

مدل سازی میزلرزه برای جداسازی لرزه‌یی مدفن زائده‌های جامد شهری با آسترهای مصنوعی زمینی (مطالعه‌ی موردی: مدفن کهریزک تهران)

وحید میرحاجی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

یاسر جعفریان* (استادیار)

بزهشکده‌ی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

محمدحسن بازاریار (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

محمدکاظم جعفری (استاد)

بزهشکده‌ی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

بارهای لرزه‌یی ناشی از جابه‌جایی‌های داخلی مدفن‌های زباله‌ی شهری، اعم از سیستم آستر تحتانی، سیستم پوشش، پی و فصول مشترک می‌توانند باعث آسیب سازه‌های مذکور شوند. مصالح مصنوعی صیقلی واقع در زیر سازه‌ها می‌توانند با مکانیسم لغزندگی و جذب انرژی وارده از زلزله‌ها باعث حفاظت لرزه‌یی شوند. در مطالعه‌ی حاضر، بررسی‌های آزمایشگاهی به منظور ارزیابی نقش جداسازی بستر درون خاکی بر روی پاسخ لرزه‌یی مدفن زباله‌ی شهری کهریزک تهران انجام شده‌اند. آزمایش‌های میزلرزه روی خاکریز زباله‌ی جامد شهری عایق شده با آسترهای شبه‌بیضوی در معرض تحریک‌های سینوسی هارمونیک در بستر انجام شده‌اند. نتایج حالت‌های جدا شده و جدا نشده بر حسب جابه‌جایی دائمی و پاسخ لرزه‌یی مقایسه و مشاهده شد که در تمامی ترازها و حرکت‌های ورودی، خصوصاً حرکات ورودی با شدت بالا، شتاب‌های طیفی داخل خاکریز به واسطه‌ی جداسازی بستر کاهش یافته‌اند. نتایج مطالعه‌ی حاضر، کاربرد مناسب آسترهای ژئوستنتیکی در مقاوم‌سازی لرزه‌یی مدفن‌ها را نشان داده است.

واژگان کلیدی: پاسخ لرزه‌یی، مدفن زباله‌ی جامد شهری، جداسازی بستر، آسترهای مصنوعی زمینی، جابه‌جایی دائمی.

۱. مقدمه

به آلودگی آب‌های زیرزمینی بیانجامد.^[۶-۱] آیین‌نامه‌های ایالات متحده‌ی آمریکا در زمینه‌ی مدفن‌های زباله تصریح می‌کند که مدفن‌های زباله واقع در نواحی لرزه‌خیز باید طوری طراحی شوند که در برابر شتاب‌های انتقال یافته مقاومت کنند.^[۷] ارزیابی لرزه‌یی مدفن‌های زباله نیازمند برآورد جابه‌جایی‌های لغزشی ناشی از زلزله در سیستم است. از آنجایی که جابه‌جایی دائمی ناشی از زلزله، پتانسیل آسیب‌دیدگی مدفن زباله در طی زلزله را نشان می‌دهد، لذا جابه‌جایی مذکور شاخص مفیدی در طراحی این‌گونه از سازه‌هاست. جابه‌جایی‌های حاصل و گسیختگی‌های احتمالی می‌توانند به آستر آسیب رسانند و عملکرد پوشش یا سیستم‌های جمع‌آوری شیرابه، گاز و زهکشی را مختل کنند. پاسخ لرزه‌یی مدفن‌ها در منطقه‌ی لس‌آنجلس، نظیر مدفن OII^۱ در طی زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴)، فرصت‌های ارزشمندی در بررسی عملکرد لرزه‌یی

عملکرد لرزه‌یی مدفن‌های زباله‌ی شهری در گذشته، حائز اهمیت زیادی نبود؛ زیرا ناپایداری مدفن‌های زباله به‌عنوان مسئله‌یی عملکردی به شمار می‌رفت که می‌توانست با جای‌گذاری زباله در هندسه‌یی پایدار رفع شود. امروزه مدیریت زباله‌ها با وجود پیشرفت‌هایی که در زمینه‌هایی نظیر فرایند دفن مطمئن، انواع مختلف آسترهای مصنوعی زمینی و سیستم‌های جمع‌آوری شیرابه به وجود آمده است، نیازمند ارزیابی دقیق تغییرشکل‌های ناشی از بار است. جابه‌جایی‌های دائمی بالای مدفن یا وجوه جانبی آن می‌توانند موجب تراوش‌های نامطلوبی شوند که ممکن است

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۱۰/۱۳۹۵، اصلاحیه ۳۹/۶/۱۳۹۶، پذیرش ۳۰/۳/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1926.2018

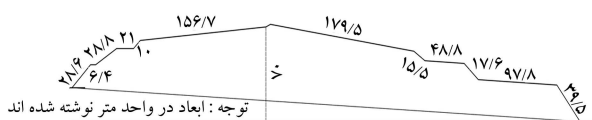
گسل‌های متعددی با خطرهای لرزه‌یی قابل ملاحظه‌یی در آن ناحیه وجود دارد.^[۲۵] در مطالعه‌ی حاضر، سه مجموعه از آزمایش‌های میز لرزه بر روی زباله‌های جامد شهری کهریزک در حالت‌های جدا شده و جدا شده با آستر نیمه بیضی شکل با حرکت‌های القایی هارمونیک سینوسی در بستر انجام شده است. به منظور ارزیابی کیفیت روش جداسازی بستر در حفاظت لرزه‌یی خاکریزهای زباله با آسترهای مصنوعی زمینی، پاسخ لرزه‌یی مدل بازرسی شده است. نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در ساختگاه مدفن کهریزک تهران به تفصیل ارائه شده است. فرایند مدل سازی خاکریز زباله در آزمایش میز لرزه تشریح و نتایج بر حسب طیف پاسخ و جابه‌جایی دائمی لرزه‌یی بیان شده‌اند.

۲. مدفن کهریزک

مدفن کهریزک بزرگ‌ترین مرکز دفع زباله در ایران است که روزانه بیش از ۷۰۰۰ تن از زباله‌های جامد شهری تهران جمع‌آوری و به آنجا منتقل می‌شود. مرکز کهریزک یگانه سایت دفن زباله‌ی بزرگ در ۲۵ کیلومتری جنوب تهران با مساحت ۱۴۰۰ هکتار است، که در طی بیش از ۴۰ سال اخیر به‌عنوان محل دفع زباله استفاده شده است.^[۲۶] براساس گزارش‌های اخیر شهرداری تهران، فقط ۵٪ زباله‌های جامد شهری در سایت فرآوری زباله به کمپوست (کود آلی) تبدیل و تقریباً ۳۷٪ زباله‌های خشک بازیافت و در همان حال، باقیمانده‌ی زباله‌ها دفن می‌شوند.

