزارهای قوی و قابل اطمینان جهت پیش بینی غلظت آلاینده های موجود در شیرابه با توجه به معادله همرفت- پراکنش برای ساختار خاک لایه لایه در زیر محل دفن می باشد.

یک مدل انتقال آلاینده شامل معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی و اولیه می باشد. وقتی مدل فرمولبندی شد و پارامترهای مربوطه تعیین شد آنگاه می بایست یک حل برای معادلات حاکم به توجه به شرایط مرزی و اولیه موجود به دست آورد. مرسومترین روشهای حل را می توان به پنج دسته تقسیم بندی کرد: حل تحلیلی، روش لایه محدود، المان مرزی، تفاضل محدود و المان محدود. هر یک از این روشها دارای مزایا و معایب خود می باشند، به عنوان نمونه روش المان محدود علیرغم قابلیت های بالا معمولاً پیچیده بوده و حجم محاسباتی قابل توجهی را در بر می گیرد.

در مدل انتقال POLLUTE از روش لایه محدود (Finite layer) استفاده شده است. این روش در مواردی کاربرد دارد که لایه های افقی داشته باشیم به گونه ای که مشخصه های خاک در طول هر منطقه افقی درون لایه یکسان باشد. در چنین شرایطی معادلات حاکم با انجام یک تبدیل لاپلاس به طور قابل ملاحظه ای ساده شده و سپس معادلات تبدیل یافته حل می شوند. تفاوت این روش و روش تحلیلی از این واقعیت نشأت می گیرد که در روش لایه محدود که در مدل POLLUTE از آن استفاده شده است، حل به صورت عددی انجام می گیرد و نه به صورت تحلیلی. در نتیجه می توان شرایط پیچیده تر و واقعی تر را نیز بررسی کرد. نرم افزار تهیه شده بر اساس این مدل قادر است غلظت آلاینده در زمانها و عمقهای مورد نظر کاربر را با سرعت و دقت بالا محاسبه کند. در غالب مدل های انتقال تأثیر سیال نفوذ کرده بر تغییر مشخصات اولیه خاک در مدل وارد نشده است لیکن در مدل POLLUTE، جذب و تجزیه آلاینده های موجود در شیرابه نیز مورد توجه قرار گرفته است [۷].

برای شرایطی که در آن یک آستر رسی بر روی یک لایه زهکش قرار گرفته است (این لایه زهکش قابل پمپاژ بوده و یا بر روی یک آبخوان طبیعی باریک قرار گرفته است) یک برآورد اولیه معقول از اثر آلاینده را می توان با استفاده از برنامه های لایه محدود یک بعدی مانند برنامه POLLUTE به دست آورد. طراحی این برنامه به منظور نشان دادن انتقال یک بعدی به سمت پایین، از میان لایه های کم تراوا که در زیر محل دفن قرار دارند (معمولاً خاکهای رسی) به درون آبخوان یا لایه زهکش انجام می گیرد. همچنین حذف آلاینده به دلیل جریان جانبی یا پمپاژ از این لایه های تراوا نیز به طور تقریبی در محاسبات این برنامه در نظر گرفته می شود. این مدل یک برآورد قابل اطمینان از حداکثر میزان غلظت در زیر محل دفن و زمان وقوع آنرا به دست می دهد.

روشهای لایه محدود دارای بسیاری از مزایای روشهای تحلیلی می باشند. این روش به ویژه برای انجام مطالعات دقیق جهت تعیین اثر بالقوه عدم قطعیت در خصوص مقدار پارامترهای کلیدی در طراحی بسیار مناسب می باشد. همچنین برای بررسی صحت نتایج مربوط به روشهای المان محدود و تفاضل محدود می توان از روش لایه محدود استفاده کرد. کار کردن با نرم افزار POLLUTE بر مبنای این روش ایجاد شده است ساده بوده و نیازی به تخصص داشتن کاربر در استفاده از روشهای عددی ندارد. تعداد ورودی در این مدل، حداقل بوده و نتایج را فقط برای زمانها و مکانهای مورد نظر بدست می دهد. به عبارت دیگر یکی از مزایای روش لایه محدود نسبت به روش متعارف المان محدود این است که در این روش نیازی به انجام محاسبه در زمانهایی قبل از زمان مطلوب وجود ندارد. این امر به سرعت و کم هزینه تر شدن انجام محاسبات کمک می کند.

