

## بررسی عددی-آزمایشگاهی جداساز لرزه‌ای ژئوسنتتیکی در بستر مدفن‌های زباله جامد شهری: مطالعه مدفن کهریزک تهران

وحید میرحاجی<sup>۱</sup>، یاسر جعفریان<sup>۲\*</sup>، محمدحسن بازیار<sup>۳</sup>، محمدکاظم جعفری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سلماس، سلماس، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱ آذر ۱۳۹۶

بازنگری: ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۷

پذیرش: ۶ مرداد ۱۳۹۷

ارائه آنلاین: ۲۳ مرداد ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

مدفن زباله جامد شهری

لایرن ژئوسنتتیکی

جداسازی لرزه‌ای

میز لرزه

FLAC 2D

**چکیده:** بارهای لرزه‌ای ناشی از جابجایی‌های درون زباله، سیستم لایرن تحتانی، سیستم پوشش، پی و فصول مشترک می‌توانند باعث آسیب مدفن‌های زباله شهری شوند. مصالح سنتتیکی صیقلی واقع در زیر سازه‌ها می‌توانند با مکانیزم لغزندگی و جذب انرژی وارده از زلزله‌ها، باعث حفاظت لرزه‌ای شوند. در مطالعه حاضر، بررسی‌های آزمایشگاهی به منظور ارزیابی نقش جداسازی بستر درون خاکی بر روی پاسخ لرزه‌ای مدفن زباله شهری کهریزک انجام گرفتند. آزمایش‌های میز لرزه روی خاکریز زباله جامد شهری عایق شده با لاینرهای شبه بیضوی در معرض تحریک‌های سینوسی هارمونیک در بستر، انجام شدند. همچنین مدل‌سازی عددی بر روی مدل فیزیکی صورت پذیرفت. نتایج حالت‌های جدا شده و جدا نشده بر حسب جابجایی دائمی و پاسخ لرزه‌ای مورد مقایسه قرار گرفتند. در ادامه، رفتار مدل عددی مدفن تحت تأثیر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه همخوانی خوبی بین نتایج مدل فیزیکی و مدل عددی بزرگ مقیاس حاصل شد. مطالعات صورت گرفته ثابت کردند که به کارگیری سیستم لایرن کامپوزیتی با کاهش بیشتر ضریب اصطکاک کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار شتاب‌ها و جابجایی‌ها حاصل نموده و در شرایط لرزه‌ای از سازه محافظت به عمل می‌آورد. کارایی این تکنیک با افزایش تراز شتاب ورودی افزایش می‌یابد. نتایج نشان دادند که افزایش مدول برشی، مقدار بزرگنمایی طیفی و جابجایی نسبی را کاهش می‌دهد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش سن زباله، جداسازی بستر مقدار جابجایی و عرض ترک را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، اجرای لاینر بصورت تخت، حرکت گوه گسیختگی به سمت کناره‌ها را تسهیل نموده و اجرای لاینر مقعر مانع از حرکت گوه گردیده و نهایتاً کاهش نشست می‌گردد.

### ۱- مقدمه

عملکرد لرزه‌ای مدفن زباله‌های شهری در گذشته حائز اهمیت زیادی نبود زیرا ناپایداری مدفن‌های زباله بعنوان مسئله‌ای عملکردی به شمار می‌رفت که می‌توانست با جایگذاری زباله در هندسه‌ای پایدار رفع گردد. امروزه مدیریت زباله‌ها با وجود پیشرفت‌هایی که در زمینه‌هایی نظیر فرآیند دفن مطمئن، انواع مختلف لاینرهای ژئوسنتتیکی و سیستم‌های جمع‌آوری شیرابه به وجود آمده است، نیازمند ارزیابی دقیق تغییرشکل‌های ناشی از بار است. جابجایی‌های دائمی بالای مدفن یا جوه جانبی آن می‌تواند موجب تراوش‌های نامطلوبی گردد که ممکن است به آلودگی آب‌های زیرزمینی بیانجامد [۱-۵]. آیین‌نامه‌های ایالات متحده آمریکا در زمینه مدفن‌های زباله تصریح می‌کنند که مدفن‌های زباله واقع در نواحی لرزه‌خیز بایستی طوری طراحی گردند که در برابر شتاب‌های انتقال یافته مقاومت نمایند [۶]. جابجایی‌های حاصله و گسیختگی‌های احتمالی می‌تواند به لاینر آسیب رسانده و عملکرد پوشش یا سیستم‌های جمع‌آوری شیرابه، گاز

و زهکشی را مختل کند. پاسخ لرزه‌ای مدفن (OII) در طی زلزله نورث‌ریج ۱۹۹۴، به واسطه ایزاربنندی فرصت‌های ارزشمندی در بررسی عملکرد لرزه‌ای مدفن‌های پوشیده‌شده با ژئوسنتتیک را فراهم نموده است. بیشترین الگوی متعارف در آسیب مدفن، بروز ترک‌های سطحی در خاک پوشش نهایی و تغییراتی در هندسه سازه OII بود [۷ و ۸]. سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا [۶] اشاره کرده است که مدفن‌های واقع در نواحی لرزه‌ای با بیش از ۱۰٪ احتمال تجاوز شتاب حداکثر زمین از شتاب  $0.1g$  در ۲۵ سال، بایستی به صورت مقاوم در برابر زلزله طراحی شوند. این تعریف حدود نیمی از مساحت ایالات متحده و بیش از دو سوم مساحت ایران را در بر می‌گیرد. همچنین این سازمان روش جداسازی لرزه‌ای بستر را به عنوان یکی از روش‌ها در طرح لرزه‌ای مدفن‌های زباله معرفی کرده است [۹].

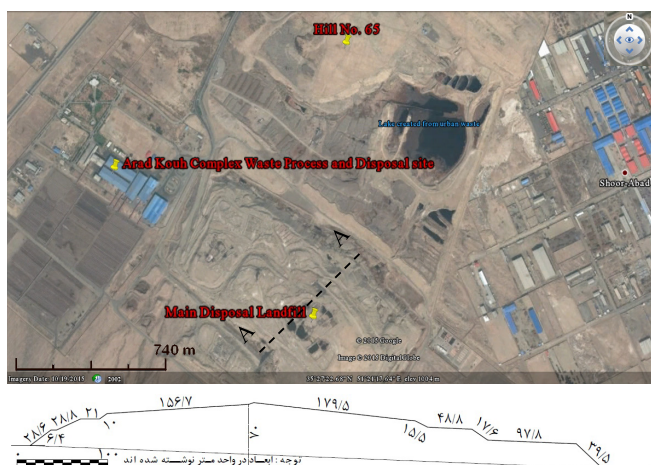
سیستم جداساز با سختی افقی اندکی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند سازه را از مؤلفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌سازد. پیروید اساسی سازه جدا شده (عایق شده) می‌تواند چندین برابر بزرگتر از پیروید اساسی سازه فوقانی عایق نشده گردد. دیگر مزیت اصلی سیستم جداساز

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: yjafarianm@iiees.ac.ir

## ۲- مدفن کهریزک

مدفن کهریزک بزرگ‌ترین مرکز دفع زباله در ایران است که روزانه بیش از ۷۰۰۰ تن از زباله‌های جامد شهری تهران جمع‌آوری شده و به آنجا منتقل می‌شود. این مرکز تنها سایت دفن زباله بزرگ در ۲۵ کیلومتری جنوب تهران با مساحت ۱۲۰۰ هکتار بوده که در طی بیش از ۴۰ سال اخیر بعنوان محل دفع زباله مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس گزارش‌های اخیر شهرداری تهران، تنها ۵٪ زباله‌های جامد شهری در سایت فرآوری زباله به کمپوست (کود آلی) تبدیل شده و تقریباً ۳/۵٪ زباله‌های خشک بازیافت می‌گردد و در همان حال باقیمانده زباله‌ها دفن می‌شوند [۱۵ و ۱۶].

ارتفاع بلندترین مقطع دیوی اصلی زباله در زمان برداشت هندسی به ۷۰ متر رسیده است. در مقاله حاضر، به منظور حصول رفتار مکانیکی در جای زباله دفن شده، دو مدفن جداگانه به نام‌های تپه ۶۵ و میدان اصلی (شکل ۱) برای تعیین هندسه مدفن و پارامترهای لرزه‌ای زباله مدفون در مکان‌های دفن زباله کهریزک



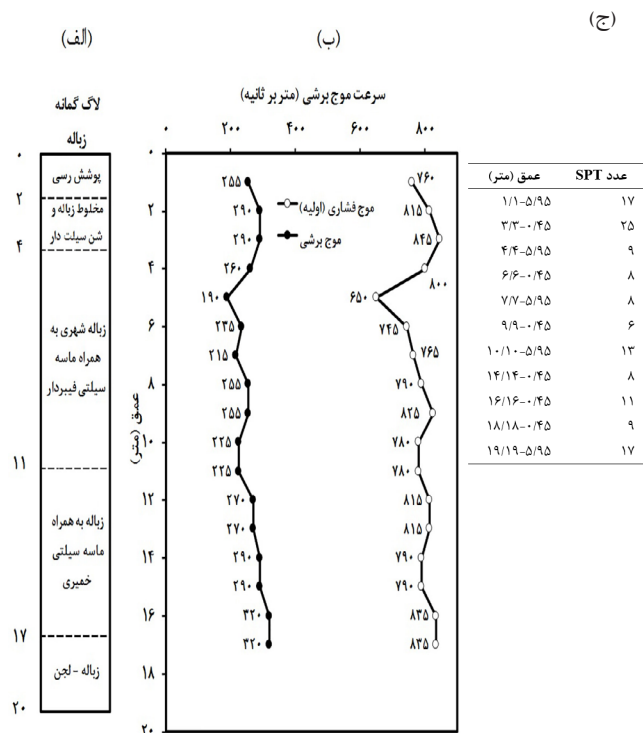
شکل ۱. نمای هوایی و مقطع عرضی مورد مطالعه (A-A) در مدفن میدان اصلی کهریزک [۱۷]  
Fig.1. Aerial view and studied cross section (A-A) in Kahrizak main disposal landfill [17]

طول جغرافیایی =  $51^{\circ} 20' 10''$ ، عرض جغرافیایی =  $28^{\circ} 15' 7''$  (۳۵°) انتخاب شدند. قابل ذکر است که زباله‌ها در مدفن تپه ۶۵ از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۲ دفن شده و بنابراین نمونه‌های بدست آمده از این مدفن در طی فرآیند حفاری و نمونه‌گیری حداکثر دارای ۴۳ سال قدمت می‌باشند. هندسه مدفن فعلی با نقشه‌برداری بدست آمد. در مقاله حاضر، بحرانی‌ترین مقطع (مقطع شمالی - جنوبی) خاکریز زباله اصلی در مدفن کهریزک مطابق شکل ۱ برای تحلیل لرزه‌ای انتخاب می‌گردد. به دلیل عدم صدور مجوزهای قانونی جهت حفاری در مدفن اصلی، از نمونه‌های سالخورده مدفن تپه ۶۵ استفاده شد. این امر با فرض تشابه

لرزه‌ای استهلاک انرژی انتقال یافته به سازه فوقانی و کاهش انتشار امواج لرزه‌ای در درون سازه جدا شده است که در هنگام زلزله رخ می‌دهد [۱۰]. بروز مقاومت برشی کم در اغلب فصول مشترک ژئوسنتتیکی، امکان لغزش توده زباله نسبت به زمین سنگی ساختگاه را فراهم می‌نماید. از این رو هزینه‌های خطر لرزه‌ای با استفاده از روش جداسازی لرزه‌ای در بستر به طور مؤثر کاهش خواهد یافت. برخی مطالعات زاویه اصطکاک فصل مشترک ژئوممبرین/ژئوممبرین در حالت بارگذاری دینامیکی را کمتر از ۷° حاصل نمود که چنین مشخصه‌ای جهت جداسازی لرزه‌ای بستر سازه‌های لاغر در برابر واژگونی بسیار مناسب به نظر می‌رسد [۱۱]. مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری سینوسی یکنواخت با فرکانس‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ هرتز و دامنه شتاب‌های ۰/۱g الی ۰/۷g، با فصل مشترک ژئوتکستایل/پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) ۱، ضریب اصطکاک ثابت و مستقل از فرکانس بارگذاری، تنش نرمال و سرعت لغزش را از خود نشان داد. محققین اخیر حفاظت لرزه‌ای پی‌های سطحی سازه‌های واقع بر روی لاینر صاف ژئوسنتتیکی را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که لاینر UHMWPE / Geotextile ترکیب مناسبی برای جداسازی لرزه‌ای پی و جذب انرژی طی لغزش است [۱۲].