امروزه به علت کمبود مکان‌های مناسب برای دفن زباله، ارتفاع بلندترین مقطع دیوی اصلی زباله به بیش از ۷۰ متر رسیده است. زباله با لایه‌های متعدد از نخاله‌های ساختمانی پوشانیده و نهایتاً به واسطه‌ی تردد کامیون‌ها متراکم می‌شوند. در نوشتار حاضر، به‌منظور حصول رفتار مکانیکی در محل زباله‌ی دفن شده، دو مدفن جداگانه به نام‌های تپه‌ی ۶۵ و میدان اصلی (شکل ۱) برای تعیین هندسه‌ی مدفن و پارامترهای لرزه‌یی زباله‌ی مدفون در مکان‌های دفن زباله‌ی کهریزک (طول جغرافیایی = $51^{\circ} 20' 12''$ ، عرض جغرافیایی = $35^{\circ} 27' 26''$ ، طول جغرافیایی = 53° و عرض جغرافیایی = 32°) انتخاب شده‌اند. مدفن‌های حاضر بر روی تپه‌های کوتاهی از جنس کنگلومرا و لایه‌هایی از خاک ریزنده واقع شده‌اند.

قابل لازم است که زباله‌ها در مدفن تپه‌ی ۶۵ از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۲ دفن شده‌اند، و بنابراین نمونه‌های به‌دست آمده از مدفن مذکور در طی فرایند حفاری و نمونه‌گیری، ۴۳ سال بیشینه‌ی قدمت دارند. هندسه‌ی مدفن فعلی با نقشه برداری و عکس‌های هوایی به‌دست آمده است. نمای هوایی مدفن کهریزک در مرکز پردازش



شکل ۱. مقطع عرضی و نمای هوایی به همراه دریاچه‌ی وسیع شیرابه‌ی زباله‌های شهری در مدفن کهریزک حاصل از Google Earth.

مدفن‌های پوشیده شده با ژئوستنتیک را فراهم کرده است. مدفن OII شاید اولین مدفن ابرازبندی شده باشد که پاسخ‌های شتاب آن ثبت شده است.^[۸] بیشترین الگوی متعارف در آسیب مدفن، بروز ترک‌های سطحی در خاک پوشش نهایی و تغییراتی در هندسه‌ی سازه‌ی OII بود.^[۸] شناسایی‌های پیمایشی بعد از زلزله نشان می‌دهد که سیستم آستر یکی از مدفن‌ها در ناحیه‌ی لس‌آنجلس متحمل آسیب قابل توجهی شده است.^[۹] در سال ۱۹۹۷، مطالعاتی بر روی ۷ مدفن در حومه‌ی شهر لس‌آنجلس به هنگام زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴) انجام شده است.^[۱۰] همچنین در سال ۲۰۰۴،^[۱۱] مجموعه‌یی از آزمون‌های میز لرزه به منظور اندازه‌گیری مشخصه‌های تغییر شکل دینامیکی و گسترش تغییر شکل ماندگار ناشی از بارگذاری پایدار استاتیکی زباله‌های غیراشباع شهری انجام شده است. مطالعات گسترده‌ی دیگری (۲۰۰۶)،^[۱۲] نیز بر روی مشخصات فیزیکی و مکانیکی زباله‌های شهری در شرایط لرزه‌یی انجام شده است. در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی بر روی مشخصات فیزیکی و مکانیکی،^[۱۳-۱۶] و پارامترهای دینامیکی مصالح مدفن کهریزک،^[۱۷] صورت گرفته است.

سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا،^[۱۸] اشاره کرده است که مدفن‌های واقع در نواحی لرزه‌یی با بیش از ۱٪ احتمال تجاوز شتاب بیشینه‌ی زمین از شتاب $0.1g$ در ۲۵۰ سال، باید به‌صورت مقاوم در برابر زلزله طراحی شوند و روش جداسازی لرزه‌یی بستر را به‌عنوان یکی از روش‌ها در طرح لرزه‌یی مدفن‌های زباله معرفی کرده است.^[۱۹] جداسازی لرزه‌یی بستر در طراحی مفهومی است که پاسخ سازه را به‌طور مجزا از حرکات لرزه‌یی با پتانسیل تخریب در نظر می‌گیرد. در جداسازی لرزه‌یی به جای افزایش ظرفیت لرزه‌یی سازه، مفهوم کاهش نیاز لرزه‌یی مبنا قرار می‌گیرد.

سیستم جداساز با سختی افقی اندکی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند، سازه را از مؤلفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌سازد و سیستمی را به‌وجود می‌آورد که بسامد پایه‌ی آن بسیار پایین‌تر از بسامدهای غالب زمین لرزه و نیز بسامد پایه‌ی همان سازه با اتصال گیردار است. دوره‌ی تناوب اساسی سازه‌ی جدا شده (عایق شده) می‌تواند چندین برابر بزرگ‌تر از دوره‌ی تناوب اساسی سازه‌ی فوقانی عایق نشده شود.^[۲۰، ۲۱] دیگر مزیت اصلی سیستم جداساز لرزه‌یی، استهلاک انرژی انتقال یافته به سازه‌ی فوقانی و کاهش انتشار امواج لرزه‌یی در درون سازه‌ی جدا شده است که در هنگام زلزله رخ می‌دهد. پارامتر کلیدی که عملکرد سازه‌ی جدا شده در بستر را تشریح می‌کند، عبارت از بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی مابین سازه و زمین است. بروز مقاومت برشی کم در اغلب فصول مشترک ژئوستنتیکی، امکان لغزش توده‌ی زباله نسبت به زمین سنگی ساختگاه را فراهم می‌کند. از این رو هزینه‌های خطر لرزه‌یی با استفاده از روش جداسازی لرزه‌یی در بستر به‌طور مؤثر کاهش خواهد یافت. در سال ۲۰۰۴،^[۲۲] مجموعه‌یی از آزمایش‌های بارگذاری سینوسی یکنواخت با بسامدهای ۱، ۲، ۳ و ۵ هرتز و دامنه‌ی شتاب‌های $0.1g$ الی $0.7g$ انجام شده و در طی آزمون‌های مذکور، فصل مشترک ژئوتکستایل/پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE)،^۲ ضریب اصطکاکی ثابت و مستقل از بسامد بارگذاری، تنش نرمال و سرعت لغزش را از خود نشان داده است.^[۲۲]

زباله‌ی شهری تولیدی روزانه در شهر تهران با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر، موجب بروز مشکلات عمده‌یی در زمینه‌ی دفع زباله شده است. از آنجایی که مدفن موجود در جنوب تهران (مدفن کهریزک) برای چنین جمعیت و رشد ۱۶٪ آن طراحی نشده است، لذا ممکن است ظرفیت آنجا برای دفع زباله در آینده کافی نباشد. بدین منظور مطالعات متعددی جهت ارزیابی مشخصات مکانیکی،^[۲۳] و مکانیسم نشست،^[۲۴، ۲۵] مدفن کهریزک تهران در راستای توسعه‌ی آن انجام شده است. علاوه بر این، شهر تهران در محدوده‌ی جنوبی کوه‌های البرز مرکزی واقع شده است که

با نخاله‌های ساختمانی درشت در لایه‌ی پوشش نهایی افزایش یافته است. لایه‌ی دوم مصالح زباله، از عمق ۴ m الی ۱۱ m، طبیعتی فیبری داشته و به همین دلیل سرعت امواج حجمی و برشی در ناحیه‌ی مذکور کاهش یافته است. سرعت موج برشی در لایه‌ی بعدی از عمق ۱۱ m الی ۱۷ m به علت وزن لایه‌های بالایی و اثر تحکیمی آن، تقریباً به صورت یکنواخت افزایش یافته است.