### ۴- فرمولبندی مدل POLLUTE

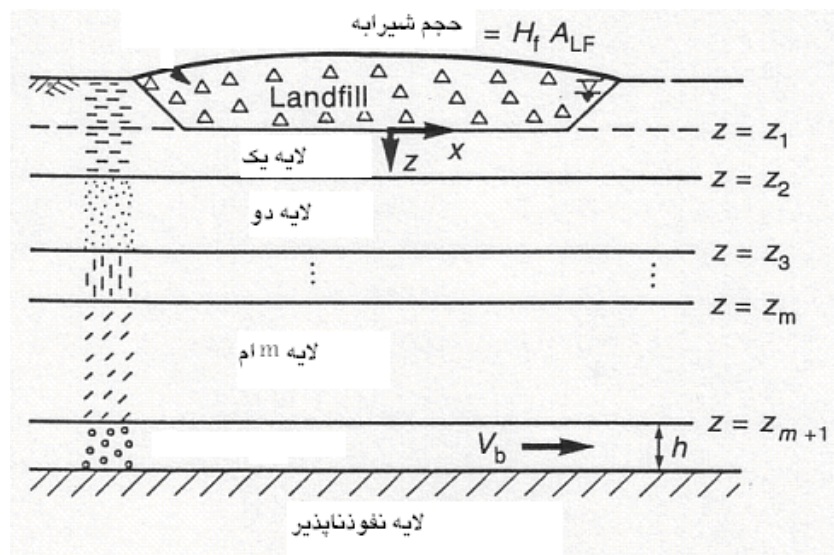
در این مدل انتقال آلاینده ها به صورت یک بعدی در توده رسی در جهت محور Z، مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. فرض می شود این توده به وسیله صفحات گرهی  $Z = Z_0, Z_1, \dots, Z_n$  به تعدادی لایه تقسیم شود. هر لایه  $(Z_{k-1} < Z < Z_k)$  به صورت همگن در نظر گرفته می شود. در نتیجه شار عمودی در واحد سطح در واحد زمان در هر نقطه از لایه k به وسیله رابطه ۱ بیان می شود [۷]:

$$f_z = nv_z c - nD_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

در این رابطه C غلظت در عمق Z و زمان t است، f شار جرمی در جهت Z، و n تخلخل مؤثر خاک و v سرعت تراوایی می باشد. معادله انتقال جرم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$nD_{zz} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - nv_z \frac{\partial c}{\partial z} = (n + \rho K_d) \frac{\partial c}{\partial t} + n\lambda c \quad (2)$$

که در آن  $k_d$  ضریب توزیع،  $\rho$  چگالی خشک خاک و  $\lambda = \Gamma_R + \Gamma_B + \Gamma_S$  ثابت واپاشی درجه اول می باشد. که در آن  $\Gamma_R$  ثابت واپاشی رادیواکتیو،  $\Gamma_B$  ثابت واپاشی بیولوژیکی و  $\Gamma_S$  جریان خروجی از واحد حجم خاک در یک لایه نفوذ پذیر در زیر محل دفن است. مقادیر n،  $D_{zz}$ ،  $v_z$ ،  $k_d$  و  $\rho$  برای لایه مفروض k ثابت در نظر گرفته می شوند. فرض می شود از قبل، هیچ توزیعی از آلاینده در توده زیر محل دفن وجود نداشته است یعنی در زمان صفر غلظت نیز صفر در نظر گرفته می شود.



شکل ۱: سیستم چند لایه زیر محل دفن

روابط ۱ و ۲ با انجام تبدیل لاپلاس زیر ساده می شوند:

$$(\bar{c}, \bar{f}_z) = \int_0^{\infty} (c, f_z) e^{-st} dt$$

$$\bar{f}_z = nv_z \bar{c} - nD_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (3)$$

لذا داریم:

$$nD_{zz} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} - nv_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = nS \bar{c} \quad (4)$$

که در آن:

$$S = \left(1 + \frac{\rho K_d}{n}\right)s + \lambda \quad (5)$$

معادلات فوق دارای حل هایی به صورت زیر می باشند:

$$\bar{c} = Ae^{\alpha z} + Be^{\beta z} \quad (6)$$

$$\bar{f}_z = nD_{zz}(\beta Ae^{\alpha z} + \alpha Be^{\beta z})$$

که A و B ثابتهایی هستند که باید تعیین شوند و :

$$\alpha = \frac{v_z}{2D_{zz}} + \left(\frac{v_z^2}{4D_{zz}^2} + \frac{S}{D_{zz}}\right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{v_z}{2D_{zz}} - \left(\frac{v_z^2}{4D_{zz}^2} + \frac{S}{D_{zz}}\right)^{1/2}$$