زباله شهری تولیدی روزانه در شهر تهران با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر، موجب بروز مشکلات عمده‌ای در زمینه دفع زباله گردیده است. از آنجایی که بزرگترین مدفن تهران (مدفن کهریزک) جوابگوی زباله تولیدی جمعیت فعلی تهران طراحی نشده است، لذا ممکن است ظرفیت این مدفن برای دفع زباله در آینده کافی نباشد [۱۳]. علاوه بر این، این شهر در محدوده جنوبی کوه‌های البرز مرکزی واقع شده است که گسل‌های متعددی با خطرات لرزه‌ای قابل ملاحظه‌ای در آن ناحیه وجود دارد [۱۴]. در مطالعه حاضر، مجموعه‌ای از آزمایش‌های میز لرزه بر روی زباله‌های جامد شهری کهریزک در حالات جدا شده و جدا شده با لاینر نیمه بیضوی شکل با حرکات القایی هارمونیک سینوسی در بستر صورت پذیرفته است. به منظور ارزیابی کفایت روش جداسازی بستر در حفاظت لرزه‌ای خاکریزهای زباله با لاینر ژئوسنتتیکی، پاسخ لرزه‌ای مدل مورد بازرسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی در ساختگاه مدفن کهریزک تهران به تفصیل ارائه می‌گردد. در ادامه با استفاده از داده‌های صحرایی، مدل سازی عددی و صحت سنجی با پاسخ‌های ثبت شده طی آزمون‌های فیزیکی میز لرزه و با به کارگیری نرم افزار FLAC 2D میسر گردید. مدل عددی حاضر به منظور مطالعه پارامتریک رفتار مدفن به کار می‌رود که در طراحی مدفن‌های جدید می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

1 Ultra High Molecular Weight Polyethylene



ساختاری زباله‌های مدفن میدان اصلی طی گذشت زمان با مصالح مدفن تپه ۶۵ صورت پذیرفت. در این تحقیق فرض می‌شود که مدفن بسته شده و مصالح تازه نبوده و مشخصات مصالح در سنین مختلف تغییر می‌کند.

## ۱-۲ - آزمایش‌های در محل مدفن کهریزک

تحقیقات صحرایی مستلزم شناسایی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی جهت مطالعه مدفن حاضر است. در ساختگاه مدفن تپه ۶۵، یک گمانه به روش دورانی حفاری شده و آزمایش‌های نفوذ استاندارد ۱ در بازه‌های ۱/۵ متری انجام پذیرفتند. علت انتخاب این محل برای حفاری، قدمت زباله‌های مدفن است که طی آن شیرابه زباله‌ها مطابق مدفن‌های مهندسی زهکشی شده‌اند. به منظور حصول پروفیل‌های سرعت امواج برشی و حجمی در مطالعه حاضر، آزمایش لرزه‌ای امواج نزولی دان‌هول<sup>۲</sup> انجام گرفت. روند حفاری و نمونه‌گیری تا عمق ۲۰ m ادامه یافت. شکل ۲ نمودار گمانه حفاری شده را نشان می‌دهد که در آن پروفیل پارامترهایی نظیر سرعت موج برشی، سرعت موج حجمی و عدد آزمایش نفوذ استاندارد ارائه می‌گردند. مقادیر میانگین وزنی پارامترهایی نظیر سرعت موج برشی، نسبت پواسون، وزن واحد حجم و محتویات رطوبتی یک گمانه و گودال آزمایش حفارشده در جداول ۱ و ۵ معرفی می‌شوند.

### جدول ۱. میانگین وزنی مشخصات ژئوتکنیکی مصالح

#### مدفن کهریزک حاصل از گمانه حفاری شده

Table 1. Weighted mean of the geotechnical properties of MSW materials in the Kahrizak landfill

ناحیه	لایه	عمق (m)	درصد رطوبت (%w)	وزن واحد حجم (kg/m <sup>3</sup> )
زباله	لایه ۱	۱۳/۷ - ۲۱/۰	۲۵	۱۲۲۲/۵
	لایه ۲	۶/۳۰ - ۱۳/۷	۱۷	۹۹۰/۸
	لایه ۳	۰/۰ - ۶/۳	۷	۹۶۰/۷

شکل ۲. خلاصه اطلاعات اکتشافی گمانه‌ها در مدفن کهریزک: (الف) پروفیل زیرسطحی گمانه، (ب) نمودار سرعت - عمق بواسطه آزمایش امواج نزولی، (ج) اعداد مقاومت نفوذ استاندارد ثبت شده نسبت به عمق

Fig.2. Summary of exploratory boreholes information in Kahrizak landfill: (a) Borehole subsurface profile, (b) Travel-time curve from down-hole Test, (c) Recorded SPT resistance blow counts versus depth

آزمایش در محل مصالح زباله واقع در زیر لایه پوششی مدفن نشان داده است که سرعت امواج لرزه‌ای و مقاومت حاصل از آزمایش‌های نفوذ استاندارد طی اختلاط مصالح زباله با نخاله‌های ساختمانی درشت در لایه پوشش نهایی، افزایش یافته است. لایه دوم مصالح زباله، از عمق ۴ m الی ۱۱ m، طبیعتی فیبری داشته و به همین دلیل سرعت امواج حجمی و برشی در این ناحیه کاهش یافته است. سرعت موج برشی در لایه بعدی از عمق ۱۱ m الی ۱۷ m به علت وزن لایه‌های بالایی و اثر تحکیمی آن، تقریباً بصورت یکنواخت افزایش یافته است. بر اساس آنالیز نمونه‌های بازیافتی، سطح مدفن با خاک رسی به ضخامت ۲ متر پوشیده شده است. این پوشش بیشتر، از نخاله‌های ساختمانی و رس محلی تشکیل شده و رطوبت آن تا اندازه زیادی نزدیک صفر است. در زیر پوشش رسی نهایی مدفن، لایه‌ای از زباله شهری به ضخامت ۲ متر و رطوبت تقریبی ۷٪ حفاری گردید. علاوه بر محتویات فیبری، لایه مزبور شامل شن لای دار خوب دانه‌بندی شده است. نمونه‌های حاصل از حفاری اعماق ۴ الی ۱۱ متر، رطوبتی معادل ۱۷٪ با رده‌بندی ماسه سیلت‌دار فیبری برای زباله‌های این محدوده را نشان می‌دهد. چهارمین لایه زباله شهری از عمق ۱۱ الی ۱۷ متر ساختاری خمیری را نمایان می‌سازد که در رده مصالح ماسه‌ای سیلت‌دار قرار می‌گیرد. به علت تمرکز شیرابه زباله در ترازهای پایینی، درصد رطوبت به شدت بالا رفته و قسمت خمیری زباله تبدیل به گل (لجن) سیاه گردیده است. آخرین لایه بررسی شده اساساً از لجن تشکیل شده و مابقی قسمت‌های زباله در این محدوده، زباله‌ای با رطوبت ۲۵٪ است.

1 SPT

2 Down-hole

اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ها از هم تمیز داده شدند. براساس وزن هر گروه از اجزای تشکیل دهنده زیاله‌ها، این اجزاء در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌گیری نمونه‌های دست‌خورده با لوله مغزه‌گیر و نمونه‌های دست‌نخورده توسط نمونه‌گیر شلبی انجام گرفت.

### جدول ۲. ترکیب مصالح زیاله در مدفن کهریزک

Table 2. Combination of the MSW materials at the Kahrizak landfill

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

### ۳-۲ قانون شبیه‌سازی

در مقاله حاضر، از قانون شبیه‌سازی یایی (۱۹۸۹)<sup>۳</sup> و میمند (۱۹۹۸)<sup>۴</sup> برای آزمون‌های میز لرزه استفاده شد [۲۰ و ۲۱]. پارامترهای مقیاس بندی مابین نمونه اصلی و مدل آزمایشگاهی در آزمایش‌های میز لرزه مطابق جدول ۴ حاصل شد که در آن  $\lambda$  بعنوان نسبت خطی مابین نمونه اصلی و مدل تعریف می‌گردد. ضریب مقیاس بندی به کار رفته در این آزمون‌ها ( $\lambda$ )، براساس تجهیزات آزمایشگاه مورد استفاده و نیز محدودیت‌های آن معادل  $\lambda = 76/36 = 1/\lambda$  در نظر گرفته شد.

### جدول ۴. قانون شبیه‌سازی مابین نمونه

#### اصلی و مدل فیزیکی [۲۰ و ۲۱]

Table 4. Law of similitude of the prototype and [small scale model of embankment [20-21]

پارامتر	ضریب مقیاس	پارامتر ضریب مقیاس	پارامتر ضریب مقیاس	پارامتر
چگالی	۱	شتاب	۱	طول
سرعت موج برشی	$\lambda^{1/2}$	تنش	$\lambda$	کرنش
ضریب برشی و بالک	$\lambda$	زمان	$\lambda^{1/2}$	فرکانس

### ۳-۳ آماده‌سازی تست میز لرزه

مطالعه حاضر با استفاده از تجهیزات و لوازم دستگاه میز لرزه آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تهران انجام پذیرفت. این میز ظرفیت ۵ تن و دامنه فرکانسی ۰/۰۱-۱۵ هرتز را داشته و دامنه جابجایی  $\pm 125 \text{ mm}$  و حداکثر شتاب افقی ۱g (که معادل شتاب گرانش است) را پشتیبانی می‌کند. به منظور شبیه‌سازی تکان‌های افقی نظیر رخداد لرزه‌ای، از میز این آزمایشگاه به ابعاد  $1/2 \times 1/8$  متر که توسط ابزار هیدرولیکی یک درجه آزادی با رایانه کنترل می‌شود، بهره گرفته شد. جعبه دستگاه آزمایش با ابعاد بیرونی (عمق)  $123 \text{ cm} \times$  (عرض)  $80 \text{ cm} \times$  (طول)  $182 \text{ cm}$  از صفحات پلکسی‌گلس<sup>۵</sup> به ضخامت ۲cm تشکیل

به منظور تهیه نمونه برای تست میز لرزه، گودالی آزمایشی به عمق ۳ متر توسط ماشین بیل مکانیکی حفر شده و نمونه‌های حاصله با الک<sup>۸</sup>  $5/8$  سرند گردیده و نمونه‌ها به دست آمدند. نمونه‌های حاصل در کیسه‌های پلاستیکی دوتایی به آزمایشگاه انتقال یافته و در آنجا با بررسی چشمی

### ۳-۳ آزمایش میز لرزه

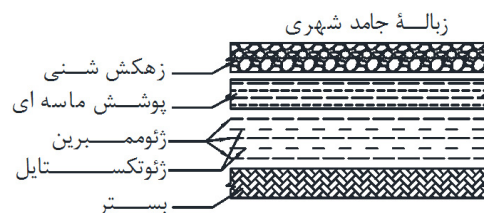
#### ۱-۳ میز لرزه

هدف از این بخش، مطالعه پاسخ دینامیکی شیب‌های بحرانی و احتمال گسیختگی مدفن کهریزک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه است. در ساخت مدل فیزیکی مدفن کهریزک از مصالح زیاله، رس ساخت بستر و لاینرهای مصنوعی مرکب<sup>۱</sup> ساخته شده از ژئوممبرین روغن کاری شده در دو سطح به همراه صفحه‌های زمین پارچه<sup>۲</sup> مطابق جدول ۳ استفاده گردید. ضریب اصطکاک مابین لاینر مصنوعی و مصالح زیاله نیز با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران بدست آمد. شکل ۳ نمونه‌ای از برش عرضی سیستم لاینر بکار رفته در مقاله حاضر را نشان می‌دهد. در این تحقیق مجموعه‌ای از آزمون‌های میز لرزه (شامل ۱۲ رخداد لرزه‌ای) بر روی خاکریز مقیاس شده‌ای از مدفن زیاله کهریزک انجام گرفته و جابجایی لغزشی و همچنین پاسخ لرزه‌ای شیب‌های جانبی مدل اندازه‌گیری و تحلیل شدند.