براساس آنالیز نمونه‌های بازیافتی، سطح مدفن با خاک رسی به ضخامت ۲ متر پوشیده شده است. این پوشش عمدتاً از نخاله‌های ساختمانی و رس محلی تشکیل شده و رطوبت آن تقریباً صفر است. در زیر پوشش رسی نهایی مدفن، لایه‌ی بی‌زباله‌ی شهری به ضخامت ۲ متر و رطوبت تقریبی ۷٪ حفاری شد. علاوه بر محتویات فیبری، لایه‌ی مزبور شامل شن لای‌دار خوب دانه‌بندی شده است. نمونه‌های حاصل از حفاری اعماق ۴ الی ۱۱ متر، رطوبتی معادل ۱۷٪ با رده‌بندی ماسه‌ی سیلت‌دار برای زباله‌های محدودی مذکور را نشان می‌دهد. چهارمین لایه‌ی زباله‌ی شهری از عمق ۱۱ الی ۱۷ متر ساختاری خمیری را نمایان می‌سازد، که در رده‌ی مصالح ماسه‌ی سیلت‌دار قرار می‌گیرد. به علت تمرکز شیره‌ی زباله در ترازهای پایینی، درصد رطوبت به شدت بالا رفته و قسمت خمیری زباله تبدیل به گل (لجن) سیاه شده است. آخرین لایه‌ی بررسی‌شده اساساً از لجن تشکیل شده و مابقی قسمت‌های زباله در محدوده‌ی مذکور، زباله‌ی بی‌رطوبت ۲۵٪ است. به منظور تهیه‌ی نمونه برای آزمون میز لرزه، یک گودال آزمایشی به عمق ۳ متر توسط ماشین بیل مکانیکی حفر و نمونه‌های حاصل با الک ۵/۸" سرند شدند و نمونه‌های تهیه‌شده، در کیسه‌های پلاستیکی دوتایی به آزمایشگاه انتقال یافتند و در آنجا با بررسی چشمی اجزاء تشکیل‌دهنده، نمونه‌های حاصل از هم تمیز داده شدند. براساس وزن هر گروه از اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی زباله‌ها، اجزاء ذکرشده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. نمونه‌گیری نمونه‌های دست‌خورده با لوله‌ی مغزه‌گیر و نمونه‌های دست‌نخورده توسط نمونه‌گیر شلایی انجام شد.

جدول ۱. میانگین وزنی مشخصات ژئوتکنیکی مصالح مدفن کهریزک حاصل از گودال آزمایشی.

ناحیه	لایه	عمق (m)	درصد رطوبت (ω%)	جرم واحد حجم (kg/m ³)
۱	لایه‌ی ۱	۱۳٫۷-۲۱٫۰	۲۵	۱۲۲۲٫۵
۲	زباله	۳٫۰۶-۳٫۷	۱۷	۹۹۰٫۸
۳	لایه‌ی ۳	۰٫۱-۰٫۳	۷	۹۶۰٫۷

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح مدفن کهریزک حاصل از گودال آزمایشی.

ناحیه	لایه	زاویه‌ی اصطکاک (φ°)	چسبندگی (Pa)	چگالی (kg/m ³)	نسبت (پواسون)
۱	لایه‌ی ۱	۳۵	۱۰۰۰۰	۱۲۲۲	۰٫۳۳
۲	زباله	۳۵	۱۰۰۰۰	۹۹۰	۰٫۳۳
۳	لایه‌ی ۳	۳۵	۱۰۰۰۰	۹۶۰	۰٫۳۳
۱	آسترسی لایه‌ی ۱	۱۹	۸۶۱۸۶	۲۰۵۰	۰٫۳۰
۱	لایه‌ی ۱	۴۰	۳۵۰۰۰۰	۱۶۵۰	۰٫۲۵

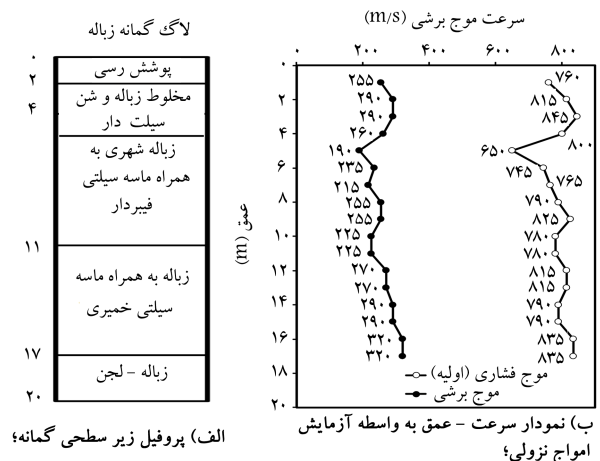
جدول ۳. ترکیب مصالح زباله در مدفن کهریزک.

ماده	شیشه	فلز	کاغذ	خمیر	پلاستیک	سنگ	پارچه	چوب	جمع
درصد	۲٫۷	۲	۹	۵۹	۱۶	۴٫۵	۴٫۵	۲٫۳	۱۰۰

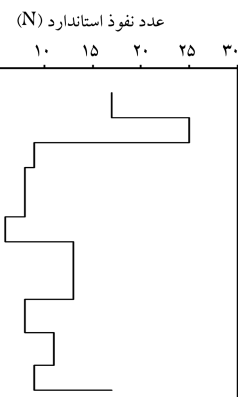
و دفع زباله‌ی آرادکوه مطابق شکل ۱ از Google Earth حاصل شده است. در نوشتار حاضر، مقطع شمالی - جنوبی خاکریز زباله‌ی اصلی در مدفن کهریزک به دلیل ارتفاع بحرانی و شیب بالا و پتانسیل بالای لغزشی مقطع حاضر در مقایسه با سایر مقاطع برای تحلیل لرزه‌ی انتخاب شده است (شکل ۱).

۱.۲. آزمایش‌های در محل مدفن کهریزک

شناسایی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی به واسطه‌ی مطالعات و پژوهش‌های صحرایی از الزام‌های مطالعه‌ی مدفن حاضر است. در ساخت‌گاه مدفن تپه‌ی ۶۵، یک گمانه به قطر ۱۱۳ میلی‌متر به روش دورانی حفاری شد و آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT) در بازه‌های ۱٫۵ متری انجام شدند. به منظور حصول پروفیل‌های سرعت امواج برشی و حجمی در مطالعه‌ی حاضر، آزمایش لرزه‌ی امواج نزولی (Down-Hole) انجام شد و روند حفاری و نمونه‌گیری تا عمق ۲۰ m ادامه یافت. شکل ۲، نمودار گمانه‌ی حفاری شده را نشان می‌دهد، که در آن پروفیل پارامترهایی نظیر سرعت موج برشی (S-wave)، سرعت موج حجمی (P-wave)، و نمودار تغییرات اعداد آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) نشان داده شده‌اند. مقادیر میانگین وزنی، پارامترهایی نظیر: نسبت پواسون، جرم واحد حجم، رطوبت و پارامترهای مقاومتی یک گودال آزمایش حفرشده در جدول‌های ۱ و ۲ معرفی شده‌اند. آزمایش در محل مصالح زباله واقع در زیر لایه‌ی پوششی مدفن نشان داده است که سرعت امواج لرزه‌ی و مقاومت حاصل از آزمایش‌های نفوذ استاندارد طی اختلاط مصالح زباله



الف) پروفیل زیر سطحی گمانه؛



ب) اعداد مقاومت نفوذ استاندارد ثبت شده نسبت به عمق.

