بررسی انواع روش های آزمایشگاهی، تحقیقات صحرایی و ژئوفیزیکی برای مطالعات ژئوزیست محیطی لندفیل های زباله جامد

عبدالحسین حداد[۱]، امیرحسین رفیعیان[۲]، مهدی خیرخواهان[۳]، دانیال رضازاده عیدگاهی[۴]

۱-دانشیار، دانشگاه سمنان، ahadad@semnan.ac.ir

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان، A.H.Rafiean@semnan.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران- عمران، دانشگاه سمنان، Meehdikheirkhahan@gmail.com

۴- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان، d.rezazade@gmail.com

تاریخ دریافت:۹۶ تاریخ پذیرش:۹۶

چکیده

امروزه یکی از معضلات شهری مدیریت پسماند جامد شهری است که عدم مدیریت مناسب باعث ایجاد لندفیل های غیر استاندارد زباله شهری در گوشه و کنار شهرها شده است. جدای از استانداردهای لازم برای مکان یابی و ایزولاسیون این مناطق که موضوع این تحقیق نیست، شناخت و مونیتورینگ این مناطق برای ارزیابی و بررسی آلوده بودن یا نبودن و همچنین جلوگیری از انتشار آلودگی احتمالی و همچنین در موارد معدود، شناخت خصوصیات مکانیکی، ژئوتکنیکی و ژئوزیست محیطی خاک این مناطق برای مهندسان و مدیران شهری امر بسیار مهمی به شمار می رود. در این تحقیق سعی شده است روش های مورد استفاده برای شناخت و ارزیابی این لندفیل ها در سه بخش روش های ژئوفیزیکی، مطالعات برجای صحرایی و آزمایش های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت به عنوان مطالعه موردی، تحقیق صورت گرفته در پنج کشور شامل برزیل، اسکاتلند، ترکیه، ایالات متحده و چین معرفی شده اند.

واژگان کلیدی

تحقیقات صحرایی، لندفیل زباله جامد، ژئوزیست محیطی، زباله جامد شهری (MSW).

۱- مقدمه

رابطه ی متقابل انسان ها و طبیعت و یا فرآیند قابل تغییر در استفاده از منابع، هدایت سرمایه گذاری‌ها و سمت‌گیری توسعه‌ی فناوری، توسعه‌ی پایدار می‌باشد. توسعه پایدار در واقع تحولی اساسی است که با نیازهای اکنون و آینده‌ی انسان سازگار باشد. از دیدگاه زیست محیطی، توسعه پایدار، هنگامی تحقق می یابد که بر پایه ی اصول بوم شناسی استوار باشد. توجه به مواردی همچون گازهای گلخانه ای، تغییرات آب و هوایی، نابودی لایه ی ازن، تخریب زمین، کاهش منابع تجدیدناپذیر و آلودگی هوای شهرها در گستره ی پیشرفت پایدار می گنجد [1].

با توجه به پیشرفت روزافزون صنعت و از سوی دیگر توسعه شهری امروزه با گسترش زباله های جامد شهری (MSW) و زباله های صنعتی و در نتیجه لندفیل های این زباله ها در اطراف شهرها مواجه ایم. به طور مثال سالانه بیش از ۷۰۰۰ تن زباله جامد در شهر تهران تولید می شود. این لندفیل ها عامل اصلی بسیاری از آلودگی های زیست محیطی در اکوسیستم منطقه به وسیله انتشار آن در هوا، خاک و بخصوص سفره آب زیرزمینی است که می تواند تبعات جبران ناپذیری برای سلامت انسان و سایر جانداران داشته باشد. از سوی دیگر با توجه به رفتار ژئوتکنیکی پیچیده و گاهی غیرقابل پیش بینی این نوع خاک ها در بسیاری از مناطق شاهد خطراتی نظیر عدم پایداری در لغزش، نشست های نامتعارف، شکاف در زمین و سایر مسائل هستیم[5]–[2]. بسته به ویژگی های لندفیل مورد مطالعه مانند نوع آب و هوای منطقه، نوع غالب زباله های جامد، روش های ارزیابی و سایر مسائل پارامترهای ژئوتکنیکی خاک متفاوت است و مقالات متنوعی از کارهای صورت گرفته در اقصی نقاط دنیا در دسترس است. وزن مخصوص، درصد رطوبت، نسبت تخلخل و نفوذپذیری وابستگی زیادی به نوع ترکیبات غالب مواد زباله موجود در لندفیل بستگی دارد.

ازین رو شناخت و آگاهی نسبت به پارامترهای ژئوتکنیکی و زیست محیطی این لندفیل ها می تواند ما را با خطرات و پیامد های بالقوه و بالفعل این مناطق آشنا کند تا بتوان با شناخت کامل تصمیم

درست را نسبت به آن اتخاذ نمود. برای این منظور آزمایش های مختلفی در حیطه های مختلف پیشنهاد شده است، نظیر آزمایش های ژئوفیزیکی به منظور تهیه نقشه ها و خصوصیات کلی لندفیل، آزمایش های برجا برای شناخت خصوصیات خاک محل و آزمایش های آزمایشگاهی به منظور صحت سنجی و مکمل برای سایر آزمایش هایی که انجام شده است. در این تحقیق سعی شده تا با اقتباس از پروژه های بررسی شده در نقاط مختلف دنیا و بررسی انواع روش های تحقیقات صحرایی، شامل آزمایش های برجا و آزمایشگاهی و همچنین مطالعات ژئوفیزیکی، روش های مناسب برای این کار بررسی و ارزیابی شود. همچنین در انتها چند مورد نمونه موردی مورد مطالعه قرار گرفته در کشورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بررسی روش های ژئوفیزیکی

آزمایش های ژئوفیزیکی[۱] از آزمایش های غیرمستقیم و غیرمخرب تحقیقات صحرایی است. از مزیت های این روش این است که می توان منطقه وسیعی را با هزینه به نسبت پایین مورد مطالعه قرار داد. خروجی اولیه این آزمایش عموما یک نقشه است که ویژگی های مختلف منطقه مورد مطالعه، مانند ضریب هدایت الکتریکی را در اختیار قرار می دهد. با تفسیر این نتایج می توان دید کلی نسبت به ویژگی های منطقه، مناطق مناسب برای انجام آزمایش های برجا و سایر پارامترها به دست آورد. از طرف دیگر می توان از نتایج این آزمایش، خصوصا آزمایش های الکتریکی، پارامترهای ژئولوژیکی، ژئوتکنیکی، هیدرولوژیکی و زیست محیطی سایت مورد مطالعه را به دست آورد. از جمله مهمترین پارامترهایی که می توان از این روش بدست آورد می توان به عمق بستر سنگی،ناپیوستگی در لایه ها، تغییر بافت خاک، سطح آب زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی، وجود یا عدم وجود زباله های شهری و صنعتی در لایه ها، خاک های آلوده و بررسی سلامت آب زیرزمینی اشاره کرد [6].