### جدول ۳. مشخصات فیزیکی و ژئوممبرین ژئوتکستایل [۱۸]

Table 3. Physical properties of geo - [membrane and geotextile [18]

نوع ژئوتکستیک	دانسیته	ضخامت (mm)	مدول الاستیسیته (Pa)	مقاومت کششی (kN/m)
ژئوممبرین	$935 \text{ kg/m}^3$	۲	$14/5 \times 10^6$	۲۹
ژئوتکستایل	$200 \text{ gr/m}^2$	۲	-	۱۰/۵



### شکل ۳. اجزای نمونه سیستم لاینر مدفن زیاله در جداسازی

#### لرزه‌ای بستر درون توده به صورت مرکب (ساندویچی) [۱۹]

Fig.3. Cross typical landfill lining system components for in-soil base isolation in type of [Sandwich geocomposite isolator [19]

3 Iai, 1989

4 Meymand, 1998

5 Plexiglass

1 Geocomposite

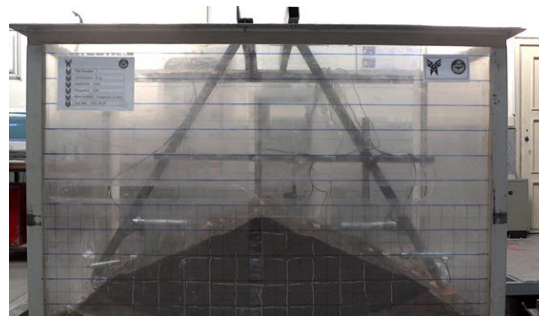
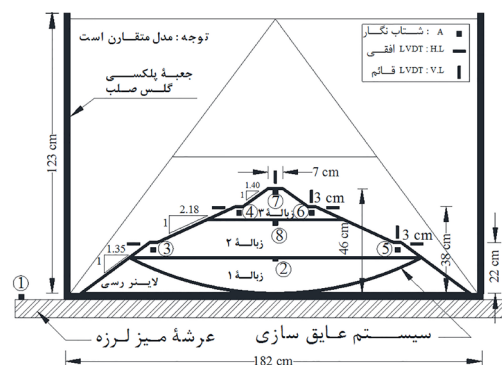
2 Geotextile

برای به حداقل رساندن اصطکاک مابین زباله و سطوح پلکسی گلس در امتداد بارگذاری لرزه‌ای، قبل از جایگذاری نمونه‌های زباله درون جعبه، دیوارهای جانبی جعبه با روغن هیدرولیک، روغن کاری شد. در ابتدای خاکریزی، لایه بستر از جنس رُس سفت ساخته شده و طی آزمایش اول، لایه‌های زباله جامد مستقیماً بر روی بستر رسی اجرا گردیدند. لیکن در مجموعه آزمایش‌های بعدی، یک سیستم عایق‌کننده (جداساز) سنتتیکی مابین بستر رسی و مصالح زباله قرار داده شد. پیکربندی جداساز مشابه مقطعی است که در شکل ۳ دیده می‌شود، که در آن سه صفحه صیقلی ژئوممبرین<sup>۱</sup> به ضخامت ۲ mm از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا بر روی هم قرار دارند. به منظور جلوگیری از نشت روغن، ورقه‌های زمین پارچه‌ای سوراخ‌دار بافته نشده<sup>۲</sup> در هر دو طرف ژئوممبرین مورد استفاده قرار گرفتند که لایه‌ای با اصطکاک پایین در امتداد وقوع لغزش محلی را بوجود آورد. برای حفظ رطوبت، مدل‌های فیزیکی درون جعبه با ورقه‌های نازکی از پلاستیک پوشانیده شده و در مدت ۱ الی ۱/۵ روز قبل از انجام تست عمل‌آوری نمونه‌ها صورت پذیرفت. به منظور اندازه‌گیری دقیق هندسه مدل و تغییرشکل‌های احتمالی طی آزمایش از ماسه رنگی و رشته‌های نیمه پخته اسپاگتی (به قطر ۲/۸ mm) بهره گرفته شد که در شبکه‌ای با فواصل منظم بصورت افقی و قائم بر روی دیواره داخلی جعبه آزمایش اجرا گردیدند.

### ۳-۴ ابزاربندی

به منظور پایش پاسخ مدفن زباله در برابر رخدادهای لرزه‌ای، مجموعه‌ای از حسگرهای شتاب<sup>۳</sup> و جابجایی<sup>۴</sup> بکار رفتند. هشت شتاب‌نگار در ترازهای مختلف از مقطع عرضی مدل به همراه یک شتاب‌نگار گیردار بر روی عرشه میز لرزه نصب گردیدند. علاوه بر حسگرهای اخیر، هفت حسگر جابجایی در تاج و گوشه سکوه‌های شیب‌دار مدل فیزیکی مدفن کهریزک جهت ثبت جابجایی‌های افقی و قائم نصب شدند. شتاب‌نگارهای تک‌محوری در محدوده شتاب کامل  $\pm 2g$  در راستای دو محور x و y و با انحراف فرکانسی معادل  $\pm 5\%$  عمل می‌نمایند. این حسگرها بواسطه جعبه اتصال به کنترل‌کننده دستگاه میز لرزه متصل و داده‌های شتاب‌نگارها را جمع‌آوری می‌کنند. محدوده دریافت داده‌های حسگرهای جابجایی نیز  $75\text{ mm}$  - با طول خنثی کوتاهی معادل  $25\text{ mm}$  است که در گام‌های زمانی  $2\text{ ms}$  پاسخ خروجی

شده که توسط چسب به یکدیگر اتصال یافته‌اند. سطح داخلی جعبه پلکسی گلس با تلق به ضخامت  $5\text{ mm}$  پوشانیده شده و مش بندی با ابعاد  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  روی آن جهت اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها ترسیم گردید. اتصال گیردار جعبه منبسط به عرشه میز لرزه توسط ۸ پیچ انجام شد. در ادامه برای تثبیت موقعیت لاینر سنتتیکی، یک منحنی نیمه بیضوی بر روی دیوارهای جانبی جعبه پلکسی گلس ترسیم گردید. پس از این مرحله، جعبه آزمایش با گِل رس سفت سیلت‌دار با رطوبت تقریبی  $28\%$  که نیم‌رخ آن منطبق بر هندسه ترسیم شده در سطح خارجی جعبه است، پر شد. بر اساس نتایج آزمون‌های درجا، نمونه‌های زباله به روش کنترل حجمی با مقادیر اوزان مخصوص مختلف که با عمق تغییر می‌کنند، بصورت لایه به لایه در درون جعبه متراکم گردیدند. در ساخت مدل برای حفظ زوایای شیب مطابق با مقادیر شیب در مدل اصلی، این وجوه با ابزارهای ساخت مدل متراکم شدند. به دلیل طولانی بودن مدفن کهریزک در امتداد افقی و نیز با توجه به ضریب مقیاس و ابعاد جعبه، شیب‌های وجوه سمت راست و چپ بصورت متقارن در نظر گرفته شدند. لحاظ داشتن این ساده‌سازی در حداقل کردن امواج تابیده شده به درون مدل خاکریز که از دیواره‌های کناری جعبه آزمایش به وجوه جانبی این شیب‌ها منعکس می‌شوند بسیار مفید است. مقطع عرضی طراحی شده از مدفن کهریزک برای مدل سازی فیزیکی در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۴. طرح مدل فیزیکی و واقعی

میز لرزه و ابزارهای اندازه‌گیری

Fig. 4. Layout of the shaking table physical and Pro-totype model with relevant measuring instruments

- 1 Geomembrane
- 2 Nonwoven needle punched geotextile
- 3 Accelerometers
- 4 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

دستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج کفایت دستگاه را تأیید کردند.

### ۳-۵ نتایج آزمایش های مدل میز لرزه

مدل فیزیکی مدفن کهریزک توسط دستگاه میز لرزه با هندسه و ابزاربندی ارائه شده در شکل ۴ و مصالحی مطابق مشخصات موجود در جدول ۵ مورد آزمایش قرار گرفت. حرکات لرزه ای هارمونیک سینوسی مورد استفاده دارای مشخصاتی به شرح جدول ۶ هستند.

را ثبت می کند. در این مجموعه آزمایش ها، از دوربین های ویدئویی دیجیتال در نمای مقابل و نیز بر بالای جعبه دستگاه آزمایش برای ثبت تغییر شکل مدل بهره گرفته شد. شکل ۴ جانمایی حسگرهای مزبور را نشان می دهد. توالی بارگذاری ها در قالب امواج سینوسی با فرکانس و دامنه شتاب در مراحل بعدی طراحی گردیدند. لازم به ذکر است که قبل از شروع بارگذاری، تست تکرارپذیری صورت گرفته و صحت عملکرد

### جدول ۵. مشخصات مکانیکی مصالح مدفن کهریزک حاصل از گودال آزمایشی و آزمون دان هول

Table 5. Mechanical properties of the MSW materials of Kahrizak landfill from test pit and down-hole test

نسبت پواسون	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	چسبندگی (Pa)	زاویه اصطکاک ( $\phi$ )	لایه	ناحیه
۰/۳۷	۱۲۲۲	۱۶۰۰۰	۳۱	لایه ۱	زیاله
۰/۴۲	۹۹۰	۱۲۰۰۰	۳۳	لایه ۲	
۰/۴۴	۹۶۰	۱۲۰۰۰	۳۳	لایه ۳	
۰/۳۰	۲۰۵۰	۱۰۰۰۰۰	۲۰	لایه ۱	لاینرسی سفت سیلت دار
۰/۲۵	۱۶۵۰	۳۵۰۰۰۰	۴۰	لایه ۱	سنگ هواخورده ضعیف

### جدول ۶. مشخصات حرکات ورودی

Table 6. Properties of input motions

زمان تداوم رکورد (sec)	شتاب حداکثر (m/sec <sup>2</sup> )	فرکانس (Hz)	دامنه (mm)	مشخصه رکورد
۷/۵۰	۲/۹۷	۴/۸۸	۳/۱۶	۱
۷/۵۰	۵/۰۳	۱۱/۶	۰/۹۵	۲
۷/۵۰	۷/۳۳	۱۴/۵۲	۰/۸۸	۳
۷/۵۰	۹/۸۱	۴/۸۸	۱۰/۰۵	۴

فوریه شتاب و نمودار نسبت طیفی در تاج مدفن در ۲ حالت با و بدون

در این تحقیق فرکانس های طبیعی و تشدید توسط طیف های دامنه

جداساز برآورد شدند که مقادیر آنها در جدول ۷ ملاحظه می گردد.