شکل ۲. خلاصه اطلاعات اکتشافی گمانه‌ها در مدفن کهریزک.

جدول ۵. مشخصات حرکات ورودی و دوره تناوب اساسی خاکریز در حالت‌های مختلف.

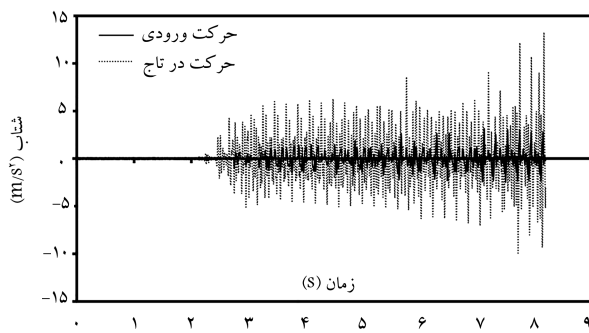
حرکت ورودی	شتاب بیشینه (g)	مدت زمان اصلی (sec)	دوره تناوب میانگین (sec)	دوره تناوب اساسی (sec)		
				عایق نشده	عایق تک لایه	عایق ساندویچی
سینوسی	۰٫۱۵	۶٫۱۹	۰٫۱۳	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۴
	۰٫۴	۶٫۱۹	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸
	۱	۷٫۱۹	۰٫۲۰	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲

جانمایی حسگرهای مزبور مشاهده می‌شود. توالی بارگذاری‌های در قالب امواج سینوسی با بسامد و دامنه‌ی شتاب تدریجی در مراحل بعدی طراحی شدند.

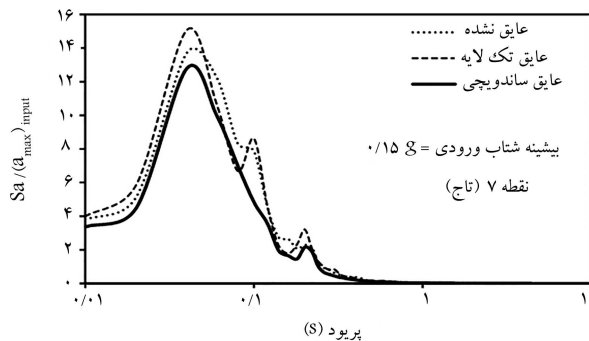
۴. نتایج آزمایش‌های مدل میز لرزه

مدل فیزیکی مدفن کهریزک توسط دستگاه میز لرزه و مشخصات ارائه شده در شکل ۴ الف و جدول‌های ۲ و ۳ آزمایش شد. حرکت‌های لرزه‌ی مورد استفاده، سینوسی شکل بودند که مشخصاتی به شرح جدول ۵ دارند.

شکل ۵، مقایسه‌ی تاریخچه‌های زمانی شتاب در بستر و تاج مدل (نقطه‌ی ۷) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، حرکت‌های لرزه‌ی در تاج مدفن به مقدار قابل توجهی تقویت شده‌اند. نسبت شتاب طیفی عبارت است از حاصل شتاب طیفی موج پاسخ بر شتاب بیشینه‌ی حرکت ورودی (Sa/a_{max}) که برای نقطه‌ی ۷ در تاج خاکریز به ازاء شتاب بیشینه‌ی $a_{max} = 0.15g$ برآورد و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است؛ که در آن، تغییرات نسبت طیفی در حالات



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی شتاب در بستر و تاج مدل به ازاء حرکت ورودی سینوسی شکل با شتاب $a_{max} = 0.15g$ در آزمون میز لرزه.



شکل ۶. طیف شتاب نرمالیزه با شتاب حرکت ورودی در تاج به ازاء رخداد ضعیف ($a_{max} = 0.15g$).

برای کمینه‌سازی اصطکاک مابین زباله و سطوح پلکسی‌گلس در امتداد بارگذاری لرزه‌ی، قبل از جای‌گذاری نمونه‌های زباله درون جعبه، روغن هیدرولیک لغزنانده بر روی دیوارهای جانبی جعبه مالیده شد. در ابتدا، لایه‌ی بستر از جنس رس سفت ساخته شد و طی آزمایش اول، لایه‌های زباله‌ی جامد مستقیماً بر روی بستر رسی اجرا شدند. لیکن در مجموعه آزمایش‌های دوم و سوم، یک سیستم عایق‌ساز (جداساز) سنتتیکی مابین بستر رسی و مصالح زباله قرار داده شد. پیکربندی جداکننده‌ی (عایق‌کننده‌ی) تکی مشابه مقطعی است که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود، که در آن دو صفحه‌ی صیقلی ژئوممبرین بر روی هم قرار می‌گیرند. ساختار جداکننده‌ی مرکب ساندویچی همانند مقطع ارائه شده در شکل ۳ ب است که در پیکره‌ی مذکور سه ورق ژئوممبرین به ضخامت 2 mm از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا استفاده شدند. به منظور جلوگیری از نشت روغن، ورقه‌های ژئوتکستایل ورقه‌ی سولخ‌دار بافته نشده در هر دو طرف ژئوممبرین استفاده شدند که لایه‌ی با اصطکاک پایین در امتداد وقوع لغزش محلی را بوجود می‌آورد.

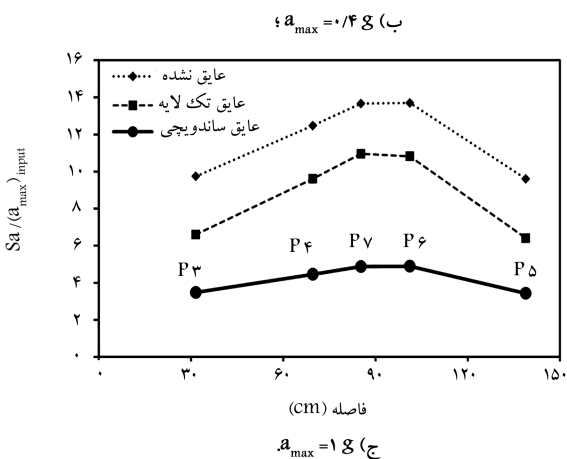
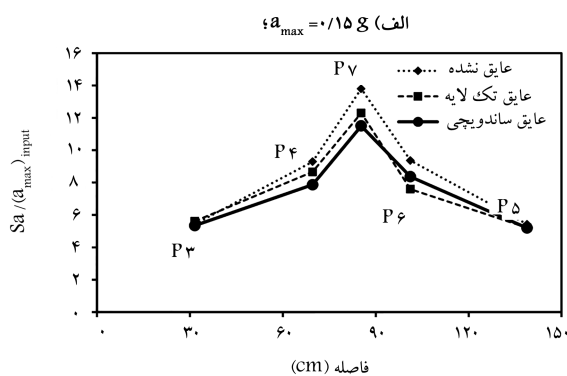
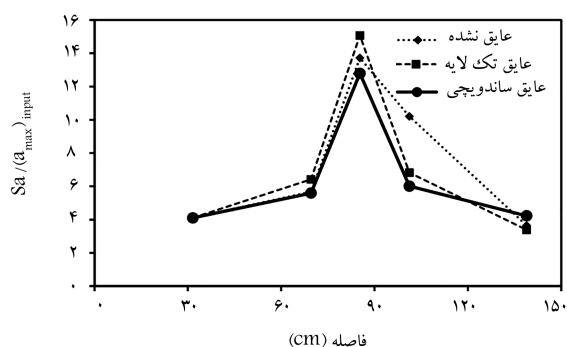
برای حفظ رطوبت، مدل‌های فیزیکی درون جعبه با ورقه‌های نازکی از پلاستیک پوشانیده شدند و در مدت ۱ الی ۱٫۵ روز قبل از انجام آزمون، عمل‌آوری نمونه‌ها صورت پذیرفت. به منظور اندازه‌گیری دقیق هندسه‌ی مدل و تغییرشکل‌های احتمالی طی آزمایش از ماسه‌ی رنگی و رشته‌های نیمه‌پخته‌ی اسپاگتی (به قطر 2.8 mm) استفاده شد که در شبکه‌ی با فواصل منظم به صورت افقی و قائم بر روی دیواره‌ی داخلی جعبه‌ی آزمایش اجرا شدند. در شکل ۴ ب، پیکربندی مدل خاکریز با شبکه‌ی منظم از رشته‌های اسپاگتی قبل از شروع آزمون مشاهده می‌شود.