از میان روش های ژئوفیزیکی موجود، برای مطالعه لندفیل به دلایل اقتصادی، غیرمخرب بودن و سرعت بالا، روش مقاومت سطحی (ERT) توصیه شده است، این روش این مزیت را دارد که شن ها و ماسه های نفوذپذیر را از رس تشخیص می دهد و ازین رو می توان شناخت اولیه خوبی را از منطقه بدست آورد[6]. از این روش برای تهیه نقشه لندفیل (Raynold و Taylor در سال ۱۹۹۶، Bernstone و Dahlin در سال ۱۹۹۷)، پارامترهای ترکیبی (Yuval و Oldenburg در سال ۱۹۹۶، Bernstone و همکاران در سال ۲۰۰۰، Guerin و همکاران در سال ۲۰۰۴) و ارزیابی آلودگی سنگ بستر (Aristodemou و Thomas-Betts در سال ۲۰۰۰، Yoon و همکاران در سال ۲۰۰۳، Abu-Zeid و همکاران در سال ۲۰۰۴، Naudet و همکاران در سال ۲۰۰۴) استفاده شده است. در بسیاری از کارهای صورت گرفته از روش 2D ERT استفاده شده است ولی به دلیل ناهمگونی در لندفیل ها، روش 3D ERT می تواند اطلاعات دقیق تری را در اختیار قرار دهد (Chambers و همکاران در سال ۱۹۹۹، Ogilvy و همکاران در سال ۱۹۹۹، Dahlin و همکاران در سال ۲۰۰۲، Oglivy و همکاران در سال ۲۰۰۲، Chmbers و همکاران در سال ۲۰۰۵، Chambers و همکاران در سال ۲۰۰۶ [8]).

گاهی برای دستیابی به اطلاعات موثق و کافی نیاز به اطلاعات بیشتری از سایت لندفیل است که در این حالت روش های ژئوفیزیکی به تنهایی پاسخگوی نیاز محققان نیست. در این حالت می توان از آزمایش های برجای ژئوتکنیکی نظیر SPT، CPT، RCPT و سایر روش ها استفاده کرد که در قسمت های بعدی به آن می پردازیم.

۳- بررسی روش های آزمایش های برجای صحرایی

بررسی خصوصیات و ویژگی های لندفیل و مطالعات آن مربوط به علوم مختلف مهندسی نظیر ژئوتکنیک، زمین شناسی و مهندسی محیط زیست می شود. مطالعات ژئوزیست محیطی کامل نیاز به بررسی چینه شناسی و بررسی لایه های مختلف زمین، مطالعات ژئوتکنیکی، شناخت آبخوان و برخی از پارامترهای زیست محیطی دارد[6]. انجام آزمایش های ژئوفیزیکی و آزمایش های برجای ژئوتکنیکی می تواند نتایج جامعی در مورد شناخت لندفیل در اختیار ما قرار بدهد. برای این کار تیاز به نمونه گیری و انجام آزمایش های مختلف نظیر گمانه زنی، ایجاد ترانشه و یا آزمایش های صحرایی نفوذی است تا بتوان به شناخت کاملی از شرایط لندفیل دست یافت.

از آزمایش های صحرایی نفوذی برای شناسایی جنس لایه های مختلف زمین، خصوصیات مکانیکی لایه های مختلف زمین،

---

۱. در اکتشافات ژئوفیزیکی برخی از مهمترین خواص فیزیکی زمین توسط ابزارهای ویژه اندازه گیری شده و با تفسیر نتایج حاصله ، شرایط زیر زمین استنتاج می‌شود. خواصی از سنگها که در اکتشافات ژئوفیزیکی ، سنجیده می‌شوند، معمولا شامل کشسانی الاستیسیته ، هدایت الکتریکی ، هدایت حرارتی ، چگالی، خاصیت مغناطیسی و رادیواکتیویته است.

شناسایی سفره آب زیرزمینی و سایر موارد استفاده می شود. برای دست یابی به نمونه با دست خوردگی کمتر و افزایش راندمان تجهیزات در آزمایش های نفوذ مستقیم توصیه می شود از لوله های نفوذ با قطر ۴/۳ سانتی متری بر روی کامیون حمل شونده سنگین استفاده شود. امروزه استفاده از آزمایش نفوذ مخروط (CPTU) به دلیل استخراج و ثبت لایه های زمین، فشار آب منفذی و افت و در نتیجه مشخصات نفوذپذیری خاک، پارامترهای آزمایشگاهی و در نتیجه به دست آوردن پارامترهای مکانیکی با استفاده از روابط همبستگی، گسترش یافته است. همچنین می توان از این روش به عنوان شناسایی آلودگی و وضعیت انتشار آن و از گمانه ایجاد شده به عنوان چاه شاهد استفاده کرد و از گمانه زنی مجدد به عنوان روش مخرب جلوگیری به عمل آورد. همچنین از سایر روش های به روز شده ی این آزمایش نظیر آزمایش نفوذ مخروط به همراه اندازه گیری هدایت هیدرولیکی RCPTU یا CPTU-EC استفاده کرد که قابلیت استخراج پارامترهای ژئوتکنیکی، هیدرولوژیکی و پارامترهای کیفی ژئوشیمیایی خاک لندفیل را دارد. در هر ۲/۵ سانتی متر نفوذ، دما و ضریب هدایت الکتریکی خاک ازین دستگاه قرائت می شود. ضریب هدایت الکتریکی خاک به مایعات موجود در خاک و محتوای رسی خاک بستگی دارد. خاک های خشک و یا اشباعی که شامل LNAPL و DNAPL هستند هدایت الکتریکی ضعیفی از خود نشان می دهند. در لندفیل وجود مواد غیرارگانیک محلول و شیرآبه در خاک به طور قابل توجهی این ضریب را افزایش می دهد. از گراف های به دست آمده این آزمایش ها می توان به راحتی لایه بندی و ضریب هدایت الکتریکی هر لایه و وجود تغییرات غیرمتعارف، وجود آلودگی های احتمالی را با دقت بسیار بالایی مشاهده کرد. همچنین در آزمایش های برجا می توان از نمونه گیری از نقاط مختلف لایه ها خصوصا از لایه هایی که زیر سطح آب زیرزمینی است و همچنین گازهای موجود وضعیت وجود یا گسترش آلودگی های احتمالی و نوع آن را مشخص کرد[17].

۴- بررسی روش های آزمایشگاهی

در اینجا به بررسی برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک های این نوع لندفیل ها که از آزمایش های آزمایشگاهی به دست می آیند، می پردازیم:

۴-۱-ویژگی های وزنی_حجمی

وزن مخصوص خاک منطقه به سادگی با استفاده از اندازه گیری حجم و وزن نمونه به دست می آید. همچنین می توان نمونه های با حجم ۰/۳ مترمکعبی را برای انجام مطالعات آزمایشگاهی از محل برداشت کرد. برای بدست آوردن درصد رطوبت و نسبت تخلخل باید نمونه ها را به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه در گرمچاله قرار داد و پس از خشک شدن میزان آب از دست رفته و وزن خاک خشک بدست می آید و با رابطه ۱ می توان درصد رطوبت را محاسبه کرد:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \qquad (۱)$$

که در آن m_w جرم مایعات موجود در خاک و m_s برابر جرم خاک خشک است.