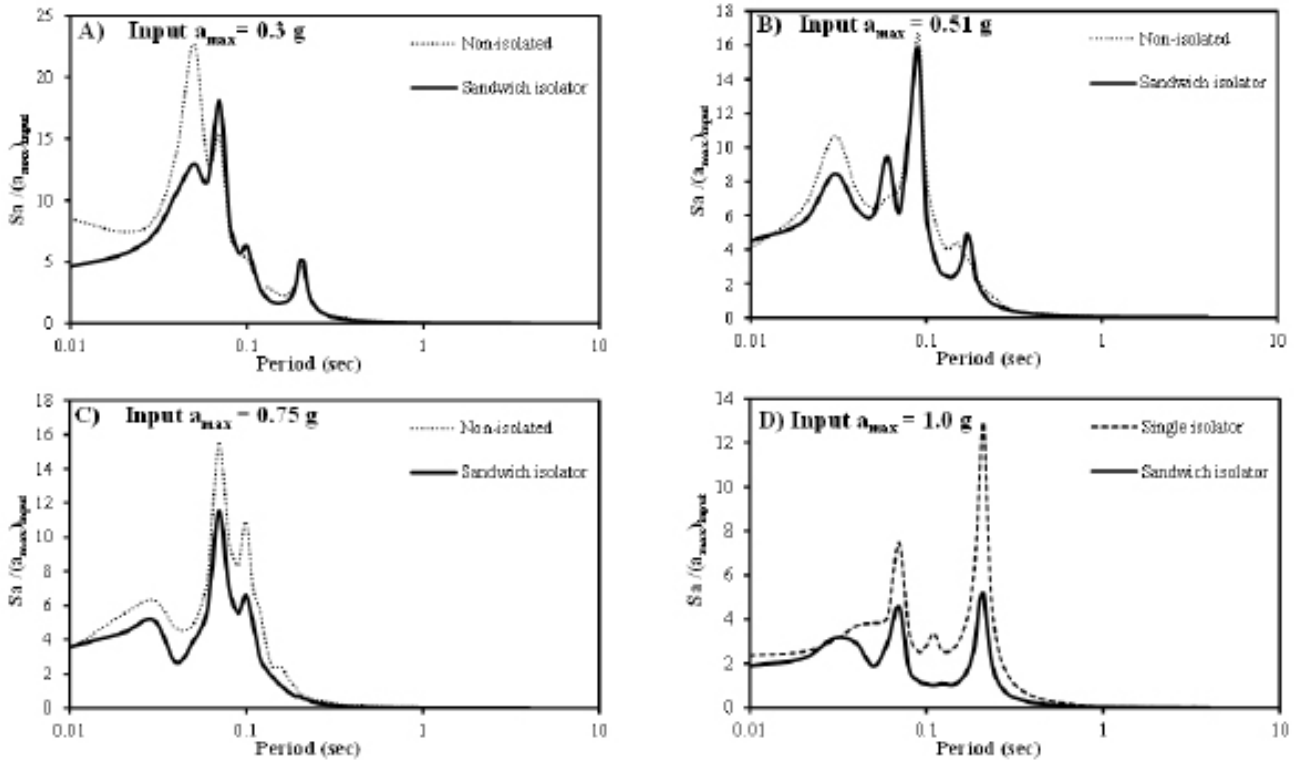
### جدول ۷. فرکانس های طبیعی و تشدید مدفن به ازای ورودی ها و شرایط جداسازی مختلف در بستر (Hz)

Table 7. Natural and resonance frequencies of landfill for different input motions and various isolation conditions in the bed

فرکانس تشدید		فرکانس طبیعی		حالت بستر
حرکت ورودی سوم	حرکت ورودی اول	حرکت ورودی سوم	حرکت ورودی اول	
۸/۳	۲۰	۱۰-۱۴/۴	۴/۹-۱۴/۸-۱۹/۲-۲۴/۳	فاقد جداساز
۹/۱	۱۴/۳	۹/۹-۱۴/۴-۴۳/۵	۴/۹-۱۴/۶-۱۹/۵-۲۴/۳	با جداساز

ازای شتاب های متعدد ورودی در بستر تحت شرایط با و بدون جداساز برآورد شد که نتایج آن در شکل ۵ ملاحظه می شود.

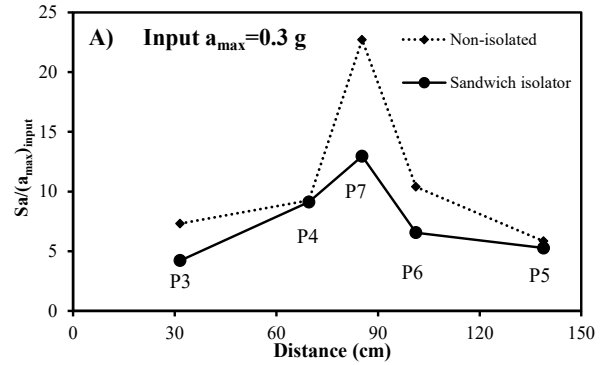
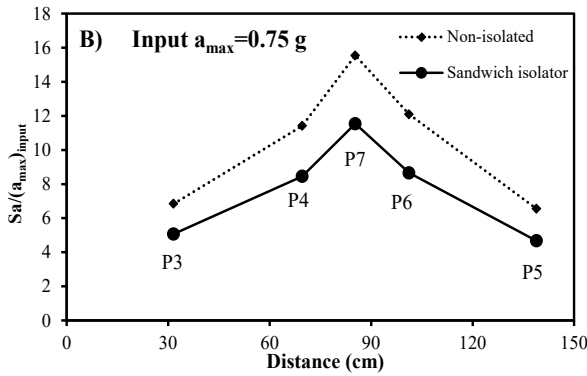
نسبت شتاب طیفی عبارت است از حاصل شتاب طیفی موج پاسخ بر شتاب حداکثر حرکت ورودی ( $S_a/a_{max}$ ). این پارامتر برای نقطه ۷ به



شکل ۵. بزرگنمایی طیفی در تاج مدل فیزیکی به ازای ورودی‌ها با ترازهای مختلف شتاب در بستر  
 Fig.5. Spectral amplification of input motion in crest of physical model for the various motions of bed

همان‌گونه که از شکل ۵ پیداست، مقدار حداکثر نسبت شتاب طیفی هم‌زمان با جداسازی لرزه‌ای در بستر عموماً کاهش یافته که مقدار این کاهش در ترازهای بالای شتاب ورودی نسبت به حالت فاقد جداساز بسیار مشهود است. چنین رفتاری در تمامی نقاطی ابزاربندی شده ملاحظه گردید که جهت اختصار تنها به پاسخ‌های شتاب و طیف‌های مرتبط در تاج (نقطه شماره ۷) از مدل فیزیکی مدفن بسنده شد. در این نقطه مقادیر حداکثر تضعیف شتاب طیفی  $(S_a / (a_{max})_{input})$  در حالت جدا شده با عایق ژئوسنتتیک ساندویچی به ازای شتاب‌های ورودی  $0.1/0.75 \text{ g}$ ،  $0.0/0.51 \text{ g}$  و  $0.3 \text{ g}$  به ترتیب معادل  $6\%$ ،  $25/8\%$  و  $3\%$  برابر با  $0.43$  شد، در حالی که درصد تضعیف شتاب در برم‌های پایین (P۳ و P۴) حداکثر به  $28/7\%$  رسید که علت آن می‌تواند ناشی از تمرکز امواج انتقال یافته در این ناحیه و سختی پایین برشی باشد. نکته قابل توجه دیگر جابجایی دائمی خاکریز در امتداد افقی است. شکل ۷ تاریخچه زمانی هموار شده جابجایی افقی در نقطه ۵ (برم پایین-راست) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که جابجایی کل با بیشینه شتاب دریافتی در بستر  $(a_{max})$  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 لرزه‌ای به نواحی بالایی را کاهش داده و بنابراین نیروی محرک لرزه‌ای در بلوک محتمل لغزش کاهش می‌یابد. شکل ۷ نشان می‌دهد که مقدار جابجایی دائمی نقطه ۵ با جداساز ساندویچی طی حرکات ورودی حاضر تا ۸ برابر جابجایی نقطه مزبور در حالت جدا نشده ثبت شده است. در این تست‌ها هیچ‌گونه ترکی طی حرکت‌های لرزه‌ای مدل مشاهده نگردید و تغییر شکل‌ها بیشتر از نوع نشست بودند. قوی‌ترین حرکت لرزه‌ای سینوسی شکل  $(a_{max} = 1/0 \text{ g})$  باعث بروز جابجایی لغزشی مشهود در امتداد لاینر ژئوسنتتیک در انتهای تست گردید.

همان‌گونه که از شکل ۵ پیداست، مقدار حداکثر نسبت شتاب طیفی هم‌زمان با جداسازی لرزه‌ای در بستر عموماً کاهش یافته که مقدار این کاهش در ترازهای بالای شتاب ورودی نسبت به حالت فاقد جداساز بسیار مشهود است. چنین رفتاری در تمامی نقاطی ابزاربندی شده ملاحظه گردید که جهت اختصار تنها به پاسخ‌های شتاب و طیف‌های مرتبط در تاج (نقطه شماره ۷) از مدل فیزیکی مدفن بسنده شد. در این نقطه مقادیر حداکثر تضعیف شتاب طیفی  $(S_a / (a_{max})_{input})$  در حالت جدا شده با عایق ژئوسنتتیک ساندویچی به ازای شتاب‌های ورودی  $0.1/0.75 \text{ g}$ ،  $0.0/0.51 \text{ g}$  و  $0.3 \text{ g}$  به ترتیب معادل  $6\%$ ،  $25/8\%$  و  $3\%$  برابر با  $0.43$  حاصل شد. این نتیجه را می‌توان به وجود چسبندگی و سختی زیاد در فصل مشترک لایه‌های ژئوممبرین در ترازهای پایین شتاب نسبت داد که با افزایش شتاب ورودی، نیروهای برشی بر سختی برشی فصل مشترک بیشتر غلبه کرده و لایه‌ها بر روی هم می‌لغزند که این امر موجب کاهش تراز نیروها و شتاب‌های انتقال یافته به توده بالایی‌ساز و نهایتاً کاهش قابل توجه بزرگنمایی می‌شود. تغییرات نسبت شتاب طیفی (همانند ضریب بزرگنمایی) در نقاط مختلف مدل از آزمایش میز لرزه به ازای حرکات ورودی مختلف در شکل ۶ (الف-ب) ملاحظه می‌شوند. در تمامی رخدادهای لرزه‌ای، بیشترین بزرگنمایی در تاج مدل رخ داد به طوری که حداکثر تضعیف شتاب در تاج به ازای شتاب ورودی  $0.75 \text{ g}$ ،  $0.51 \text{ g}$  و  $0.3 \text{ g}$  برای شتاب ورودی



شکل ۶. تغییرات ضرایب بزرگنمایی در نقاط متعدد از مدفن به ازای مقادیر مختلف

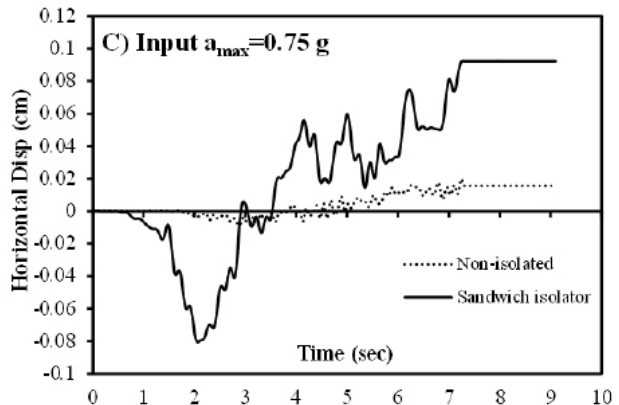
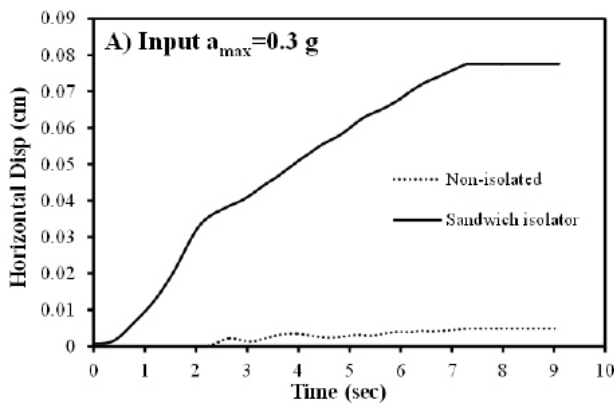
شتاب حداکثر. الف)  $a_{max} = 0.3 g$ ، ب)  $a_{max} = 0.75 g$ .

Fig. 6. Variations of amplification factors with distance for different values of  $a_{max}$ : (a) 0.3 g, (b) 0.75 g

مدل‌های عددی بایستی با اندازه‌گیری‌های صحرایی و یا داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد. در تحقیق حاضر مدل رفتاری الاستیک - کاملاً پلاستیک موهر کولمب در محیط نرم-افزار FLAC 2D جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نرم افزار FLAC 2D

#### ۴- مطالعه عددی

ظهور رایانه‌های قدرتمند و توسعه روش‌های عددی موجب شده است تا مدل‌سازی عددی به‌عنوان ارزان‌ترین و مؤثرترین ابزار بررسی رفتار سازه‌ها در شرایط مختلف بار نظیر زمین‌لرزه‌ها محسوب شود. اعتبار



شکل ۷. تاریخچه زمانی جابجایی نسبی افقی در مدل فیزیکی برای نقطه ۵

(برم پایین - راست). الف)  $a_{max} = 0.3 g$ ، ب)  $a_{max} = 0.75 g$ .