۴.۳ ابزار بندی

به منظور نظارت بر پاسخ مدفن زباله‌ی مدل شده در معرض رخداد‌های لرزه‌ی، مجموعه‌ی از حسگرها نظیر شتاب‌نگارها و مبدل‌های تفاضل متغیر خطی (LVDT) استفاده شدند. هشت شتاب‌نگار در ترازهای مختلف از مقطع عرضی مدل به همراه یک شتاب‌نگار گیردار بر روی عرشه‌ی میز لرزه نصب شدند. علاوه بر حسگرهای اخیر، هفت LVDT در تاج و گوشه‌های سکوها‌ی شیب‌دار مدل فیزیکی مدفن کهریزک جهت ثبت جابه‌جایی‌های افقی و قائم نصب شدند. شتاب‌نگارهای تک‌محوری مدل Kyowa با خروجی آنالوگی از ولتاژ هستند، که در محدوده‌ی شتاب کامل $\pm 2g$ در راستای دو محور x و y و با انحراف بسامدی معادل ± 0.5 عمل می‌کنند. برای جمع‌آوری داده‌های شتاب‌نگارها، حسگرهای مذکور به واسطه‌ی جعبه‌ی اتصال به کنترل‌کننده‌ی دستگاه میز لرزه متصل شدند. محدوده‌ی دریافت داده‌های LVDT مدل (DLT-50 AS)، 75 mm - با طول خشتی کوتاهی معادل 25 mm است، که در گام‌های زمانی 20 ms پاسخ خروجی را ثبت می‌کند. در مجموعه آزمایش‌های انجام شده، از دوربین‌های ضبط ویدئویی دیجیتال در نمای مقابل و نیز بر بالای جعبه‌ی دستگاه آزمایش برای ثبت تغییرشکل مدل استفاده شد. در شکل ۴ الف،

۰/۲ ثانیه است. حرکات ورودی بزرگ‌تر، مقدار دوره‌ی تناوب سیستم را به مقادیر بزرگ‌تر انتقال داده‌اند. همچنین مطالعه‌ی حاضر نشان داد که دامنه‌ی حرکت ورودی، بیشتر از شرایط بستر دوره‌ی تناوب اساسی سیستم را متأثر می‌سازد. تغییرات نسبت شتاب طیفی (همانند ضریب بزرگ‌نمایی) در نقاط مختلف مدل از آزمایش میز لرزه به ازا حرکت‌های ورودی مختلف در شکل ۹ (الف الی ج) ملاحظه می‌شوند. در تمامی رخدادهای لرزه‌یی، بیشترین بزرگ‌نمایی در تاج مدل رخ داده است که علت آن می‌تواند ناشی از تمرکز امواج انتقال یافته در ناحیه‌ی مذکور باشد. علاوه بر این، استنتاج شد که آسترهای به‌کار رفته در بزرگ‌ترین رخداد لرزه‌یی (یعنی $g/1$) مؤثرتر است. حال آنکه اثر آسترهای مزبور در دو رخداد دیگر (یعنی $g/0.4$ و $g/0.15$) قابل‌اغماض است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر، جابه‌جایی دائمی خاکریز در امتداد افقی است. شکل ۱۰،

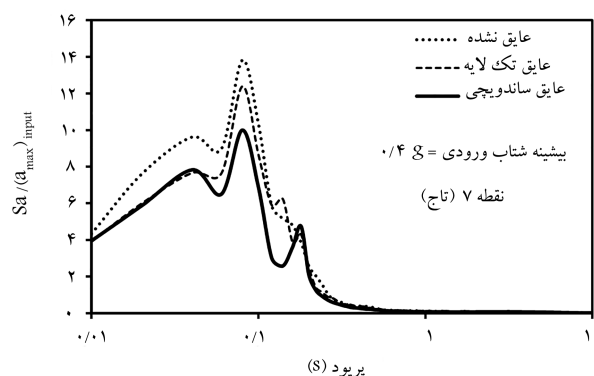


شکل ۹. تغییرات ضرایب بزرگ‌نمایی در نقاط متعدد از مدفن به ازا مقادیر مختلف شتاب بیشینه.

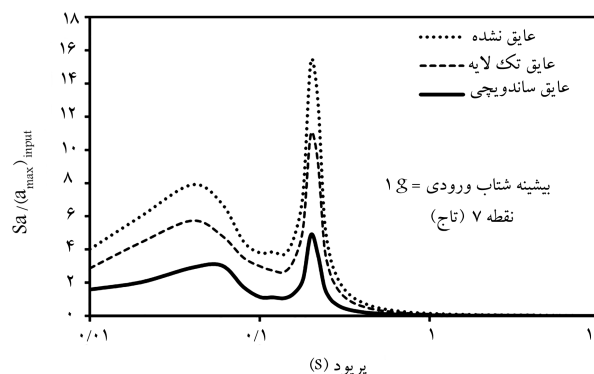
جداننده، جداکننده‌ی تک‌لایه و جداکننده‌ی ساندویچی مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، مقدار بیشینه‌ی نسبت شتاب طیفی در حالت جداکننده‌ی تک‌لایه به مقدار کمی بزرگ‌تر از مقدار آن در حالت فاقد جداکننده است که می‌تواند به دلیل وجود چسبندگی زیاد در فصل مشترک دولایه‌ی ژئوممبرین به ازا شتاب این حرکت ورودی (یعنی $g/0.15$) باشد.

عایق‌کننده‌ی ساندویچی ملایمت بیشتری در مکانیزم لغزش از خود نشان داده و از این رو پاسخ طیفی کوچک‌تری را حاصل کرده است. در تمامی حالت‌ها، بیشینه‌ی شتاب طیفی در دوره‌ی تناوب $g/0.44$ ثانیه به وقوع پیوست. در ترازهای بالای a_{max} ، مقدار بیشینه‌ی نسبت شتاب طیفی به‌واسطه‌ی جداسازی بستر کاهش می‌یابد. این نتایج که در شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شوند، کاهش قابل ملاحظه‌ی شتاب طیفی و افزایش دوره‌ی تناوب اساسی سیستم را نمایان می‌سازد. مکانیزم لغزش مابین آسترها و مصالح دربرگیرنده، منجر به کاهش قابل توجه بزرگ‌نمایی موج در ترازهای بالای شتاب می‌شود.