برای محاسبه وزن مخصوص می توان ابتدا یک کاسه نمونه گیر را وزن کرد m_0 ، سپس با خاک لندفیل آن را پر نمود و سپس آب را به آن اضافه می کنیم تا نمونه کاملا اشباع شود، وقتی آب به ۲۰۰۰ میلی لیتر رسید، وزن کل کاسه نمونه گیر و خاک درونش را اندازه میگیریم m_1 ، و سپس آنرا در دمای ۶۵ درجه و به مدت ۷۲ ساعت در گرمچال قرار میدهیم تا به طور کامل خشک شود. درنهایت وزن کل کاسه نمونه گیر و خاک خشک درونش را اندازه میگیریم m_2 ،وزن مخصوص دانه های جامد از روابط زیر محاسبه می شود:

$$V_w = m_w / \rho_w \qquad (۲)$$

$$V_s = V_o - V_w \qquad (۳)$$

$$G_s = m_s / (V_s \rho_w) \qquad (۴)$$

که m_0 وزن کاسه نمونه گیر خالی است، $m_w = m_1 - m_2$ وزن آب، $m_S = m_2 - m_o$ وزن خشک خاک لندفیل، V_o برابر ۲۰۰۰ میلی لیتر، V_s برابر حجم دانه های جامد خاک لندفیل، V_w حجم آب، ρ_w چگالی آب و G_s وزن مخصوص دانه های جامد است.

برای محاسبه نسبت تخلخل خاک از رابطه زیر استفاده می شود:

$$e = \frac{G_s (1+w)\gamma_w}{\gamma} - 1 \qquad (۵)$$

که در آن γ برابر وزن مخصوص خاک لندفیل است.

۴-۲-نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی

برای به دست آوردن نفوذپذیری در این نوع خاک ها از آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت استفاده می شود که شکل نشان دهنده جزئیات این دستگاه است. در درون استوانه نفوذسنج و اطراف دیواره داخلی آن شیارهای افقی تعبیه شده تا از تراوش قائم آب در سطح داخلی جانبی مخروط جلوگیری شود. معمولا به دلیل اینکه این نوع از خاک ها دارای دانه هایی با ابعاد درشت و غیر متعارف

هستند باید دستگاهی به کار رود تا قطر داخلی آن به اندازه کافی بزرگ باشد تا از ایجاد تراوش قائم آب مطمئن شویم. دستگاهی که در شکل نمایش داده شده دارای ارتفاع $120cm$ و قطر $40cm$ است و فاصله قائم بین دو پیزومتر هم $50cm$ می باشد.

در لندفیل های زباله جامد با افزودن زباله های جدید و ایجاد سرباره بر روی زباله های قدیمی، نفوذپذیری لایه های پایین دستخوش تغییر می شود. توصیه می شود برای این آزمایش خاک لایه لایه و هر بار با کوبش در استوانه ریخته شود. و تعداد ضربه های چکش متناسب با وزن مخصوصی باشد که خاک در لندفیل دارد و توسط آزمایش های برجا اندازه گیری شده است. استفاده از چکش ۱۰ کیلوگرمی از ارتفاع ۸۰ سانتی متری می تواند مناسب باشد.

وزن مخصوص از روابط زیر بدست می آید:

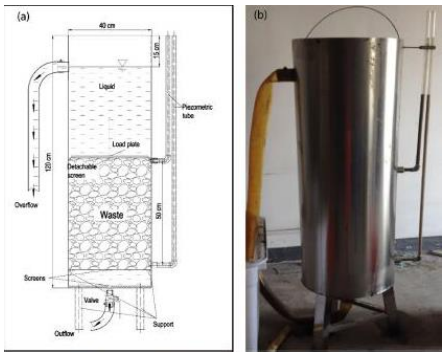
$$\gamma = \frac{mg}{V} \quad (۵)$$

$$V = A.h \quad (۶)$$

که γ وزن مخصوص نمونه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، m جرم نمونه داخل استوانه بر حسب کیلوگرم، g شتاب جاذبه زمین، V حجم نمونه داخل استوانه بر حسب مترمکعب، A سطح مقطع موثر نمونه بر حسب متر مربع و h فاصله قائم بین دو پیزومتر در استوانه است. سپس با استفاده از رابطه دارسی می توان ضریب هدایت هیدرولیکی را محاسبه کرد:

$$k = \frac{V_l.L}{A.\Delta h.t} \quad (۷)$$

که k ضریب هدایت هیدرولیکی بر حسب سانتی متر بر ثانیه، t زمان بر حسب ثانیه، L ارتفاع نمونه بر حسب سانتی متر و Δh میزان افت کل آب برحسب سانتی متر است.



شکل ۱ دستگاه نفوذپذیری با بار آبی ثابت

۴-۳- بررسی رفتار برشی خاک لندفیل

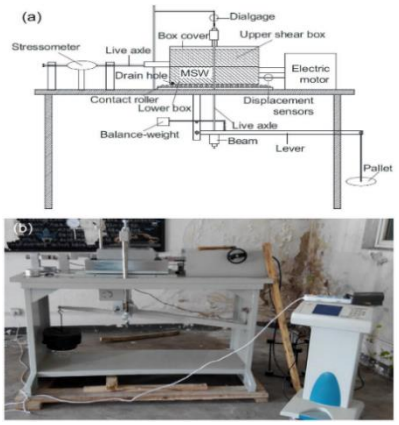
به دست آوردن پارامتر های برشی خاک های لندفیل های زباله جامد شهری بسیار دشوار است. برای این منظور استفاده از آزمایش های برجای ژئو تکنیکی دقت کافی را ندارند و همچنین کافی نیست. بهترین روش آزمایشگاهی توصیه شده برای این کار آزمایش برش

مستقیم است. قبل از قرار دادن نمونه در دستگاه برش مستقیم باید قطعات قابل شناسایی و درشت، فلزات و شیشه ها از نمونه جدا شود. و پلاستیک و کاغذ موجود در نمونه باید به قطعات ریز تقسیم شوند. خاک باید به صورت لایه لایه ریخته شود و هر لایه توسط چکش مخصوص کوبیده شود و سپس لایه بعدی اضافه شود، باید تعداد ضربات چکش به گونه ای باشد تا به وزن مخصوص از پیش تعیین شده دست یابیم.

بر اساس آزمایش برش مستقیم، Lavanda و Clerk که از پیشگامان مطالعه در این زمینه بودند در سال ۱۹۹۰ برای زاویه اصطکاک و چسبندگی این نوع خاک ها به ترتیب مقادیر ۲۴-۴۲ درجه و ۲۳-۱۶ کیلوپاسکال ، Eid و همکاران در سال ۲۰۰۰ مقدار ۳۵ درجه و ۵۰-۰ کیلوپاسکال [9] ، Bray و همکاران در سال ۲۰۰۹ مقادیر ۳۶ درجه و ۱۵ کیلوپاسکال [10] ، Reddy و همکاران در سال ۲۰۰۹ مقادیر ۳۰-۲۶ درجه و ۳۱-۶۴ کیلو پاسکال [11] ، را ارائه کرده اند. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی بین ۳×۱۰^ تا ۰٫۸ سانتی متر بر ثانیه است (بر اساس کارهای Korfiatis و همکاران در سال۱۹۸۴ [12] ، Chen و Chynoweth در سال۱۹۹۵ [13]، Powrie و Beaven در سال ۱۹۹۹ ، Jang و همکاران در سال ۲۰۰۲ [14] ، Penmethsa در سال ۲۰۰۷ [15] ، Reddy و همکاران در سال ۲۰۰۹ [16]). بدیهی است با توجه به دلایل گفته شده به منظور دست یابی به مقادیر دقیق تر و شناخت کامل تری نسبت به این مسئله بایستی در سایر نقاط دنیا هم مطالعات گسترده صورت گیرد تا بتوان به روابط جامعی نسبت به این نوع از خاک ها دست یافت.