اگر ثابتهای A و B که در رابطه ۶ وجود دارند بر حسب غلظتها در صفحات گرهی  $Z_j$  و  $Z_k$  ( $j=k-1$ ) برآورد شوند خواهیم داشت:

$$\bar{c} = \bar{c}_j \left\{ \frac{e^{\alpha(z-z_k)} - e^{\beta(z-z_k)}}{e^{\alpha(z_j-z_k)} - e^{\beta(z_j-z_k)}} \right\} + \bar{c}_k \left\{ \frac{e^{\alpha(z-z_j)} - e^{\beta(z-z_j)}}{e^{\alpha(z_k-z_j)} - e^{\beta(z_k-z_j)}} \right\} \quad (8)$$

و در نتیجه:

$$\frac{\bar{f}_z}{nD_{zz}} = \bar{c}_j \left\{ \frac{\beta e^{\alpha(z-z_k)} - \alpha e^{\beta(z-z_k)}}{e^{\alpha(z_j-z_k)} - e^{\beta(z_j-z_k)}} \right\} + \bar{c}_k \left\{ \frac{\beta e^{\alpha(z-z_j)} - \alpha e^{\beta(z-z_j)}}{e^{\alpha(z_k-z_j)} - e^{\beta(z_k-z_j)}} \right\} \quad (9)$$

اینک امکان برآورد شار در هر صفحه گرهی با استفاده از رابطه ۹ وجود دارد و ماتریس زیر حاصل می گردد:

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{zj} \\ -\bar{f}_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_k & R_k \\ S_k & T_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{c}_j \\ \bar{c}_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن:

$$Q_k = \frac{nD_{zz}(\beta e^{\mu\beta} - \alpha e^{\mu\alpha})}{e^{\mu\beta} - e^{\mu\alpha}}$$

$$R_k = -\frac{nD_{zz}(\beta - \alpha)}{e^{\mu\beta} - e^{\mu\alpha}}$$

$$S_k = -\frac{nD_{zz}(\beta - \alpha)e^{\mu(\beta+\alpha)}}{e^{\mu\beta} - e^{\mu\alpha}}$$

$$T_k = \frac{nD_{zz}(\beta e^{\mu\alpha} - \alpha e^{\mu\beta})}{e^{\mu\beta} - e^{\mu\alpha}}$$

در این روابط  $\mu = Z_k - Z_{k-1}$  . یادآوری می شود که  $f_z$  و  $c$  هر دو باید پیوسته باشند. ماتریس لایه که در رابطه ۱۰ نشان داده شده است را برای لایه های توده زیر محل دفن بسط می دهیم تا به ماتریس ۱۱ برسیم. اندیس T نشان دهنده مقادیر مربوط به بالای توده و اندیس b مربوط به مقادیر کف توده می باشد. این معادله با توجه به شرایط مرزی قابل حل می باشد.

$$\begin{bmatrix} Q_1 & R_1 & & & & \\ S_1 & T_1 + Q_2 & R_2 & & & \\ & S_2 & T_2 + Q_3 & R_3 & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & \cdot & & \\ & & S_{n-1} & T_{n-1} + Q_n & R_n & \\ & & & S_n & T_n & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{c}_T \\ \bar{c}_1 \\ \bar{c}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{c}_{n-1} \\ \bar{c}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{f}_T \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ -\bar{f}_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

شرایط مرزی در کف یک سیستم لایه ای را می توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\bar{f}_b = Q_{n+1} \bar{c}_b \quad (12)$$

که  $Q_{n+1} = hn_b S_b$  و رابطه  $S_b$  به صورت زیر است:

$$S_b = s + \lambda_b = s + \Gamma_R + \Gamma_{Bb} + \frac{V_b}{n_b L} \quad (13)$$