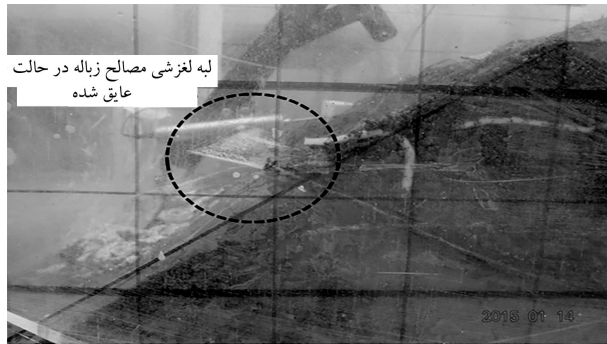
بیشینه‌ی کاهش نسبت شتاب طیفی در تاج (نقطه‌ی ۷)، با جداکننده‌ی ساندویچی در مقایسه با حالت بدون جداکننده به ازا شتاب $g/0.15$ حدوداً معادل ۷٪ است، در حالی که مقدار نسبت شتاب طیفی برای شتاب‌های $a_{max} = g/1$ و $a_{max} = g/0.4$ به ترتیب تقریباً معادل ۲۸٪ و ۶۸٪ است (شکل‌های ۶ الی ۸). علاوه بر این، دوره‌ی تناوب اساسی سیستم در تمامی ترازهای شتاب، کمتر تحت تأثیر جداسازی بستر قرار می‌گیرد. مقدار دوره‌ی تناوب اساسی سیستم به ازا بیشینه‌ی شتاب‌های ورودی $g/0.15$ ، $g/0.4$ ، و $g/1$ به ترتیب معادل $g/0.08$ ، $g/0.044$ ، و $g/0.04$ است.



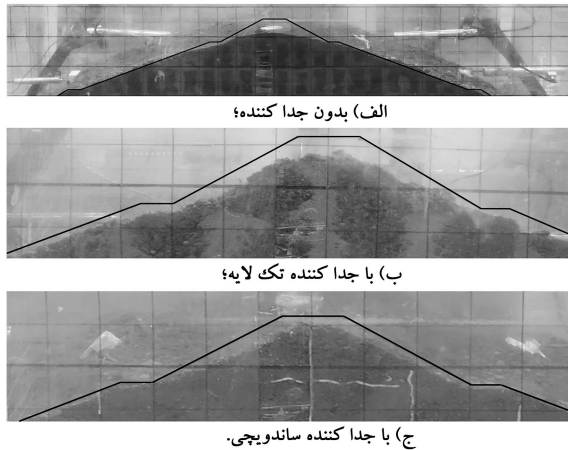
شکل ۷. طیف شتاب نرمالیزه با شتاب حرکت ورودی در تاج به ازا رخداد متوسط ($a_{max} = g/0.4$).



شکل ۸. طیف شتاب نرمالیزه با شتاب حرکت ورودی در تاج به ازا رخداد قدرتمند ($a_{max} = g/1$).

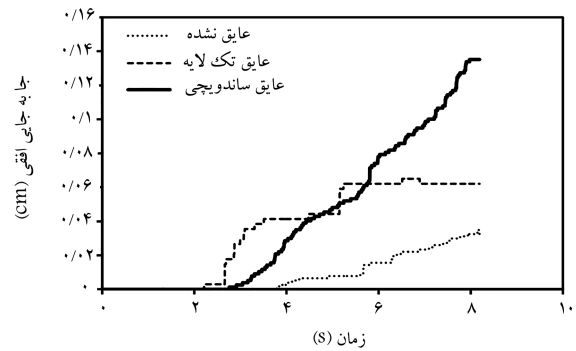


شکل ۱۱. جابه‌جایی توده‌ی زباله در لبه‌ی آستر سنتتیک.

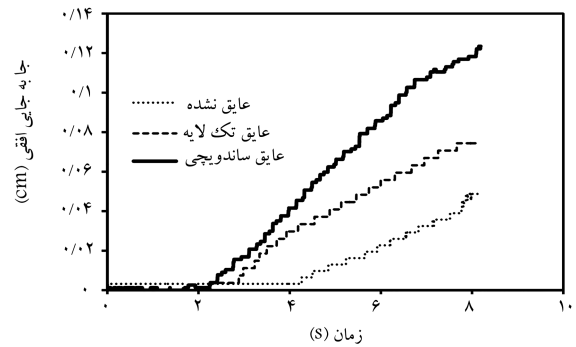


شکل ۱۲. جابه‌جایی قائم نقاط مختلف مدل با شتاب ورودی $a_{max} = 0.9g$ مدل.

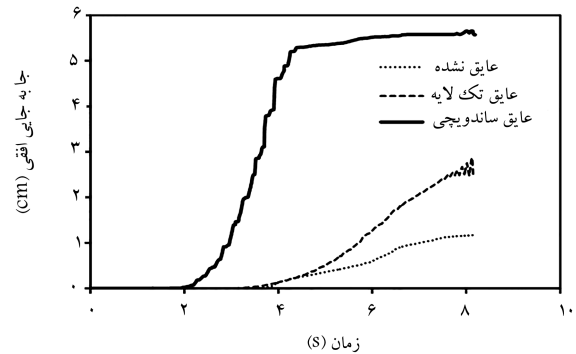
(شکل ۱۰). در آزمون‌های انجام‌شده، هیچ‌گونه ترکی در طی تحریک‌های لرزه‌ی مدل مشاهده نشد و تغییر شکل‌ها عمدتاً از نوع نشست بودند. قوی‌ترین حرکت لرزه‌ی سینوسی شکل (یعنی $a_{max} = 1.0g$) باعث بروز جابه‌جایی لغزشی مشهود در امتداد آسترهای مصنوعی زمینی در انتهای آزمون شد (شکل ۱۱). مطابق شکل مذکور، توده زباله‌ی ناپایدار در مقایسه با حالت بدون جداسازی لرزه‌ی در بستر، با دامنه‌ی قابل توجه حدود (2.5 cm) به‌طور متواتر لغزید. شدت‌های پایین‌تر جابه‌جایی کوچک‌تری را به‌وجود آوردند، به‌طوری که جابه‌جایی توده‌ی زباله در برابر شتاب ورودی $a_{max} = 0.4g$ کمتر از 5 mm شد. شکل ۱۲، تغییر مکان قائم نقاط مختلف از مقطع عرضی مدل به‌ازاء حالت‌های مختلف جداسازی لرزه‌ی در بستر و شتاب بیشینه‌ی ورودی $a_{max} = 0.9g$ (جابه‌جایی 1 mm و بسامد ۱۵ هرتز) را نشان می‌دهد که مطابق آن، جداسازی لرزه‌ی تأثیر عمده‌ی در انتقال و توزیع انرژی در داخل توده‌ی جداسازی شده دارد و مدل جدانشده، نشست‌های قابل توجهی را در مقایسه با حالات جداسازی تجربه می‌کند. علاوه بر این، به دلیل کاهش مضاعف نیروهای برشی انتقال یافته با جداکننده‌ی ساندویچی نسبت به جداکننده‌ی تک‌لایه، تغییر مکان‌های قائم مذکور متعاقباً کاهش می‌یابند. به‌طور مثال، جابه‌جایی قائم در تاج مدل فیزیکی طی شتاب ورودی $a_{max} = 0.9g$ و بدون جداکننده حدوداً معادل 5 cm و در حالت جداکننده‌ی تک‌لایه و جداکننده‌ی ساندویچی به ترتیب حدود 2 cm و 1 cm است. تنش برشی یکی از پارامترهایی است که در نوشتار حاضر بررسی شده است. از آنجایی که تنش برشی با چگالی و سرعت انتشار موج در محیط رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا تاریخچه‌ی تنش برشی را



الف) $a_{max} = 0.15g$



ب) $a_{max} = 0.4g$



ج) $a_{max} = 1g$

شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی در راستای افق در مدل فیزیکی برای نقطه‌ی ۵ بر روی برم پایینی سمت راست.