در شکل یک دستگاه آزمایش برش مستقیم نمایش داده شده است. سیستم بارگذاری این دستگاه شامل بارگذاری افقی و قائم است که بارگذاری قائم تنش نرمال بالاتر از ۴۰۰ کیلو پاسکال و بارگذاری افقی توسط موتور تعبیه شده اعمال می شود. اندازه نمونه خاک معمولا $30\times30cm$ است و فک های بالایی و پایینی نمونه $7.5cm$ ارتفاع دارد و هنگام استفاده سطح درگیر بین آنها روغن کاری می شود تا اصطکاک به حداقل برسد. این دستگاه می

تواند برای خاک هایی که اندازه بزرگترین ذرات آن تا $5cm$ باشد مورد استفاده قرار گیرد. برخی از این دستگاه ها همانند شکل توسط دیتا لاگر به کامپیوتر متصلند و می توانند سرعت بارگذاری، زمان بارگذاری، بارهای قائم و افقی را نمایش دهند و یا حتی در مدل های پیشرفته تر می توان این مقادیر را به وسیله ی کامپیوتر به نمونه اعمال کرد.



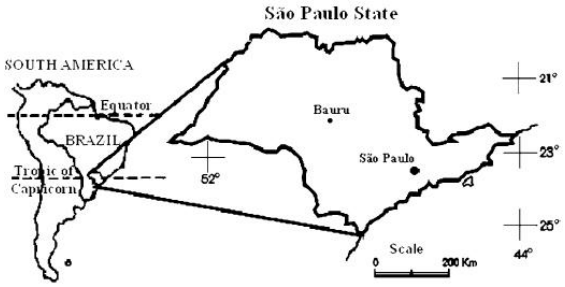
شکل ۲ دستگاه برش مستقیم

۵- مطالعات موردی صورت گرفته در کشورهای مختلف

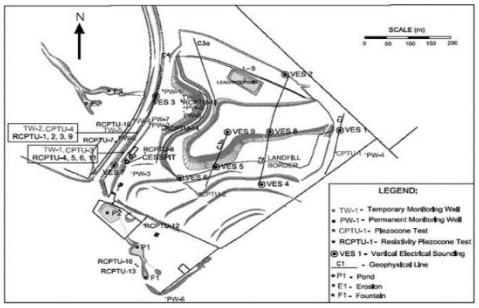
۵-۱- مطالعات ژئوزیست محیطی لندفیل زباله جامد در برزیل

Mondelli و همکاران [6] با بهره گیری از روش های ژئوفیزیکی و برجای صحرایی بر روی لندفیلی در شهر بورو[2] در ایالت سائوپائولو تحقیقی انجام دادند و در سال ۲۰۰۶ حاصل این تحقیق را چاپ کردند. روزانه ۲۰۷/۲ تن زباله شهری جامد در این لندفیل تخلیه می گردد. در این تحقیق از روش های ERT به عنوان روش های ژئوفیزیکی و از روش های RCPTU به عنوان روش های برجا

استفاده شده است. همچنین با استفاده از نمونه گیرهای نفوذی، نمونه هایی از خاک به دست آمده است. وضعیت آب زیرزمینی در این سایت با استفاده از چاه های مشاهده ای بررسی شده است؛ شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب جانمایی شهر بورو[2] و لندفیل مورد مطالعه قرار گرفته شده را نشان می دهند.



شکل ۱ جانمایی شهر بورو در کشور برزیل



شکل ۲ جانمایی لندفیل مورد مطالعه قرار گرفته

نتایج به دست آمده حاکی ازین است که نوع خاک این سایت ماسه سنگ است که با خاک رس ماسه دار رسوبی پوشیده شده، عمق آب زیرزمینی در این لندفیل ۵ متر، ضریب هدایت هیدرولیکی این خاک در حدود 10^{-7} تا 10^{-6} متر بر ثانیه اندازه گیری شده است.

جدول ۱ مشخصات خاک لندفیل

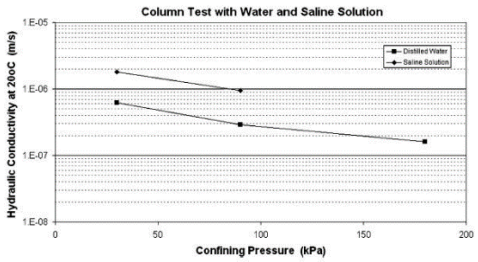
Silt(%)	Clay(%)	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	$\rho_{d\,max}(g/cm^3)$	$w_{OP}(\%)$	$K_v(m/s)$
6	21	20	15	1.9	12	$6\times10^{-}$

$w(\%)$	$\gamma_n(KN/m^3)$	G_s	$\gamma_d(KN/m^3)$	**e**	S_r**(%)**	**n(%)**	**Sand(%)**
6	16	2.7	15	0.8	19	45	73

مقاومت الکتریکی پایین نشانه وجود زباله و یا شیره ی آن در محل است، مشاهده می شود که در لایه های ۲ و ۳ در این سایت مقاومت الکتریکی ۱۰/۲ تا ۱۸/۸ اهم در متر به دست آمده است. در اعماق ۱۶ تا ۲۰ متری این سایت، مقاومت الکتریکی در حدود ۲۸/۹ به دست آمده است. برای ارزیابی وضعیت هدایت هیدرولیکی خاک این سایت نمونه های دست نخورده از خاک محل تهیه و با انجام آزمایش در آزمایشگاه، نتایج به دست آمده برای هدایت هیدرولیکی خاک این سایت در شکل ۵ آورده شده است. هدایت هیدرولیکی برای محلول سالین در این خاک حدود ۳ برابر بزرگتر از

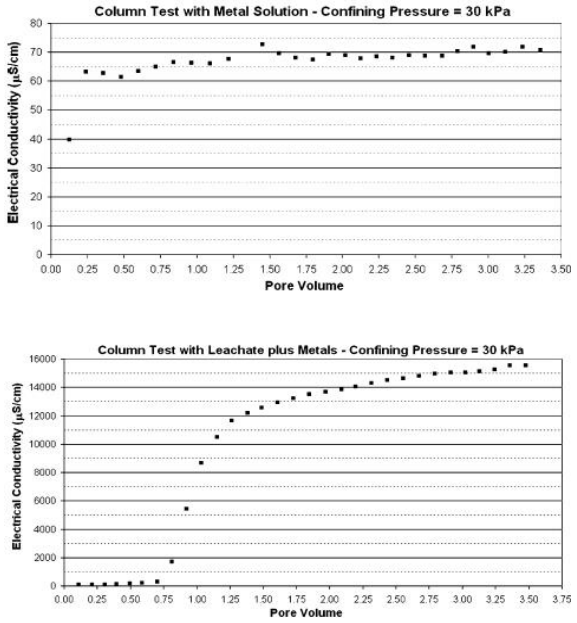
[2] Bauru

هدایت الکتریکی آب مقطر، که در حدود 6×10^{-7} تا 1×10^{-7} متر بر ثانیه است، به دست آمده است.