که در آن  $h$  = عمق آبخوان،  $n_b$  = تخلخل آبخوان،  $\bar{c}_b$  = غلظت در آبخوان،  $\bar{f}_b$  = جریان ورودی به آبخوان از لایه رسی،  $s$  = متغیر تبدیل لاپلاس،  $v_b$  = سرعت داری در آبخوان و  $L$  = طول محل دفن به موازات جهت جریان در آبخوان می باشد. شرایط مرزی در بالای یک سیستم لایه ای به صورت زیر می باشد:

$$\bar{f}_T = B_0 - T_0 \bar{c}_T \quad (14)$$

$$B_0 = H_r c_0 \text{ و } T_0 = H_r S_T$$

که در آن:

$c_0$  = غلظت اولیه آلاینده در محل دفن،  $\bar{c}_T$  = غلظت آلاینده در محل دفن،  $\bar{f}_T$  = شار ورودی به لایه رسی از محل دفن و  $H_r$  = ارتفاع معادل شیرابه (بستگی به حجم شیرابه در واحد سطح محل دفن دارد) می باشد. لذا داریم:

$$S_T = s + \lambda_T = s + \Gamma_R + \Gamma_{Bb} + \frac{q_c}{H_r} \quad (15)$$

که در آن  $q_c$  برابر حجم شیرابه جمع آوری شده در واحد سطح محل دفن است. جایگذاری مقادیر مربوط به  $\bar{f}_b$  و  $\bar{f}_T$  در معادلات ۱۲ و ۱۴ یکسری معادلات کامل را بدست می دهد که می توان آنها را به صورت رابطه کلی ۱۶ نوشت:

$$\begin{bmatrix} Q_1 & R_1 & & & & \\ S_1 & T_1 + Q_2 & R_2 & & & \\ & S_2 & T_2 + Q_3 & R_3 & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & \cdot & & \\ & & S_{n-1} & T_{n-1} + Q_n & R_n & \\ & & & 0 & S_n T_n + Q_{n+1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{c}_T \\ \bar{c}_1 \\ \bar{c}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{c}_{n-1} \\ \bar{c}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

که  $C_z$  غلظت در صفحه لایه ای  $Z = Z_j$  است. نهایتاً ماتریس ۱۶ قابل حل بوده و بدین ترتیب مقدار  $\bar{C}_j$  در هر صفحه گرهی بدست می آید. تبدیل لاپلاس انجام شده در ابتدای محاسبات به سادگی با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط Talbot قابل معکوس کردن می باشد [۱۱]. مدل POLLUTE دارای دقت تا ۶ رقم اعشار (با داشتن ۱۱ نقطه نمونه) و دقت تا ۹ رقم اعشار (با داشتن ۱۸ نقطه نمونه) می باشد. در بسیاری از مسائل عملی، دقت شش رقم اعشار کافی و یا حتی بیشتر از دقت مورد نیاز می باشد.

#### ۴-۱- شرایط مرزی در مدل POLLUTE

در مدل POLLUTE دو دسته شرایط مرزی وجود دارد، یکی در بالا و یکی در پایین لایه ها. مرز بالا معمولاً نقطه تماس با منبع آلاینده (جرم محدود یا غلظت ثابت) بوده و مرز پایین معمولاً نقطه تماس با آبخوان (جریان خروجی ثابت) یا سنگ بستر (جریان صفر) می باشد. شرایط مرزی جرم محدود برای معرفی منبع آلاینده نظیر محل دفن به کار می رود که در آن، جرم آلاینده محدود است و غلظت آلاینده که در منبع مشخص است، با انتقال آلاینده به داخل لایه های زیرین، کاهش می یابد. همچنین می توان برای غلظت آلاینده در آبخوانی که زیر محل دفن قرار گرفته است نیز شرایطی را تعریف کرد زیرا غلظت آلاینده در آبخوان با انتقال جرم به داخل آن، در طول زمان تغییر می کند. آلاینده پس از ورود به آبخوان با سرعت افقی حرکت کرده و از محل دفن دور می شود. به طور کلی محاسبات این روش بر خلاف روشهای المان محدود و تفاضلات محدود، وقتگیر نبوده و نیز با داشتن ورودیهای نسبتاً کم در این روش می توان خروجیهای با دقت بالا بدست آورد. به علاوه یک مزیت عمده این مدل نسبت به مدلهای مشابه آنست که تعیین غلظت در یک زمان خاص مستقل از زمانهای پیشین بوده و یا به عبارت دیگر برای محاسبه غلظت در یک زمان نیاز به انجام محاسبات پرهزینه و وقتگیر برای زمانهای پیشین در این مدل وجود ندارد.

#### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

پیش بینی حرکت و انتقال آلاینده های موجود در شیرابه در کف محل دفن در ارزیابی ریسک آلودگی آب زیرزمینی و طرحریزی سناریوهای پایش و پالایش امری ضروری می باشد. با توجه به آنکه روش اصلی دفع در ایران تلبار زباله و در برخی موارد دفن بهداشتی می باشد و نظر به محدودیتهای فنی و اقتصادی موجود، استفاده از مدلهای کارآمد و قابل اطمینان در این زمینه ضروری می باشد. مدل ریاضی POLLUTE که فرمولبندی آن بر اساس روش لایه محدود می باشد مدلی نسبتاً ساده با خروجی های مطمئن در بررسی غلظت اجزاء شیرابه در لایه های خاک زیر محل دفن در زمانها و اعماق دلخواه می باشد. نسخه تجاری این مدل هم اکنون به طور گسترده در بسیاری کشورهای نظیر کانادا مورد استفاده بوده و در انتخاب محل مناسب برای محل دفن و پیش بینی غلظت آلاینده ها در لایه های مختلف زیر محل دفن، توسط مهندسان و محققان به کار گرفته می شود. به علاوه این مدل با اندکی تغییر امکان بررسی حرکت آلاینده ها در محیطهای متخلخل ترک خورده را نیز مهیا می سازد. مدلسازی نشت انتقال آلاینده ها در محل دفن کشور در شرایط کنونی می بایست به عنوان یکی از شاخه های مهم و اصلی در مباحث مدیریت مواد زائد جامد گنجانده شده و حمایتهای علمی و مالی جهت ایجاد مدلهای جدید و نیز خریداری و کاربرد مدلهای مناسب موجود انجام گیرد. همچنین پیشنهاد می گردد مطالعات مربوط به پیش بینی انتقال آلاینده ها در کف محل دفن با توجه به سناریوهای مختلف و ویژگی های محل (ساختار خاک، سطح آب زیرزمینی و غیره)، به طور جدی در مباحث ارزیابی زیست محیطی محل دفن و ارزیابی ریسک آلودگی آب زیرزمینی گنجانده شود.

#### مر ا ج ع

[۱] رقیمی، م.، شاه پسندزاده، م.، سیدخادمی، س.م.، "بررسی کیفیت شیمیایی آبهای زیرزمینی در مجاورت محل دفن مواد زائد شهر گرگان"، محیط شناسی، ۳۰، ۷۷-۸۴، ۱۳۸۳.

- [2] R. K. Rowe, and J. Booker, "Two-dimensional pollutant migration in soils of finite depth," Can. Geotech. J., vol.22, pp. 429-436, 1985.
- [3] J. Islam, and N. Singhal, "A one-dimensional reactive multi-component landfill leachate transport model," Environ. Model. Soft., vol. 1, pp. 531-543, 2002.
- [4] A. Brun, P. Engesgaard, T. H. Christensen, and D. Rosbjerg, "Modelling of transport and biogeochemical processes in pollution plumes: Vejen landfill, Denmark," J. Hydro., vol. 256, pp. 228-247, 2002.
- [5] R. K. Rowe, R. M. Quigley, R. W. Brachman, and J. R. Booker, Barrier systems for waste disposal facilities, 2<sup>nd</sup> ed., Spon Press: New York, 2004, pp. 173-198.
- [6] A. Bouazza, "Geosynthetic clay liners," Geotex. Geomem., vol. 20, pp. 3-17, 2002.



- [7] L. M. Chu, and K. C. Cheung, "Variations in the chemical properties of landfill leachate, " Environ. Manage., vol. 18, pp. 105-117.
- [8] M. P. Papadopoulou, G. P. Karatzas, and G. G. Bougioukou, "Numerical modelling of the environmental impact of landfill leachate leakage on groundwater quality – a field application," Environ. Model. Assess., vol. 12, pp. 43-54, 2007.
- [9] L. B. Jorstad, J. Jankowski, and R. I. Acworth, "Analysis of the distribution of inorganic constituents in a landfill leachate contaminated aquifers Astrolabe Park, Sydney, Australia," Environ. Geo., vol. 46, pp. 263-272, 2004.
- [10] D. Fatta, A. Papadopoulos, and M. Loizidou. "A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area," Environ. Geochem. Health, vol. 21, pp. 175-190, 1999.
- [11] A. TALBOT, "The accurate numerical inversion of Laplace transforms," J. Math. Appl., vol 23, pp. 97-120, 1979.