Fig. 7. Time histories of total X-displacement in the physical model at point 5, (the lower right berm): (a) 0.3 g, (b) 0.75 g

در نرم افزار FLAC با مدل حاضر و پیچیدگی و عدم وجود داده‌های لازم برای تعریف مدل‌های پیشرفته و ... انجام گرفت. از آنجایی که جداره‌های پستی و جلویی جعبه دستگانه همانند نمای شکل ۴ صلب هستند، از این رو کرنش‌های بیرون صفحه صفر بوده و می‌توان رفتار مدل فیزیکی را بصورت کرنش مسطح و دوبعدی دانست.

مدل‌سازی جداساز لرزه‌ای در بستر توسط المان‌های سازه‌ای تیر<sup>۳</sup> با ممان اینرسی معادل صفر میسر گردید؛ همچنین جهت اتصال المان‌های خاکی به المان‌های تیر و نیز مدل‌سازی المان‌های تیر واقع بر روی هم‌دیگر المان‌های فصل مشترک<sup>۴</sup> بهره گرفته شد.

با روش حل صریح و لاگرانژی<sup>۱</sup> امکان مشاهده رفتار سیستم در تغییر شکل‌های زیاد و شرایط پلاستیک و ناپایداری را فراهم می‌سازد و علاوه بر آن می‌توان ضمن ملاحظه اندرکنش خاک و سازه، فصول مشترک، سطوح لغزش رابه دقت مدل‌سازی کرد. طولانی بودن محاسبات دینامیکی و طولانی شدن روند حل مسائل مرتبط با جریان آب از معایب این نرم افزار است. انتخاب مدل رفتاری موهر کولمب<sup>۲</sup>، به دلایلی نظیر پرازش بسیار خوب با نتایج آزمایشگاهی، سادگی کاربرد، امکان تعریف المان‌های فصل مشترک

1 Explicit and Lagrangian Method

2 Mohr Coulomb

3 Beam

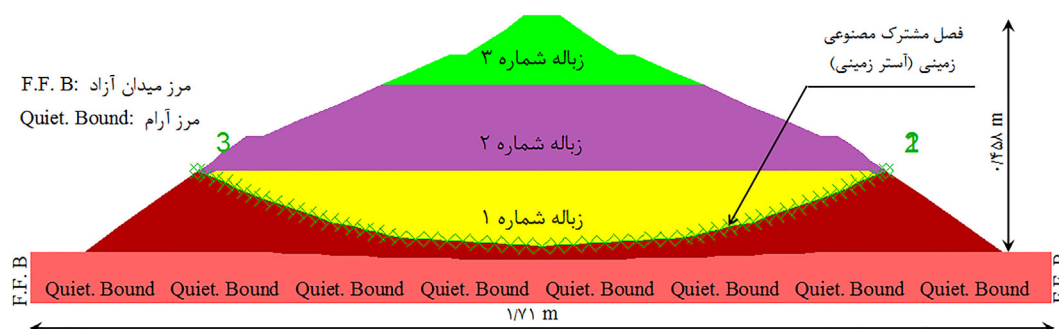
4 Interface



مدل عددی حاضر با ضریب مقیاس ۷۶/۳۶ ایجاد و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸). مصالح مورد استفاده در مدل عددی حاضر از مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک کامل موهر کولمب تبعیت می‌کنند که مشخصات آنها بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی در شکل ۲ مرتبط با مدفن کهریزک و نیز با استفاده از داده‌های جداول [۵-۲] پس از اعمال ضرایب قانون شبیه‌سازی و کالیبراسیون پاسخ‌ها، مقادیر اوزان مخصوص، سرعت موج برشی، منحنی کاهش مدول برشی و نسبت پواسون به‌کار رفته در مدل عددی به‌شرح جدول ۸ حاصل شدند.

#### ۴-۱ مدل مقیاس کوچک (میزلرزه) مدفن کهریزک

برای مدل‌سازی عددی مدفن کهریزک در نرم‌افزار FLAC، ابتدا مدل ساخته شده به تعادل استاتیکی رسانده شد؛ سپس ورودی از نوع تنش برشی بر بستر مدل اعمال شده و با انتخاب شرایط میدان آزاد در مرزهای جانبی و شرایط آرام در مرز تحتانی مدل عددی تحت ورودی‌ها و حالات‌های با و بدون جداسازی در بستر، تحلیل گردید. بنا به محدودیت‌های ابعادی جعبه دستگاه میز لرزه، هندسه مدفن در راستای طولی فشرده‌تر شد؛ به عبارتی شیب‌های بحرانی سمت چپ انتخاب و بصورت قرینه در سمت راست اجرا گردید.



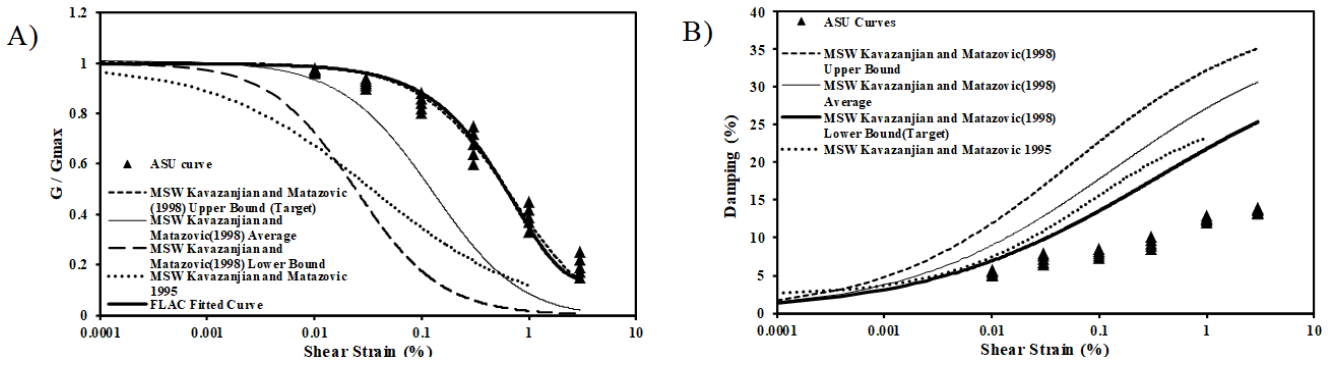
شکل ۸. شرایط مرزی مدل مقیاس کوچک (میز لرزه) مدفن کهریزک طی تحلیل دینامیکی  
 Fig. 8. Boundary conditions of Kahrizak landfill small scale model (shaking table) during dynamic analysis

جدول ۸. مشخصات مقیاس شده مصالح زباله جامد مدفن کهریزک  
 Table 8. Scaled characteristics of Kahrizak's Solid Waste Materials

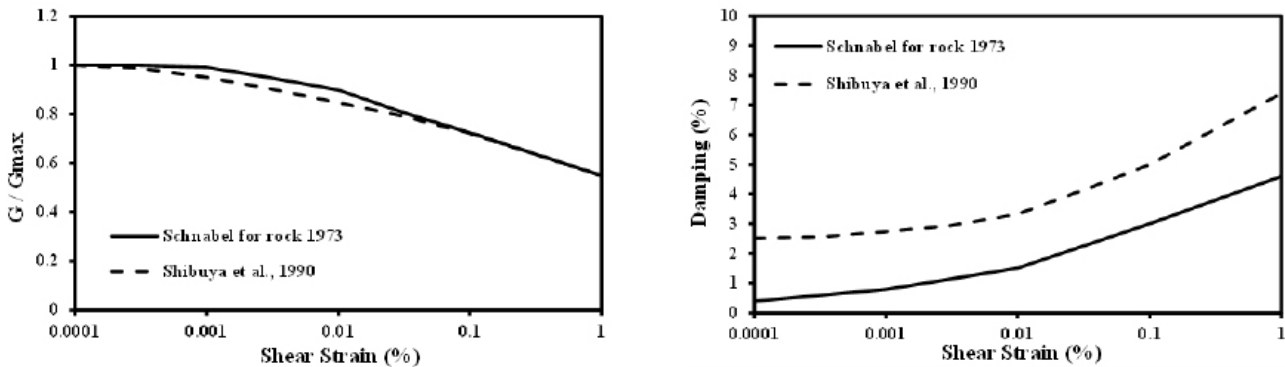
زباله شماره 3	زباله شماره 2	زباله شماره 1	لایبررسی (غیر اشباع)	لایه پارامتر
960	990	1222	2050	دانسیتته ( $kg/m^3$ )
0/44	0/42	0/37	0/3	نسبت پواسون
$3/00 \times 10^6$	$3/01 \times 10^6$	$5/03 \times 10^7$	$3/18 \times 10^7$	مدول بالک ( $Pa$ )
$3/62 \times 10^5$	$5/10 \times 10^5$	$1/43 \times 10^7$	$1/47 \times 10^7$	مدول برشی ( $Pa$ )
12000	12000	16000	$1/00 \times 10^5$	چسبندگی ( $Pa$ )
$33^\circ$	$33^\circ$	$31^\circ$	$20^\circ$	زاویه اصطکاک ( $\varphi^\circ$ )
$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	زاویه اتساع ( $\psi^\circ$ )

در تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل حاضر از منحنی‌های  $G/G_{max}$  بر روی مصالح زباله حاصل از یافته‌های مراجع پیشین استفاده شد که این منحنی‌ها در شکل ۹ ملاحظه می‌شوند [۲۲-۲۴]. شکل ۱۰ نیز منحنی‌های مزبور برای سنگ بستر را نشان می‌دهد.

مبنای انتخاب بعد المان، ارضای شرط انتقال موج ( $\Delta l \leq \lambda/10$ ) است که با توجه به وجود کمترین سرعت موج برشی در زباله شماره ۳ ( $V_s = \sqrt{G/\rho} = 19/41 m/sec$ ) و بیشترین فرکانس در بین حرکات ورودی ( $f=14/5 Hz$ )، بزرگترین بعد المان در مش بندی برابر با  $0/134 m$  به دست می‌آید.



شکل ۹. منحنی‌های الف) کاهش مدول برشی؛ ب) میرایی برای مصالح زباله جامد شهری [۲۲-۲۴]  
[Fig. 9. Hysteretic model curves for some MSW material: a) modulus reduction, b) damping curve [22-24]



شکل ۱۰. منحنی‌های کاهش مدول برشی و میرایی سنگ هوازده ضعیف [۲۵]  
[Fig. 10. G-reduction and damping curves of weak weathered rock [25]

جهت تعریف سطح لغزش و فراهم نمودن امکان جذب انرژی صورت گرفت. در این مدل سازی، مشخصات سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اصطکاک، چسبندگی استفاده می‌شود. جداول ۹ و ۱۰ مشخصات مصالح ژئوممبرین به همراه سه نوع فصل مشترک به کاررفته را نشان می‌دهند که سختی نرمال فصل مشترک متصل ژئوسنتتیک / ژئوسنتتیک<sup>۴</sup>، برابر سختی (مدول بالک) المان‌های مش بندی اطراف انتخاب شده است. سختی‌های برشی در فصل مشترک ژئوسنتتیک / ژئوسنتتیک با کالیبراسیون جابجایی مشاهده شده (حدود ۱۷ mm) و به کمک روش سعی و خطا صورت گرفت.