شکل ۵ وضعیت هدایت هیدرولیکی در لایه های خاک لندفیل

برای ارزیابی وضعیت هدایت الکتریکی خاک این سایت نمونه های استوانه ای دست خورده این خاک به دو صورت اشباع شده با شیرابه فلزی و اشباع شده با شیرابه زباله و فلز در آزمایشگاه مورد تست قرار گرفته است و نتایج آن به صورت نمودارهای شکل ۶ به دست آمده است. در نمودار بالایی که نفوذ با شیرابه و فلز است، هدایت الکتریکی از مقدار ۰/۲۵ جهش ناگهانی دارد و پس از آن افزایش آهسته ای دارد تا به مقدار نفوذ اولیه ی محلول که برابر ۷۲/۹ میکرو زیمنس بر سانتی متر است، برسد. در نمودار پایینی هم که نفوذ با شیرابه است هم این اتفاق رخ داده است و در حجم نفوذی حدود ۳،۵ به مقدار نفوذ اولیه ی محلول که برابر ۱۵،۱۴۰ میکروزیمنس بر ثانیه است رسیده است.



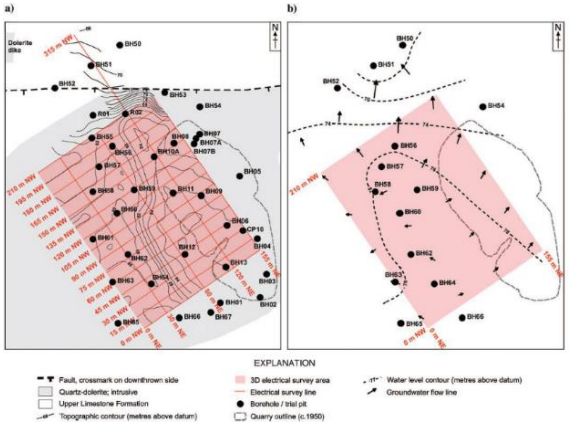
شکل ۶ وضعیت هدایت الکتریکی خاک لندفیل در ۲حالت نفوذ با شیرابه فلزی و نفوذ با شیرابه زباله و فلز

پس از انجام این آزمایش ها بر روی خاک سایت محل، مشاهده شد این خاک ظرفیت خوبی برای نگهداری فلزات سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم را داراست و ازین جهت انتقال آلودگی در این سایت به کندی رخ می دهد ولی با این وجود همچنان بایستی وضعیت آب زیرزمینی مورد بررسی دوره ای قرار گیرد.

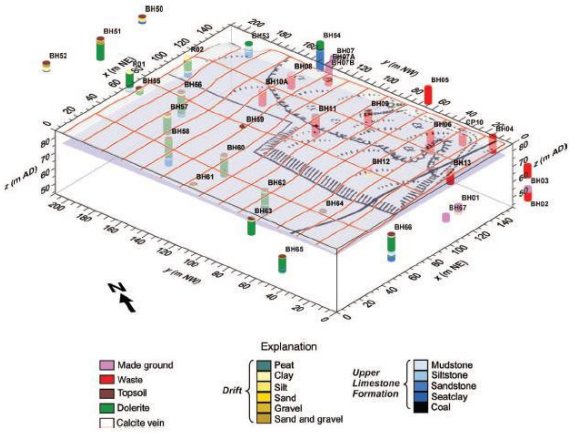
۵-۲- مطالعات ژئوفیزیکی لندفیل زباله جامد در اسکاتلند

در سال ۲۰۰۶، chambers و همکاران [6] بر روی لندفیل زباله جامد که در محل یک معدن سابق سنگ دولریت در Midland valley اسکاتلند ایجاد شده است، آزمایش های ژئوفیزیکی ۲ بعدی و ۳ بعدی مقاومت الکتریکی (ERT) انجام دادند. منطقه بررسی شده یک مستطیل به ابعاد ۱۵۵ متر در راستای محور x و ۲۱۰ متر در راستای محور y بوده است. این نقشه برداری شامل ۱۵ لاین با فاصله ی ۱۵متری از یکدیگر عمود بر محور y و ۵ لاین با فاصله های ۳۰، ۵۰، ۴۰ و ۳۵ متری از یکدیگر بوده است.

در شکل سایت پلان و نقشه زمین شناسی حاصل از ERT و نقشه هیدروژئولوژی سایت نمایش داده شده است. در شکل ۸ نقشه ۳بعدی این سایت که شامل مکان حفر گمانه ها، توپوگرافی سطح، محل لاین های نقشه برداری ERT و سطح آب زیرزمینی مشاهده می شود.

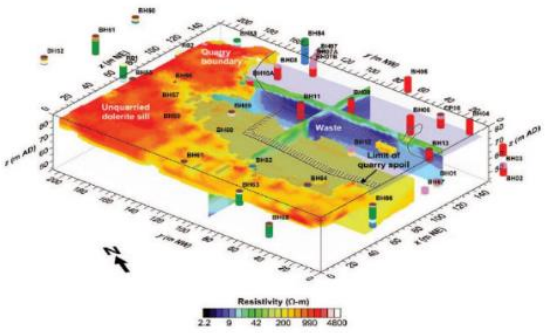


شکل ۷ نقشه زمین شناسی (a) و نقشه هیدروژئولوژی (b) لندفیل

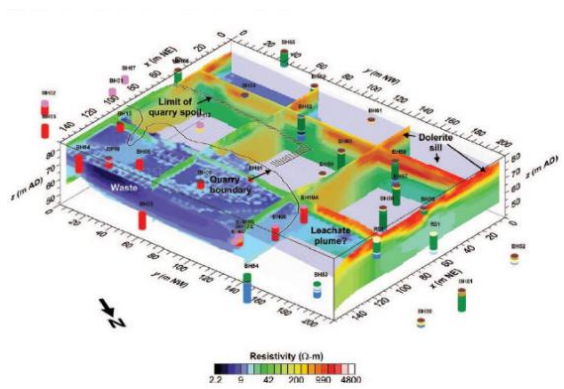


شکل ۸ مشخصات سه بعدی لندفیل

پس از نقشه برداری مقاومت الکتریکی در سایت و مدل کردن آن مقادیر مقاومت الکتریکی برای خاک این سایت در بازه ی بین کمتر از ۱ تا حدود ۳۰۰۰ اهم در متر به دست آمده است. مدل این سایت به همراه ویژگی های کلی آن در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می شود. نتایج حاصل از آزمایش های گمانه نشان می دهد حداکثر عمق سایت در حدود ۱۴ الی ۱۵ متر است.