تاریخچه‌ی زمانی هموارشده‌ی جابه‌جایی افقی در نقاط ۵ را نشان می‌دهد. شکل مذکور نشان می‌دهد که جابه‌جایی کل با شتاب دریافتی (a_{max}) افزایش می‌یابد. همچنین مطابق انتظار، تغییر مکان افقی کل با جداسازی بستر و کاهش ضریب اصطکاک در فصل مشترک مابین صفحات ژئوممبرین افزایش می‌یابد. در واقع روش جداسازی بستر، انتقال امواج لرزه‌ی به نواحی بالایی را کاهش می‌دهد و بنابراین نیروی محرک لرزه‌ی در بلوک محتمل لغزش کاهش می‌یابد. جابه‌جایی افقی واقع بر وجه برم (نقطه‌ی ۵) با a_{max} افزایش می‌یابد. جابه‌جایی دائمی نقطه‌ی ۵ تحت رخداد $0.4g$ به‌ازاء جداسازی‌های تک‌لایه و ساندویچی به ترتیب 2.5 و 1.5 برابر جابه‌جایی نقطه‌ی مزبور در حالت عایق نشده است. گذشته از این، جابه‌جایی افقی با جداسازی ساندویچی در بستر به‌ازاء شتاب بیشینه‌ی $a_{max} = 1.0g$ ، 2.74 الی 4.78 برابر جابه‌جایی نقطه‌ی مورد مطالعه در حالت بدون جداسازی است

با نتایج حالت فاقد روش جداسازی در ۳ تراز از شدت حرکت ورودی در بستر مقایسه شده‌اند. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های حاوی جداساز در بستر نسبت به مدل‌های فاقد عایق‌کننده، تکان‌ها را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ی تضعیف می‌کنند و به لایه‌های بالایی انتقال می‌دهند.

استفاده از ورقه‌های ژئوممبرین به‌عنوان مؤلفه‌ی جداکننده در بستر، زاویه‌ی اصطکاک در فصل مشترک را کاهش می‌دهد؛ اما مقدار قابل‌ملاحظه‌ی چسبندگی موجود، دوره‌ی تناوب اساسی سیستم را افزایش نمی‌دهد. علاوه بر این، به‌کارگیری آستر نیمه بیضوی شکل، باعث افزایش پایداری توده می‌شود. لذا آستر کامپوزیتی (ژئوممبرین/ژئوممبرین) به‌عنوان گزینه‌ی بسیار مناسب برای جداسازی مدفن زباله‌ی شهری تشخیص داده شد.

همچنین ملاحظه شد که جابه‌جایی نسبی به‌وجود آمده در راستای X درون بالاترین توده‌ی زباله به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است، زیرا بزرگای حرکت لرزه‌یی انتقال‌یافته به درون خاکریز زباله به علت جداسازی لرزه‌یی در بستر کاهش یافت. علاوه بر این جابه‌جایی‌های کلی در راستای X به علت لغزش افزایش یافتند. همچنین ملاحظه شد که نشست‌های قائم نیز به شدت متأثر از کاربرد روش جداسازی شدند. نمودارهای بزرگ‌نمایی طیفی نشان دادند که تطابق خوبی مابین حرکت‌های متوسط و قوی وجود دارد و به همان اندازه که قوی‌تر می‌شوند، مقدار بیشینه‌ی طیف بزرگ‌نمایی به‌طور فزاینده کاهش می‌یابد (شکل‌های ۶ الی ۸). بررسی تغییرات تنش برشی در ترازهای مختلف نشان داد که جداسازی لرزه‌یی، تراز تنش‌های انتقال‌یافته به درون توده‌ی جداشده را کاهش می‌دهد.

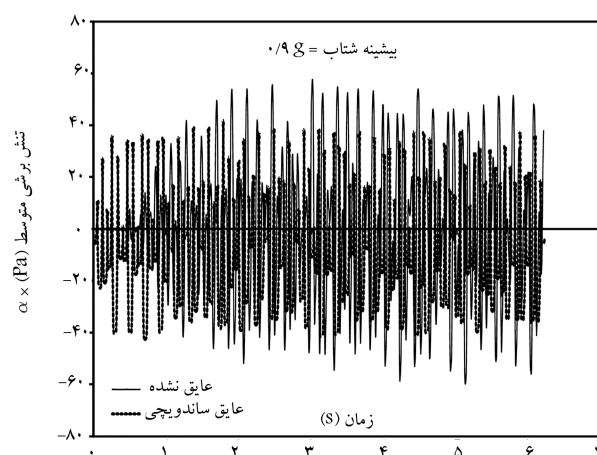
نتایج حاصل از آزمون‌های میر لرزه با حرکات سینوسی شکل، آثار مفید آسترهای مصنوعی زمینی در کاهش شتاب‌های انتقال‌یافته به درون توده‌ی جداشده را ثابت کرد، به‌طوری که می‌تواند ایمنی و پایداری سازه‌ی مدفن زباله‌ی شهری را تضمین کند. به دلیل هزینه‌ی پایین آسترهای مصنوعی زمینی، روش جداسازی درون توده‌ی بستر پتانسیل، کاربری‌های گسترده‌ی در سازه‌های مختلف سراسر دنیا دارد.

قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهری شهرداری تهران انجام شده است. در این راستا، نوشتار حاضر با همکاری مدیریت و تکنسین‌های بخش دفن در مرکز دفن زباله‌ی کهریزک و آزمایشگاه مدل‌سازی فیزیکی مرکز تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک (دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران) انجام شد. همچنین نویسندگان مراتب تشکر خود را از گروه بازرگانی IBA در زمینه‌ی تهیه‌ی ژئوستنتیک‌های مورد استفاده اعلام و برای همکاری مشفقانه‌ی ایشان، صادقانه قدردانی می‌کنند.

پانویس‌ها

1. operating industries Inc.
2. ultra high molecular weight polyethylene
3. geocomposite



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی تنش برشی در تاج مدفن.