### جدول ۹. مشخصات المان‌های سازه‌ای تیر در معرفی مصالح ژئوممبرین [۱۸]

Table 9. Properties of the beam elements in the introduction of geomembrane materials [18]

مدول الاستیسیته (Pa)	ممان اینرسی ( $m^4$ )	سطح مقطع ( $m^2$ )	دانسیته ( $kg/m^3$ )
$1.4 \times 10^8$	0.0	0.002	935

جهت اعمال میرایی در این تحقیق، از مدل میرایی هیسترتیک<sup>۱</sup> با تابع برازش هاردین<sup>۲</sup> موجود در نرم افزار FLAC استفاده شد و پس از اعمال بار دینامیکی مطابق رابطه ۱ مدل حاضر تحلیل گردید.

$$\sigma_s = 2(\rho \cdot C_s) \cdot v_s \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی محیط انتشار موج،  $C_s$  سرعت انتقال موج در محیط مورد بررسی و  $v_s$  رکورد سرعت موج برشی ورودی است. هم خوانی هر چه بیشتر رکوردهای سرعت ورودی و محاسبه شده در تحلیل دینامیکی با مصالح الاستیک و غیرمیرا، کفایت هندسی مدل و مکان مرزها را تأیید می‌کند که در این تحلیل نیز این معیار محقق گردید.

با پذیرش صحت کالیبراسیون انجام شده، پاسخ‌های مدل عددی مدفن عایق شده با جداساز لرزه‌ای ارائه می‌شود. مدل سازی ژئوسنتتیک توسط المان‌های سازه‌ای و فصل مشترک غیرمتصل<sup>۳</sup>

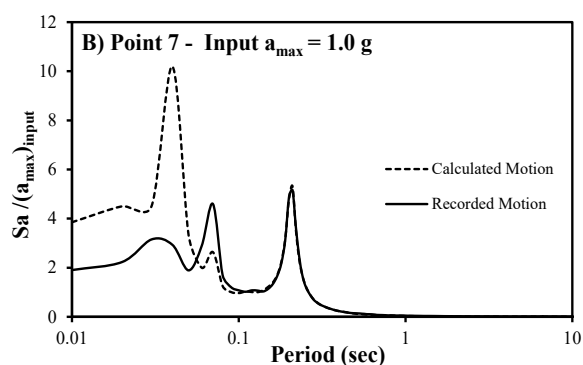
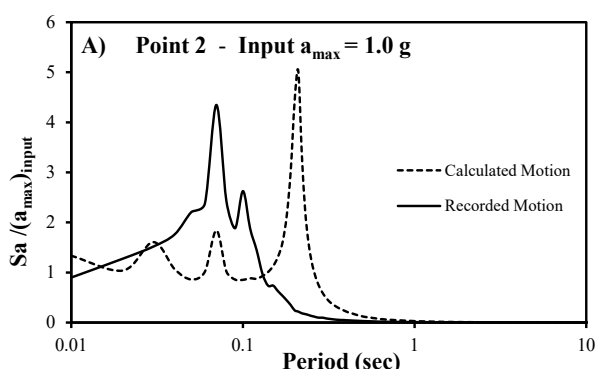
- 1 Hysteretic
- 2 Hardin
- 3 Unglued Interface

جدول ۱۰. مشخصات فصول مشترک مابین ژئوسنتتیک و مصالح مجاور  
Table 10. Characteristics of the interface between the Geosynthetic and the adjacent materials

چسبندگی (Pa)	زاویه اصطکاک ( $\varphi^\circ$ )	سختی برشی ( $Pa/m$ )	سختی نرمال ( $Pa/m$ )	نوع فصل مشترک	فصل مشترک
66000	13	$2/5 \times 10^9$	$2/5 \times 10^9$	unglued	لایزر رسی - ژئوممبرین
600	15	$8/0 \times 10^7$	$1/0 \times 10^{10}$	unglued	ژئوممبرین - ژئوممبرین
10000	21	$3/5 \times 10^9$	$3/5 \times 10^9$	unglued	ژئوممبرین - زباله جامد

فرکانس مد دوم بیشتر از بزرگنمایی تحلیل آزمایشگاهی می‌گردد. وجود نقایص ذاتی در قوانین ابعادی و نیز تراز تنش نرمال از دلایل حصول نتایج نه‌چندان دقیق در مدل عددی مقیاس کوچک است؛ به‌گونه‌ای که به واسطه ارتفاع زیاد خاکریز در مقیاس اصلی، تنش نرمال در بستر مدفن زیاد بوده و مصالح رفتار تراکمی از خود نشان می‌دهند، اما در مدل عددی مقیاس کوچک وجود تنش‌های قائم کوچک موجب رفتار اتساعی شده و رفتار مدل متفاوت با مدل مقیاس واقعی می‌گردد.

نمودارهای شکل ۱۱ بزرگنمایی‌های طیفی را در دو نقطه از مقطع قائم در آکس را طی تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند. از نمودارهای اخیر می‌توان چنین نتیجه گرفت که کالیبراسیون مدل عددی در مقیاس کوچک علیرغم تأیید کلی نتایج آزمایشگاهی در برخی موارد، مقادیر کمی پارامترها را به خوبی برآورده نمی‌نماید؛ به‌طوری که در نقطه شماره ۲ نمودارهای طیف پاسخ الاستیک هم در محتوای فرکانسی و هم در مقادیر حداکثر اختلاف‌های زیادی دارند و در نقطه ۷ فرکانس غالب بر هم منطبق می‌شوند ولی بزرگنمایی در



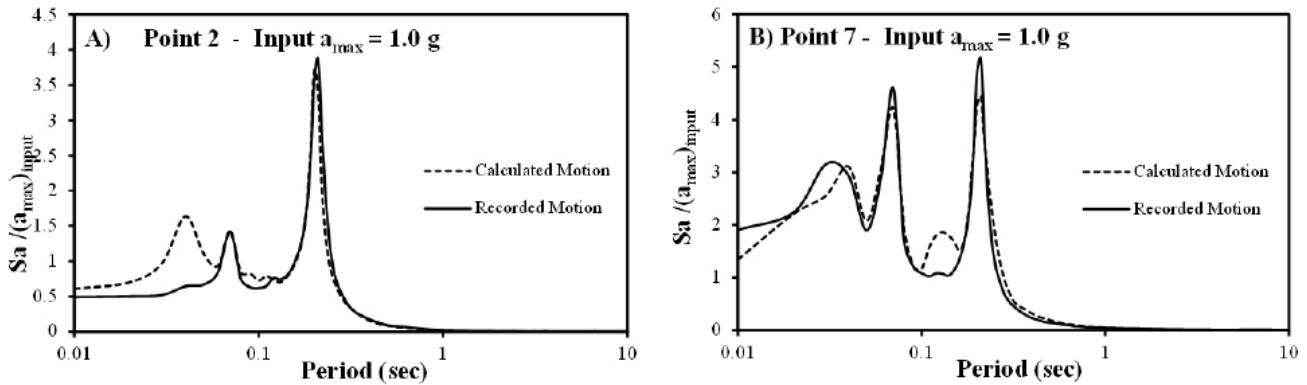
شکل ۱۱. طیف‌های بزرگنمایی در نقاط ۲ و ۷ حاصل از مدل فیزیکی و تحلیل عددی (فاقد جداساز)  
Fig. 11. Amplification response spectra in points 2 and 7 from physical mod -  
(el and non-linear numerical analysis (Not-Isolated base

UHMWPE مشخص است لذا تنها مجهول‌های فصل مشترک، سختی‌های نرمال و خصوصاً برشی هستند. سختی تا آستانه لغزش پارامتر غالب بر مسئله بوده و پس از شروع لغزش، پارامترهای مقاومت برشی رفتار سطح لغزنده را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

#### ۲-۴ مدل مقیاس واقعی مدفن کهریزک

مدل‌سازی عددی مقیاس واقعی مدفن کهریزک دقیقاً همانند فرآیند مدل عددی در مقیاس کوچک ارائه شده در بخش قبلی است با این تفاوت که مشخصات و ابعاد هندسی واقعی و اندازه‌گیری شده در آن بکار رفته است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۲ به‌وضوح دقت و کفایت مدل کالیبره شده را نشان می‌دهد.

از این رو جهت رفع این مسئله، در ادامه مدل‌سازی عددی در ابعاد واقعی صورت گرفت و رکورد شتاب و پاسخ طیف الاستیک در نقاط ابرابندی شده معیار کالیبراسیون انتخاب شد. علاوه بر این، جهت جداسازی لایزر از مصالح UHMWPE استفاده شد که وجود صفحاتی به ضخامت تا ۵۰ mm در بازار و مقاومت در برابر سایش و وزنی مولکولی در حدود ۱۰ برابر سایر پلی اتیلن‌ها و خصوصاً خاصیت خود - روانکاری و دارا بودن سطح بسیار صاف و بدون خاصیت چسبندگی، استفاده از این نوع پلی اتیلن را توجیه می‌نماید [۲۳]. فصل مشترک سطح لغزنده با پارامترهای الزامی سختی برشی و سختی نرمال و پارامترهای متناسب با شرایط (زاویه اصطکاک و چسبندگی) تعریف می‌گردد. از آنجایی که مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی در فصل مشترک مابین صفحات



شکل ۱۲. طیف‌های بزرگنمایی در نقاط ۲ و ۷ حاصل از مدل فیزیکی و تحلیل عددی همراه با جداساز

Fig. 12. Amplification response spectra in points 2 and 7 from physical model - (el and non-linear numerical analysis (isolated base

### ۳-۴ مطالعه پارامتریک مدفن کهریزک

مطالعه پارامتریک ابزاری مفید در بررسی تأثیر عوامل کلیدی بر رفتار مدل عددی و آزمایشگاهی است. در این تحقیق مطالعه پارامتریک مدفن با متغیرهای مختلفی نظیر سختی مصالح زباله، اثر سن زباله، اصطکاک در فصل مشترک سطح لغزنده و ... مورد بررسی قرار می‌گیرد.

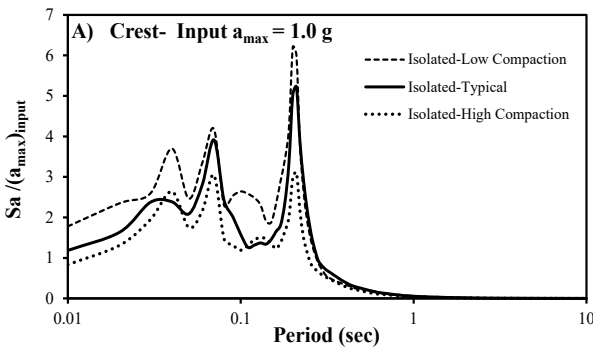
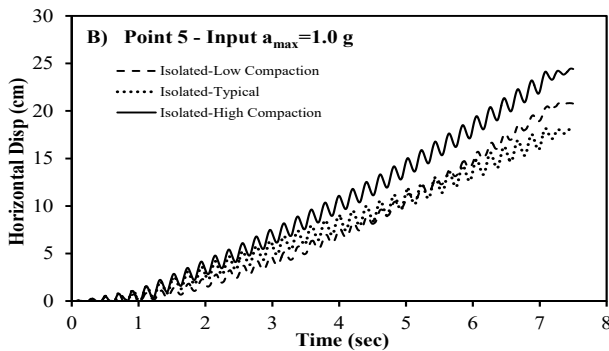
#### ۱-۳-۴ اثر انرژی تراکمی و تغییر مدول برشی

مطابق رابطه ۲، مدول برشی در کرنش کوچک تابعی است از چگالی و سرعت موج برشی حداکثر که در آن چگالی با انرژی تراکمی تغییر می‌کند.

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

در این زمینه زکاس و همکاران [۲۴] چگالی مصالح زباله شهری را با استفاده از رابطه هیپربولیک ۳ و انرژی‌های تراکمی در سه سطح کم، معمولی و زیاد در جدول ۱۱ ارائه دادند.

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{\alpha + \beta \cdot z} \quad (3)$$



شکل ۱۳. تأثیر مدول برشی بر بزرگنمایی طیفی در تاج

و جابجایی ماندگار نقطه شماره ۵ در حالت جداسده  
Fig. 13. Effect of the shear modulus on the spectral magnification at the crest and permanent displacement of point 5 in the isolated state

### جدول ۱۱. مشخصات فصول مشترک مابین

ژئوسنتتیک و مصالح مجاور [۲۷]

Table 11. Density of MSW materials resulting from hyperbolic formula and compaction energy [۲۷].