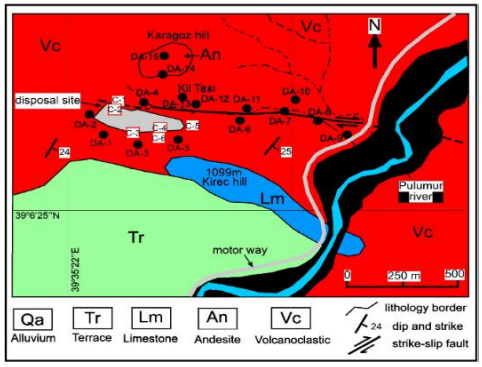
شکل ۹ مشخصات سه بعدی لندفیل از نمای شمالی



شکل 10 مشخصات سه بعدی لندفیل از نمای جنوبی

۵-۳- مطالعات ژئوفیزیکی لندفیل زباله جامد در ترکیه

حدود ۶۷٪ ازضایعات جامد شهری تولید شده در ترکیه در کیسه های باز ریخته شده است [17]. مشکلات زیست محیطی ناشی از دفع جامد مانند مشکلات بو، انتشار گاز به جو، خطر انفجار یا آتش سوزی، شیرابه کنترل نشده وارد به آبهای سطحی و زیرزمینی وآلودگی های بصری که به راحتی دراین نوع ازسایت ها به چشم می خورد علاوه بر این مشکلات حتی زباله های پزشکی را می توان یافت. سایتی که برای تبدیل شدن به محل دفن زباله برنامه ریزی شده است باید براساس کانی شناسی و خواص شاخص زیرخاک و ساختار های زمین شناسی مانند نوع سنگ ها، خواص تکتونیکی و عمق سطح آب زیرزمینی بررسی شود. عمق سطح آب زیرزمینی باید حداقل ۳۰-۵۰ متر باشد و زیر خاک باید نفوذپذیری کم (10^{-8} متر بر ثانیه) تراوایی بخش رس ضخیم و یا زیر خاک طبیعی باید بین 10^{-6} و 10^{-8} سانتی متر بر ثانیه باشد.سایت دفع مواد زائد جامد در شهرستان تونجلی ترکیه[3] که توسط صخره های منطقه احاطه شده و دیگر خواص زمین شناسی مورد بررسی قرار گرفته است. محل قرارگیری این سایت جهت دفن زباله در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل 11 جانمایی لندفیل مورد مطالعه

برای تعیین ویژگی های سنگ شناسی سنگ پایه از روش نمونه برداری پتروگرافی[4] واحد های سنگی بهره گرفته شده است. برای بررسی ویژگی سنگ ها، کانی شناسی، خواص پتروفیزیکی سنگ پایه مقاطع نازک پتروگرافی متشکل از نمونه های سنگ با ضخامت ۰,۰۰۰۳ میلی متر برای مطالعات میکروسکوپی تهیه شده است. تجزیه و تحلیل ترکیبات و کانی های این نمونه ها با بررسی پلاریزه میکروسکوپ در دانشگاه تونجلی انجام شد و نام گذاری سنگ ها نمایش داده شد.

خاک طبیعی سایت و نواحی اطراف آن شامل سنگ های آذری و مواد معدنی اصلی زیر خاک سایت محتوی کوارتز و فلدسپار است.

[3] Tunceli

[4] **سنگ‌نگاری** یا **پتروگرافی** شاخه‌ای از سنگ‌شناسی(پترولوژی) است که در آن منشأ سنگ‌ها، به‌ویژه فرایند تشکیل آن‌ها، مورد مطالعهٔ علمی قرار می‌گیرد.

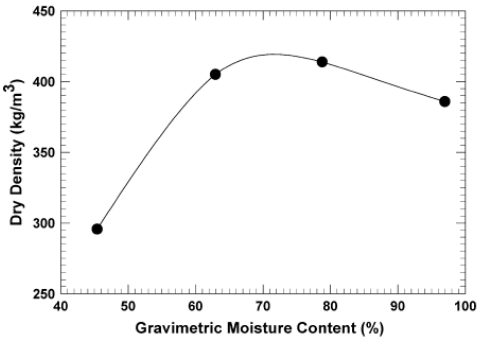
در میان این مواد معدنی، هیچ مواد معدنی حاوی آلودگی یافت نشده است. همچنین مقدارکمی مواد معدنی سازگار با محیط زیست رس و زئولیت که به وفور در نواحی آتش فشانی یافت می شوند و قابلیت جذب بالای آلودگی را دارند در این لندفیل مشاهده شده که نشان می دهد آلودگی سایت و محیط اطراف آن به دلیل عدم نگه داری آلودگی توسط خاک زیر سایت است.

شیرآبه حاصل از زباله های محیط با آب های سطحی در مسیر رودخانه ی پلومور[5] (از طریق بارش های فصلی و آب های زیرزمینی) ترکیب می شود. بستر این مسیر شامل ماسه سنگ های آتش فشانی بسیار نفوذپذیر (10^{-5} سانتی متر بر ثانیه) است از این رو شیرآبه های بسیار آلوده دارای پتانسیل زیاد برای رسیدن به منابع آب های زیرزمینی هستند. بررسی های زمین شناسی شهرداری تونجلی ترکیه از سایت محل دفن زباله های غیربهداشتی نشان می دهد که این سایت در حال حاضر برای این منظور مناسب نیست [18].

۵-۴- مطالعات ژئوفیزیکی لندفیل زباله جامد در آمریکا

برای بسیاری از کشورها، دفن مهندسی مواد زائد جامد محیط یکی از روش های مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست به شمار می رود. حدود ۵۴٪ از زباله های ایالات متحده دفن می شوند. نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی زباله های جامد شهری (MSW) جمع آوری شده از محل دفع زباله واقع در ارچارد هیلز، ایالات متحده حاکی از آن است که تاثیر افزایش رطوبت بر تراکم پذیری و مقاومت برشی زباله های جامد شهری (MSW) در طول چرخه شیرآبه با تست نمونه های متغیر مورد بررسی قرار گرفته شده و رطوبت وزنی در محدوده ۴۴٪ الی ۱۰۰٪ اندازه گیری شده است. براساس آزمایش استاندارد پروکتور، حداکثر وزن مخصوص خشک از 420 کیلوگرم بر متر مکعب و در رطوبت مطلوب ۷۰٪ مشاهده شده است. شکل وضعیت رطوبت زباله های جامد شهری را نشان می دهد. هدایت هیدرولیکی در طیف گسترده ای از 10^{-4} تا 10^{-8} متر بر ثانیه قرار دارد و با افزایش وزن مخصوص خشک کاهش می یابد. مقدار نسبت تراکم در محدوده ی بین ۰,۲۴-۰,۳۳ بدون هیچ رابطه خاصی با افزایش رطوبت درحال تغییر است. براساس آزمایش های برش مستقیم در طیفی از رطوبت های تست شده انسجام تخلیه از ۳۱ تا ۶۴ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک از ۲۶ تا ۳۰ درجه محاسبه شده است.