می‌توان با رابطه‌ی به فرم $\sigma_{s,t} = \alpha \cdot (\rho \cdot C_s) \cdot v_{s,t}$ محاسبه کرد که در آن ρ معادل چگالی و C_s معرف سرعت انتقال موج برشی در محیط است v_s تاریخچه‌ی سرعت موج برشی ورودی را نشان می‌دهد، که از رکورد شتاب قابل محاسبه است. α نیز ضریبی ثابت است که با توجه به شرایط مرزی تعریف می‌شود. با در دست داشتن نتایج آزمون امواج نزولی و آزمون‌های درجا، تاریخچه‌ی زمانی تنش در شکل ۱۳ ارائه شده است که مطابق آن، مقادیر بیشینه‌ی تاریخچه‌ی تنش‌های برشی در تمامی رکوردهای ثبت‌شده در حالت فاقد جداسازی به جز ابتدای آزمون بیشتر از مقادیر تنش در حالت جدا شده با جداکننده‌ی ساندویچی است. بیشینه‌ی اختلاف مقادیر پیک تنش‌ها، حدود ۴۰ الی ۵۰ درصد است. به عبارتی، کاربرد روش جداسازی، مقادیر تنش را به مقدار قابل توجهی می‌کاهد.

۵. نتیجه‌گیری

بسیاری از پژوهشگران کاربرد لایه‌ی لغزنده در زیرسازه‌ها برای جداسازی درونی توده در بستر با کاهش آثار لرزه‌یی مورد مطالعه را پیشنهاد کرده‌اند. پژوهش‌های مستمر، کارایی جداسازها در کاهش مشکلات ناپایداری را بهبود بخشیده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، پتانسیل آستر صیقلی سنتتیک در کاهش انتشار حرکت‌های افقی زمین‌لرزه به درون پروفیل توده‌ی زباله به‌طور تجربی بررسی شده است. به‌منظور توضیح کارآمدی روش جداسازی درون توده در بستر مدفن، مجموعه‌ی آزمون‌های میر لرزه بر روی مصالح مدفن زباله‌ی کهریزک تهران انجام شدند. دو نوع آسترهای مصنوعی زمینی در آزمایش‌ها به‌کار رفته و نتایج به دست آمده

منابع (References)

1. Han, K.E., Chen, Y., Ling, D. and et al. "Stability and permanent displacements analysis of wasteland during earthquakes", *Acta Seismologica Sinica*, **14**(2), pp. 216-224 (2001).

2. Ayoola, M.G., Inyang, H. and Ogunro, V. "Analyses of seismic damage to interfaces in waste containment systems: A review", *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, **9**(4), pp. 292-304 (Oct., 2005).
3. Matasovic, N. and Kavazanjian Jr., E. "Seismic response of a composite landfill cover", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, **132**(4), pp. 448-455 (2006).
4. Matasovic, N. and Kavazanjian Jr., E. "Seismic response of a composite landfill cover", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(4), pp. 448-455 (2006).
5. Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N. and Bachus R.C. "11th peck lecture: Predesign geotechnical investigation for the OII superfund site landfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, **139**(11), pp. 1849-1863 (2013).
6. Castelli, F., Lentini, V. and Maugeri, M. "Stability analysis of landfills in seismic area", *Geo-Congress 2013*, pp. 1226-1239 (2013).
7. Richardson, G.N., Kavazanjian Jr., E. and Matasovic, N. "RCRA subtitleD (258): Seismic design guidance for municipal solid waste landfill facilities", U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-95/051 (NTIS 95-217923) (1995).
8. Kavazanjian Jr., E. "Seismic design of solid waste containment facilities", *In: Proceedings of 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., pp. 51-89 (13-16 June, 1999).
9. Matasovic, N., Kavazanjian Jr., E., Augello, A.J. and et al. "Solid waste landfill damage caused by 17 January 1994 Northridge Earthquake", In: Woods MC, Seiple RW (eds) *The Northridge, California, Earthquake of 17 January 1994*, 116, Division of Mines and Geology Special Publication. California Department of Conservation, Sacramento, pp. 221-229 (1995).
10. Augello, A.J. "Seismic response of solid-waste landfills", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, 345 p. (1997).
11. Towhata, I., Kawano, Y., Yonai, Y. and et al. "Laboratory tests on dynamic properties of municipal waste", *Proceeding of the 11th Int. Conf. Soil Dynamics and Earthquake Engineering and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Berkeley, 1, pp. 688-693 (2004).
12. Zekkos, D., Bray, J.D., Kavazanjian Jr., E. and et al. "Unit weight of municipal solid waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(10), pp. 1250-1261 (2006).
13. Fakharian, K. and Abdi, M. "Effect of leachate on strength and behavior of surrounding soil of municipal solid waste of Tehran landfills", *In 1st Ground Improvement Conference*, Tehran, Iran (2002).
14. Shariatmadari, N., Machado, S., Noorzad, A. and et al. "Shearing rate effect on mechanical behavior of MSW materials", *In 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San diego, California, pp. 1-8 (2010).
15. Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Keramati, M. and et al. "An experimental investigation on the mechanical behavior of MSW", *International Journal of Civil Engineering*, **12**(4), pp. 292-303 (2014).
16. Shariatmadari, N., Sadeghpour, A. and Razaghian, F. "Effects of aging on the shear strength behavior of municipal solid waste", *International Journal of Civil Engineering*, **12**(3), pp. 226-237 (2014).
17. Keramati, M., Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M. and et al. "Dynamic behaviour of MSW materials under cyclic triaxial testing: A case of kahrizak landfill, Tehran, Iran", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **40**(2), pp. 75-83 (2016).
18. United States Environmental Protection Agency, "Solid waste disposal facility criteria, technical manual EPA530-R-93-017, PB94-100-450", (Nov., 1993).
19. Yegian, M.K. and Kadakal, U. "Geosynthetic interface behavior under dynamic loading", *Geosynthetics International*, **5**(1-2), pp. 1-16 (1998).
20. Kircher, C.A. "Seismically isolated structures", FEMA P-751, NEHRP Recommended Provisions, Chapter 12 (2012).
21. Mohammadi, M. "Seismic behavior of sliding base isolation systems, regarding restitution factor and variable friction coefficient", *International Journal of Civil Engineering*, **15**(2), pp. 1-12 (2017).
22. Yegian, M.K. and Kadakal, U. "Foundation isolation for seismic protection using smooth synthetic liner", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, **130**(11), pp. 1121-1130 (2004).
23. Shariatmadari, N., La, B.A., Nezhad, H.E. and et al. "Investigating the stress-strain and failure behavior of soils contaminated with urban solid waste leachate: A case study from the landfill area of saravan, Rasht", *International Journal of Civil Engineering*, **14**(7), pp. 451-457 (2016).
24. Shariatmadari, N. and Mansouri, A. "Monitoring the landfill settlement, case study: Tehran sanitary landfill", *Proceedings of the 8th Japan-Korea-France Joint seminar in Geo-Environmental Engineering*, Kyoto, Japan (2008).
25. Zafarani, H., Hassani, B. and Ansari, A. "Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **42**, pp. 197-218 (2012).
26. TWMO, "<http://pasmand.tehran.ir/Default.aspx?tabid=328>", (Accessed 21 May 2016).
27. Iai, S. "Similitude for shaking table tests on soil-structure fluid model in 1-g gravitational field", *Soils and Foundations*, **29**(1), pp. 105-118 (1989).
28. Meymand, Ph.J. "Shaking table scale model tests of non-linear soil-pile-Superstructure interaction in soft clay", PhD Dissertation, U.C. Berkeley (1998).