انرژی تراکمی	وزن مخصوص اولیه $\gamma_i (kN / m^3)$	$\beta (m^3 / kN)$	$\alpha (m^4 / kN)$
کم	۵	۰/۱	۲
معمولی	۱۰	۰/۲	۳
زیاد	۱۵/۵	۰/۹	۶

از شکل ۱۳ می‌توان دریافت که افزایش انرژی تراکمی و به تبع آن افزایش مدول برشی باعث کاهش بزرگنمایی طیفی می‌گردد و در عین حال کاهش سختی موجب نرمی و حرکات خارج از فاز در ترازهای بالاتر می‌شود به طوری که مقادیر نسبت بزرگنمایی طیفی به ازای تراکم‌های کم، متداول و زیاد به ترتیب معادل ۲/۶، ۵/۲ و ۳/۱ شد. افزایش جرم و به تبع آن افزایش اینرسی توده متراکم شده واقع در زیر برم طی حرکات رفت

مقدار جابجایی افقی می‌گردد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که زباله‌های تازه کمترین مقدار جابجایی افقی را دارند و با افزایش سن زباله مقدار جابجایی و عرض ترک افزایش می‌یابد به گونه‌ای که جابجایی افقی در انتهای تحلیل در شکل ۱۴-الف برای زباله تازه، ۵ ساله و ۲۱ ساله معادل ۱/۲۳، ۲/۴۳ و ۳/۵ سانتی متر بدست آمد.

### ۳-۳-۴ اثر پارامترهای برشی در فصل مشترک

رفتار فصل مشترک تحت تأثیر پارامترهایی مانند سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اصطکاک و چسبندگی است؛ به طوری که تا آستانه لغزش پارامتر سختی بر رفتار سطح لغزنده حاکم است، اما پس از شروع لغزش پارامترهای مقاومتی  $(\phi, C)$  کمیت و کیفیت لغزش را کنترل می‌کند. در این تحقیق، جهت مدل‌سازی سطوح لغزنده از صفحات UHMWPE استفاده شد که دارای کمترین زاویه اصطکاک  $5^\circ$  بوده و هیچ‌گونه چسبندگی ندارد. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی، از چند ترکیب زاویه اصطکاک و چسبندگی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی تریپل و فاکس<sup>[۲۹]</sup> در مطالعه پارامتریک استفاده شد.

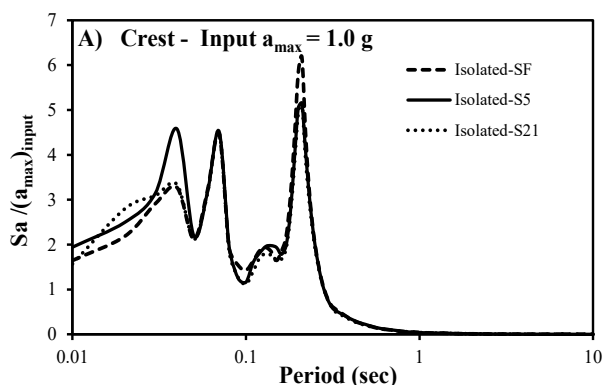
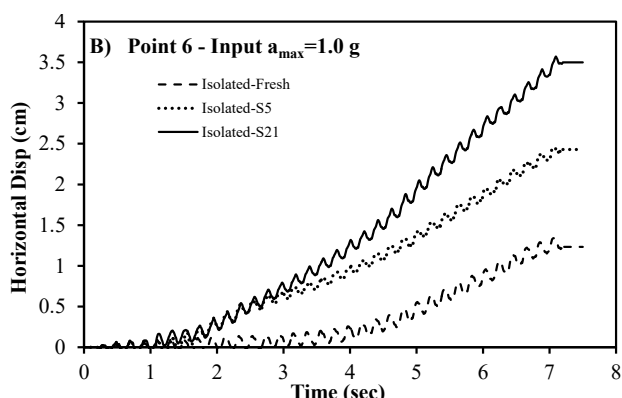
و برگشتی و نیز کاهش مقاومت برشی در محل جداساز، علت بروز چنین تغییرمکان‌هایی در نقطه شماره ۵ است. در مدل فاقد جداساز نیز نمودار بزرگنمایی طیفی مشابه نمودار متناظر در حالت حاوی جداساز بود؛ افزایش تراکم طی جداسازی موجب افزایش جابجایی نسبی افقی شد و مطابق شکل ۱۳ جابجایی نسبی در انتهای تحلیل به ازای تراکم‌های زیاد، معمول و کم معادل ۲۴/۴، ۱۸/۲ و ۲۰/۸ سانتی متر گردید.

### ۲-۳-۴ اثر سن زباله

سن زباله یکی از عوامل بسیار مهم در تغییر مشخصات مقاومتی مصالح زباله است که با افزایش سن، مقاومت برشی نمونه تغییر می‌یابد بنابراین بررسی نمونه‌های مدفون قدیمی در پایداری لرزه‌ای مدفن اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. مقدار محتوای فیبری مصالح زباله طی زمان و پوسیدگی آنها، جهت‌گیری فیبرها و... از عوامل اثرگذار بر مقاومت برشی مصالح زباله است. در این تحقیق مطابق جدول ۱۲ از مقاومت برشی مصالح زباله‌ها در شرایط تنش مؤثر بر روی مصالح زباله تازه (Sf)، ۵ ساله (S5) و ۲۱ ساله (S21) حاصل از مطالعات شریعتمداری و همکاران [۲۸] استفاده شد.

جدول ۱۲. پارامترهای برشی مصالح زباله در سنین مختلف [۲۵]  
Table 12. Shear parameters of the MSW material at different ages [25]

چسبندگی (Pa)	زاویه اصطکاک ( $\phi^\circ$ )	پارامتر سن زباله
۲۵۰۰۰	۲۴/۸	زباله تازه (Sf)
۱۱۲۰۰	۴۵/۸	زباله ۵ ساله (S5)
۱۶۱۰۰	۳۰/۸	زباله ۲۱ ساله (S21)

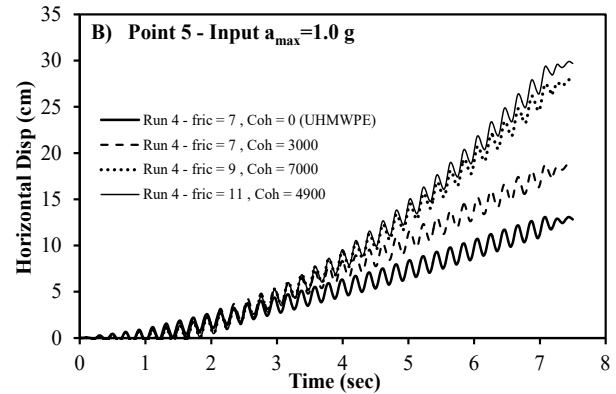
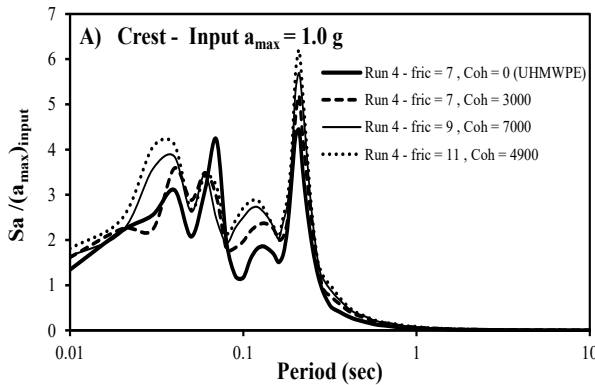


شکل ۱۴. تأثیر سن زباله بر بزرگنمایی طیفی در تاج و جابجایی ماندگار نقطه شماره ۶ در حالت جداساز  
Fig. 14. Effect of the waste aging on the spectral amplification at the crest and permanent displacement of point 6 in the isolated state

از شکل ۱۴-الف می‌توان دریافت که زباله‌های تازه بیشترین مقدار بزرگنمایی طیفی را در تاج دارند و با افزایش سن زباله مقدار بزرگنمایی طیفی شتاب کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۴-الف، مقدار بزرگنمایی طیفی در قله برای زباله تازه، ۵ ساله و ۲۱ ساله برابر با ۵/۱، ۶/۲ و ۵/۱ حاصل شد. در حالت ایزوله شده مقدار بزرگنمایی در فرکانس‌های بالا برای زباله‌های ۵ ساله بیشتر از زباله‌های تازه و ۲۱ ساله بدست می‌آید و بالعکس مقدار بزرگنمایی در فرکانس‌های پایین، برای زباله‌های تازه بیشتر از زباله‌های با سن بالا حاصل می‌گردد. علاوه بر این مقادیر کمی بزرگنمایی با جداسازی نسبت به حالت جدانشده کاهش چشمگیری می‌یابد. از شکل ۱۴-ب می‌توان استنتاج نمود که در تمامی نمونه‌های زباله با سن‌های متفاوت، جداسازی لرزه‌ای در بستر موجب کاهش

فصل مشترک ( $\varphi = 11^\circ$ ,  $C = 4900 Pa$ ) رسید. مطابق انتظار با کاهش مقاومت برشی فصل مشترک و به تبع آن کاهش تراز نیروهای اینرسی انتقالی به توده مستعد لغزش بالایی (توده جدانشده)، جابجایی‌های افقی نسبی کاهش می‌یابد آنچنانکه برای فصول مشترک حاضر مقادیری معادل ۲۹/۸، ۲۷/۸، ۱۸/۷ و ۱۲/۹ سانتی‌متر استنتاج شد.

همان‌طور که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، فصل مشترک سنتتیکی UHMWPE دارای کمترین مقدار بزرگنمایی و شتاب انتقال یافته به ترازهای بالایی است و به تدریج با افزایش مقاومت برشی فصل مشترک مقادیر شتاب در داخل توده بالای فصل مشترک و نیز تاج مدفن، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در این تحلیل نسبت بزرگنمایی طیفی از ۴/۴۳ در فصل مشترک UHMWPE به ۶/۲۰ در مقاوم‌ترین

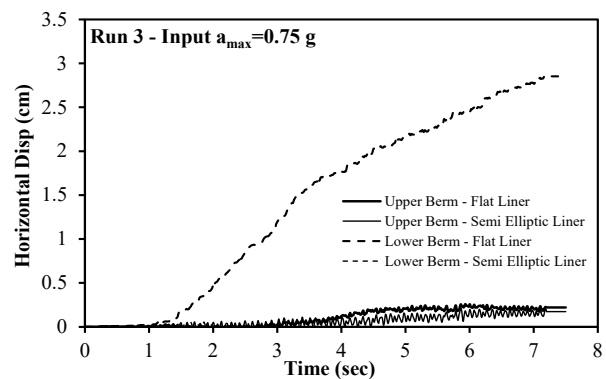
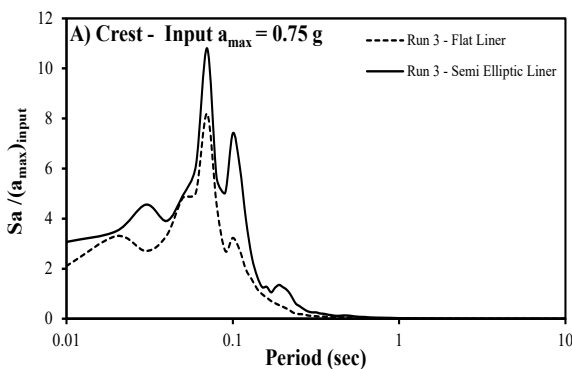


شکل ۱۵. اثر پارامترهای برشی فصل مشترک لغزنده بر بزرگنمایی طیفی در تاج و جابجایی ماندگار نقطه شماره ۵  
Fig. 15. Effect of the shear parameters of sliding interface on spectral magnification at the crest and permanent displacement of point 5

اجرای لاینر به شکل تخت می‌تواند بزرگنمایی را به اندازه قابل توجهی در پیوندهای مختلف و خصوصاً در پیوندهای اساسی کاهش دهد. به‌عنوان مثال مطابق شکل ۱۶-الف نسبت بزرگنمایی طیفی از ۱۰/۸ در لاینر نیمه بیضوی به ۸/۲ در لاینر تخت طی حرکت ورودی ۰/۷۵g کاهش یافت. این کاهش در پیوندهای غالب بیشتر مشهود است. همچنین از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که عرض ترک در برم پایین با لاینر نیمه بیضوی (۰/۰۵ cm) کمتر از مقدار پارامتر مزبور با لاینر افقی (۲/۸۵ cm) حاصل شده است و دلیل آن محصورسازی برم پایین توسط لاینر نیمه بیضوی و پایین بودن کاهندگی شتاب انتقالی به لایه‌های بالایی است.