در سال های اخیر در فلسفه طراحی محل های دفن زباله از مفهوم ذخیره سازی خشک به سمت رویکرد بیوراکتور تغییراتی وجود داشته است. در روش بیوراکتور رطوبت زباله جامد شهری به منظور تجزیه بیولوژیکی توسط چرخه شیرآبه افزایش می یابد. علاوه بر این تخریب سریع تر در سایت های بیوراکتور ارائه قابل توجیهی دال بر کاهش زمان در بحث مدیریت زمان است. (ردی و بوگنر، ۲۰۰۳) خواص ژئوتکنیکی زباله های جامد شهری (MSW) در طراحی و نگهداری انواع لندفیل ها یا محل های دفن زباله در اولویت هستند. روش های آزمایشگاهی عبارتند از آزمون پروکتور استاندارد، آزمون هدایت هیدرولیکی با هد ثابت طبق استاندارد ASTM D2434، آزمون تراکم پذیری محدود، آزمون برش مستقیم، آزمون سه محوری زهکشی نشده (CU). متوسط پارامترهای مقاومت خاک (c و ϕ) برابر 32 کیلوپاسکال و ۱۲ درجه درحالی که پارامترهای تنش موثر برابر 38 کیلوپاسکال و ۱۶ درجه ارائه گردیده است. زاویه اصطکاک زهکشی نشده برابر ۱۴ درجه و انسجام موثر تلفیقی زهکشی نشده 45 کیلوپاسکال گزارش شده است که این نتایج با لندفیل دفن زباله دونا جوانا در نزدیکی این لندفیل نیز مطابقت دارد [17]. لاندوا و کلارک (۱۹۹۰) آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های زیادی از زباله های جامد شهری ادمونتون کانادا[6] انجام دادند و خواص مقاومت برشی را 23 کیلو پاسکال و 24 درجه گزارش داده اند.[11] .



شکل 12 نمودار وزن خصوص خشک زباله های جامد شهری خردشده برحسب رطوبت وزنی

۵-۵- مطالعات ژئوفیزیکی لندفیل زباله جامد در چین

بر اساس پژوهشی که در زمینه نشت آلودگی در زیر و اطراف محل دفن زباله های کنترل نشده هوآینان چین با هدف بررسی انتقال برخی از مواد شیمیایی موجود در شیرابه محل دفن زباله به خاک رس اطراف پس از ۱۷ سال از گذشت بهره برداری سایت مورد نظر، غلظت یون های کلرید و سدیم موجود در آب منافذ نمونه خاک جمع آوری شده در عمق ۱۵ متری از طریق تحقیقات

[5] Pulumur

[6] Edmonton Canada

گسترده سایت بدست آمده است و همچنین محتویات مواد آلی نمونه های خاک نیز مشخص گردیده است.

موارد متعددی از آلودگی آب های زیرزمینی و خاک ناشی از عملیات دفن زباله در منابع گزارش شده است ([22]–[19]) بنابراین بدست آوردن حالت غلظت آلاینده های شیرآبه در خاک های زیر سطحی و ارزیابی نشت طولانی مدت مواد شیمیایی در محل دفن زباله حائز اهمیت است. این امر مستلزم تحقیقات در مقیاس گسترده برای بدست آوردن مکانیسم عمده انتقال املاح و خواص زمین شناسی زیرسطحی از نظر ویژگی های جریان است [23].

در این پژوهش مطالعه ای از انتشار مواد شیمیایی و آلودگی در سایت دفن زباله هوآی نان چین صورت گرفته است که این سایت

در بستری از خاک رس بدون هیچ سیستم مهار مهندسی در زیر محل دفن زباله ساخته شده است. ژان و همکاران (۲۰۱۴) شرح مفصلی از

شکل ۱۳ نمونه برداری از گمانه های لندفیل

بررسی سایت، یک سری از داده های جمع آوری شده از زیر محل دفن و یک تجزیه و تحلیل ابعادی از نشت آلودگی به بستر خاک رس زیر محل های دفن زباله فراهم کرده اند. نتایج کار حاضر را می تواند برای طراحی ها و ارزیابی خاک و روش های اصلاح آب های زیرزمینی در این سایت دفن زباله استفاده گردد. محل دفن زباله هوآینان در حدود ۵ کیلومتری از مرکز شهرستان هوآی نان[7] مستقر در جنوب شرقی استان آنهویی[8] در شرق چین واقع شده است. این سایت در حدود ۶ کیلومتری رودخانه هواهی[9] است. خاک زیر سطحی در این سایت خاک آبرفتی کواترنر است و این سایت ۱۷ سال مورد بهره برداری قرار گرفته است. سطح شیرابه در سایت دفن زباله ۸ متر گزارش گردیده است. زباله جامد شهری (MSW) دفن شده در این محل دفن به طور مستقیم در خاک طبیعی ساخته شده است. شرح مفصلی از سایت توسط ژان و همکاران ارائه شده است. هفت گمانه (BH1-BH7) تا پایین لایه های رسی خاک در زیر محل دفن زباله حفر شد و نمونه هایی از خاک بدست آمد. BH1 و BH2 در زیر محل دفن واقع شده اند و گمانه های BH3 و BH4 و BH5 و BH6 به ترتیب ۱۸، ۲۰، ۳۰، ۴۰ متر دورتر از محل دفن زباله حفر شده اند. گمانه BH7 خارج از محل دفن زباله (حدود ۱۰۰ متر دور از راه آب یا خندق شیرآبه) قرار گرفته است [24] .

خاک سطح لندفیل که برای احداث محل دفن زباله برنامه ریزی شده شامل ۱–۲ متر خاک کشاورزی و لایه ی زیرین خاک شامل ۱,۵ تا ۵ متر لایه باتلاقی و لای رسی و زیر این لایه ۵ الی ۸ متر لایه رسی است که از اقشار رسوبی اواخر پلیستوسن (دوره چهارم زمین شناسی) به شمار می رود. لایه ای از سنگ بستر در زیر خاک رسی قرار دارد و تخلخل متوسط خاک های بستر زیر زباله ها حدود ۰,۴ است. هدایت هیدرولیکی سطح لایه باتلاقی و لای رسی و لایه رسی به ترتیب برابر 3×10^{-5} ، $5 - 8 \times 10^{-6}$ و 3×10^{-7} سانتی متر بر ثانیه است. ترکیبات شیرآبه از نمونه های بدست آمده از گمانه BH1 و BH2 اندازه گیری شده است.شیرآبه ها با خاصیت اسیدی کم و PH=6.2-6.4 اندازه گیری شده اند [25]. غلظت یون های سدیم و کلر در نمونه شیرآبه های مورد آزمایش بیش از ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر گزارش شده است. مواد آلی خاک (SOM) مطابق استاندارد ملی چین مشخص شده است (NSPRC 1988). نمونه برداری از گمانه های داخل سایت را در شکل ۱۳ مشاهده می شود [26] .

۶- نتیجه‌گیری

برای شناسایی لندفیل ها، از میان روش های صحرایی موجود روش CPTU و از میان روش های ژئوفیزیکی روش ERT توصیه شده است. البته بسته به شرایط ساختگاه هدف از مطالعه بر روی آن و همچنین نوع زباله های موجود در سایت روش های دیگری را اتخاذ کرد. روش بهینه برای این کار این است که ابتدا با روش های ژئوفیزیکی و نقشه برداری منطقه شناسایی شود و محل های بهینه برای حفر گمانه و همچنین تراز آب زیرزمینی شناسایی شود. با نمونه گیری و انجام آزمایش های مربوطه در آزمایشگاه می توان به شناخت نسبی از سایت محل دست یافت و سپس در صورت نیاز

[7] Huainan
[8] Anhui
[9] Huaihe

آزمایش های برجا را در محل انجام داد. پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر وزن مخصوص، نسبت تخلخل، درصد رطوبت، هدایت الکتریکی و پارامترهای برشی بدست آمده از آزمایشگاه در تصمیم گیری های بعدی بسیار حیاتی است. عامل دیگری که بر روی مشخصات خاک لندفیل تاثیرگذار است سن زباله های جامد است.همچنین باید برای کنترل آلودگی در محل آب زیرزمینی می توان در نقاط مختلف چاه های مشاهده ای را حفر نمود و وضعیت انتشار آلودگی های احتمالی را رصد کرد. انجام آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه های گرفته شده از سایت نیز شناخت مناسبی از وضعیت انتشار آلودگی توسط آب در خاک را فراهم می کند.

منابع

[1]برهانی, ع. چ. (پاییز ۱۳۹۵). ارزیابی زیست محیطی و توسعه پایدار چهار روش روسازی در ایران به کمک چهار روش تحلیل چندمعیاره. *مطالعات علوم محیط زیست*, ۵۱-۶۲.

[2]S. Feng, K. Gao, Y. Chen, Y. Li, L. M. Zhang, and H. X. Chen, "Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill , China," *Waste Manag.*, 2016.

[3] S. M. Merry, E. Kavazanjian Jr., and W. U. Fritz, "Reconnaissance of the July 10 , 2000 , Payatas Landfill Failure," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 19, no. 2, pp. 100–107, 2005.

[4] F. Koelsch, K. Fricke, C. Mahler, and E. Damanhuri, "Stability of Landfills – the Bandung Dumpsite Desaster," *10th Int. Waste Manag. Landfill Symp.*, vol. 2000, no. February 2005, 2005.

[5] B. T. D. Stark, H. T. Eid, W. D. Evans, and P. E. Sherry, "M UNICIPAL S OLID W ASTE S LOPE F AILURE .," no. May, pp. 408–419, 2000.

[6] G. Mondelli, H. L. Giacheti, M. E. G. Boscov, V. R. Elis, and J. Hamada, "Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil," *Environ. Geol.*, vol. 52, no. 5, pp. 871–887, 2007.

[7] J. E. Chambers, O. Kuras, P. I. Meldrum, R. D. Ogilvy, and J. Hollands, "Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site," *Geophysics*, vol. 71, no. 6, pp. B231–B239, 2006.

[8] J. E. Chambers, R. D. Ogilvy, O. Kuras, J. C. Cripps, and P. I. Meldrum, "3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site," *Environ. Geol.*, vol. 41, no. 6, pp. 690–704, 2002.

[9] B. H. T. Eid, T. D. Stark, W. D. Evans, and P. E. Sherry, "M Unicipal S Olid W Aste S Lope F Ailure . I : W Aste and F Oundation S Oil P Roperties," no. MAY, pp. 397–407, 2000.

[10] T. D. Stark, A. Nejan, H.-S. Ae, and G. Li, "Shear strength of municipal solid waste for stability analyses," *Env. Geol*, vol. 57, pp. 1911–1923, 2009.

[11] K. R. Reddy, H. Hettiarachchi, N. S. Parakalla, J. Gangathulasi, and J. E. Bogner, "Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 952–959, 2009.

[12] G. P. Korfiatis, A. C. Demetracopoulos, E. L. Bourodimos, and E. G. Nawy, "Moisture Transport in a Solid Waste Column," *J. Environ. Eng.*, vol. 110, no. 4, pp. 780–796, 1984.

[13] T. Chen and D. P. Chynoweth, "Hydraulic conductivity of compacted municipal solid waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 51, no. 2–3, pp. 205–212, 1995.

[14] Y. S. Jang, Y. W. Kim, and S. I. Lee, "Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea," *Waste Manag.*, vol. 22, no. 3, pp. 261–267, 2002.

[15] M. S. Hossain, K. K. Penmethsa, and L. Hoyos, "Permeability of municipal solid waste in bioreactor landfill with degradation," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 43–51, 2009.

[16] K. R. Reddy, H. Hettiarachchi, N. Parakalla, J. Gangathulasi, J. Bogner, and T. Lagier, "Hydraulic Conductivity of MSW in Landfills," *J. Environ. Eng.*, vol. 135, no. 8, pp. 677–683, 2009.

[17] B. Nas, T. Cay, and F. Iscan, "Selection of MSW landfill site for Konya , Turkey using GIS and multi-criteria evaluation," pp. 491–500, 2010.

[18] A. Öztüfekçi Önal, D. Demirbilek, and V. Demir, "Geo-environmental site investigation for Tunceli, Turkey municipal solid waste disposal site," *Eng. Geol.*, vol. 159, pp. 76–82, 2013.

[19] J. B. Christensen, D. L. Jensen, C. Grn, Z. Filip, and T. H. Christensen, "CHARACTERIZATION OF THE DISSOLVED ORGANIC CARBON IN LANDFILL LEACHATE-POLLUTED," vol. 32, no. 1, pp. 125–135, 1998.

[20] S. Nayak, B. M. Sunil, and S. Shrihari, "Hydraulic and compaction characteristics of leachate-contaminated lateritic soil," vol. 94, pp. 137–144, 2007.

[21] G. Varank *et al.*, "Science of the Total Environment Migration behavior of land fi ll leachate contaminants through alternative composite liners," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 17, pp. 3183–3196, 2011.

[22] M. A. Ashraf and I. Yusoff, "Study of contaminant transport at an open-tipping waste disposal site," pp. 4689–4710, 2013.

[23] I. Yusoff, Y. Alias, M. Yusof, and M. Aqeel, "Assessment of pollutants migration at Ampar Tenang landfill site , Selangor , Malaysia," vol. 39, pp. 392–409, 2013.
[24] H. Xie, Y. Chen, H. R. Thomas, M. Sedighi, S. A. Masum, and Q. Ran, "Contaminant transport in the sub-surface soil of an uncontrolled landfill site in China: site investigation and two-dimensional numerical analysis," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, no. 3, pp. 2566–2575, 2016.
[25] T. L. T. Zhan, C. Guan, H. J. Xie, and Y. M. Chen, "Science of the Total Environment Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled land fi ll at Huainan , China : A fi eld and theoretical investigation," *Sci. Total Environ.*, vol. 470–471, pp. 290–298, 2014.
[26] Y. J. Du, S. Hayashi, and S. Y. Liu, "Experimental study of migration of potassium ion through a two-layer soil system," pp. 1096–1106, 2005.