#### ۴-۳-۴ اثر شکل هندسی لاینر

در بخش‌های قبلی شکل هندسی لاینر بصورت نیمه بیضوی انتخاب شد که علت این انتخاب بر اساس بازگردانی توده لغزیده به حالت اول تحت تأثیر نیروهای گرانشی بود. لیکن اجرای چنین لاینری (لاینر مقعر نیمه بیضوی) در مقیاس بزرگ مشکلاتی را نیز در بر دارد. در این بخش از مطالعه، اثر ساخت لاینر افقی بررسی می‌شود که طی آن یک لایه ۱ متری از رس نفوذ ناپذیر بر روی سطح زمین اجرا شده و پس از قرار دادن صفحات پلیمری UHMWPE بر روی هم، لایه‌های زباله شهری مطابق هندسه مدل مدنظر بر روی آن دپو می‌شوند. مشخصات مصالح نیز بدون تغییر حفظ گردید. از شکل ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که

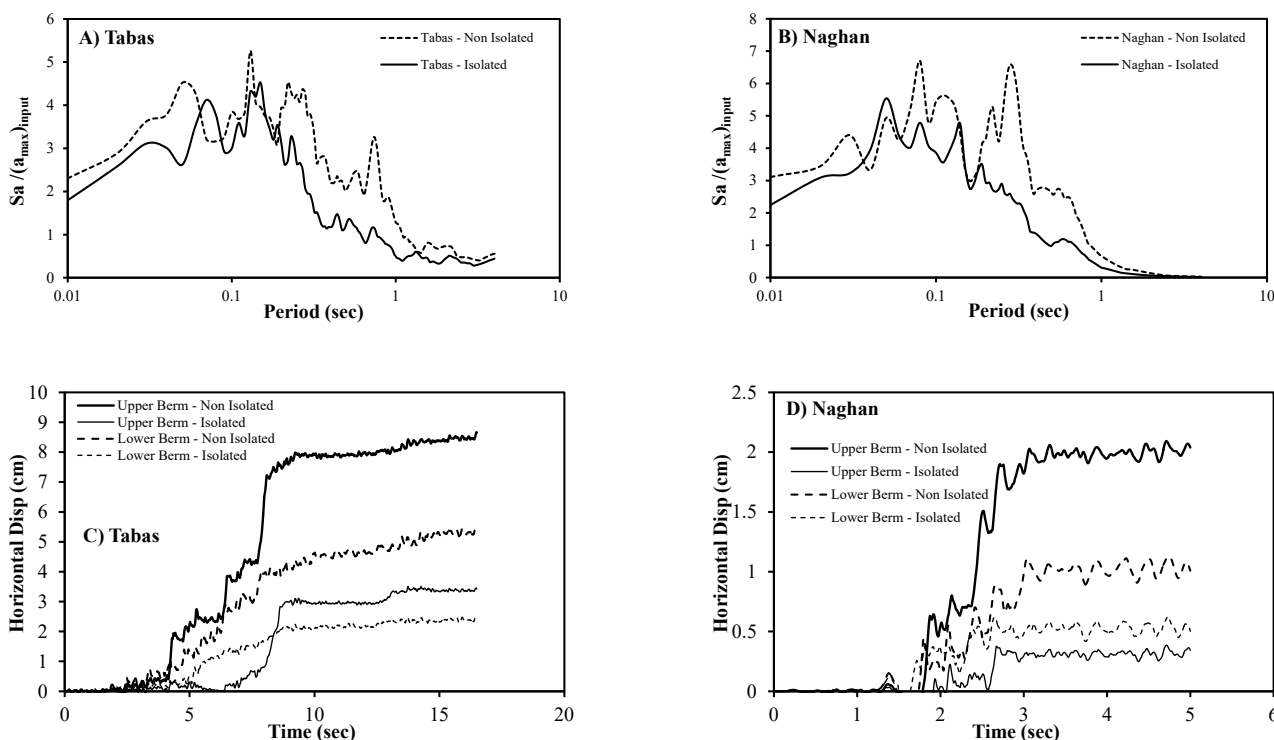


شکل ۱۶. اثر شکل هندسی لاینر بر بزرگنمایی طیفی در تاج و جابجایی ماندگار برم  
Fig. 16. Effect of liner geometry on spectral magnification at the crest and permanent displacement of berms

قله طیف همزمان با جداسازی لرزه‌ای طی رکورد طیس از ۵/۲ به ۴/۳ رسید. این کاهش بر اثر رکورد ناغان از ۶/۷ به ۴/۷ در قله دوم طیف رخ داد. جابجایی‌های افقی در شکل حاضر نشان می‌دهند که با بارگذاری‌های لرزه‌ای واقعی نیز رفتاری مطابق انتظار رخ داده و مدل‌های حاوی جداسازی لرزه‌ای جابجایی‌های افقی خیلی کمی را در مقایسه با مدل‌های جدانشده تجربه کرده (۱ الی ۵ برابر) و عرض ترک‌ها کاهش یافته‌اند.

### ۵-۳-۴ اثر بارگذاری واقعی زلزله

در طبیعت حرکات ورودی طی زمین‌لرزه‌ها هارمونیک نبوده و دارای محتوای فرکانسی و دامنه‌ای متفاوت در طول رکورد است. از این رو در این قسمت مدل مدفن با ۲ رکورد زلزله بزرگ و معروف رخ داده در ایران (طیس و ناغان) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که بزرگنمایی طیفی شتاب پس از جداسازی لرزه‌ای بستر کاهش یافته است. به عنوان مثال نسبت بزرگنمایی طیفی در



شکل ۱۷. اثر زلزله‌های واقعی بر بزرگنمایی طیفی شتاب در تاج مدفن و جابجایی ماندگار برم‌های سمت راست  
 Fig. 17. Effect of real earthquakes on the spectral magnification at the crest and permanent displacement of the right side berms

(وزن و ترکیب) در مدفن کهریزک با یافته‌های محققین پیشین بر روی همین مدفن تطابق خوبی دارد، لیکن تفاوت زیادی در مقدار رطوبت نمونه‌های حاصل از ترازهای پایین مشاهده گردید. در این تحقیق رطوبت حداکثری ۲۵٪ اندازه‌گیری شد در حالیکه محققین قبلی مقادیری حدود ۵۰٪ و حتی بالاتر گزارش کرده‌اند. البته وزن مخصوص زباله‌ها در کهریزک ( $960 - 1222 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) کمتر از مقادیر متناظر در مدفن OII ( $1590 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) مشاهده شد که علت آن عدم تراکم لایه‌های دیو شده است. مقادیر پارامترهای مقاومتی اندازه‌گیری شده در مدفن کهریزک با اختلاف کمی معادل مقادیر گزارش شده در مدفن‌های شناخته‌شده نظیر OII است.

### ۵- بررسی نتایج

جداسازی لرزه‌ای در بستر سازه‌ها توسط محققینی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات پژوهشگران قبلی نشان داد که قرارگیری یک لایه ژئوتکستایل بر روی صفحات UHMWPE ترکیب مناسبی را برای جداسازی پی‌های سطحی و جذب انرژی فراهم می‌نماید. آنها به این نتیجه رسیدند که ضریب اصطکاک دینامیکی در فصل مشترک ترکیب حاضر مستقل از تنش نرمال، تعداد سیکل‌ها و سرعت بارگذاری است. مطالعه اخیر نشان داد که پاسخ دینامیکی سازه طی آزمون میز لرزه با حضور جداساز لرزه‌ای به طور قابل توجهی نسبت به حالت گیردار کوچکتر است [۱۲].

مطالعه حاضر نشان داد که اغلب مقادیر کمیت‌های فیزیکی زباله

## ۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر بررسی اثر جداسازی لرزه‌ای بستر پژوهشی بر پاسخ‌های دینامیکی و تغییرمکان‌های ماندگار خاکریز مدفن زباله با در فازهای صحرایی، آزمایشگاهی و عددی صورت گرفت. نتایج نشان دادند که حرکات قوی به هنگام انتشار از بستر به سمت تاج دچار بزرگنمایی شده و از این رو شتاب‌هایی بزرگتر از شتاب تسلیم گوه‌های محتمل گسیختگی در داخل توده زباله تولید گردیدند. جایگذاری ژئوسنتتیک با فصل مشترک لغزنده در محل لاینر، مقدار شتاب‌های انتقالی و محتویات فرکانسی حرکت‌های انتقال یافته را تحت تأثیر قرار داد. پس به‌طور خلاصه نتایج زیر حاصل می‌شوند:

- ۱- ساز و کار جداسازی لرزه‌ای بستر با کاهش ضریب اصطکاک موجب کاهش تراز شتاب‌های انتقالی و نهایتاً تغییرمکان‌های لرزه‌ای می‌گردد.
- ۲- چسبندگی و ضریب اصطکاک بالا از کارایی جداساز لرزه‌ای می‌کاهد و بالعکس، کاهش مقاومت برشی موجب در فصل مشترک لغزنده، کاهش جابجایی‌های افقی (عرض ترک) را در بردارد.
- ۳- افزایش انرژی تراکمی و مدول برشی حداکثر، مقدار بزرگنمایی و جابجایی نسبی را کاهش می‌دهد. با جداسازی بستر مقدار جابجایی‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- ۴- زباله‌های تازه بیشترین مقدار بزرگنمایی طیفی را در تاج دارند و با افزایش سن زباله مقدار بزرگنمایی طیفی شتاب کاهش می‌یابد. هم‌زمان با افزایش سن زباله، مقدار جابجایی و عرض ترک در هر دو حالت جدا شده و جدانشده افزایش می‌یابد. همچنین مطابق انتظار استفاده از جداساز در بستر موجب کاهش مقدار جابجایی ماندگار و عرض ترک نسبت به مدل فاقد جداساز می‌گردد.
- ۵- هندسه لاینر و جداساز بر پاسخ سازه جدا شده تأثیر عمده‌ای گذاشته و آن را احاطه می‌کند به طوری که لاینر تخت بزرگنمایی را به شکل قابل توجهی می‌کاهد؛ همچنین لاینر مقعر مقدار تغییر شکل‌ها و تغییرمکان‌های ماندگار را کاهش می‌دهد.

مقاله حاضر دریچه‌ای است برای کارهای تحقیقاتی بیشتر و پیشنهاد می‌شود که جهت حصول داده‌های دقیق‌تر از جعبه لایه‌ای در آزمون میز لرزه استفاده کرده و آزمون‌های المانی صورت پذیرد. در این راستا ابزاربندی مدفن کهریزک و داشتن داده‌های میدانی حاصل از مدفن حاضر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین پیشنهاد می‌شود که تحلیل‌های سه‌بعدی اندرکنش سازه‌های مدفون و روسطحی با زباله‌های انباشته شده صورت پذیرد.

## ۷- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر با حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهری شهرداری تهران انجام گرفت. در این راستا، مقاله حاضر با همکاری مدیریت و تکنسین‌های بخش دفن در مرکز دفن زباله کهریزک و آزمایشگاه مدل‌سازی فیزیکی مرکز تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک (دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران) انجام شد. همچنین نویسندگان مراتب تشکر خود را از گروه بازرگانی IBA در زمینه تهیه ژئوسنتتیک‌های مورد استفاده اعلام کرده و برای همکاری مشفقانه تمامی این افراد صادقانه قدردانی می‌نمایند.

## ۸- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

Cs	سرعت انتقال موج در محیط، m/sec
G	مدول برشی، Pa
Gmax	مدول برشی حداکثر، Pa
Sa/amax	نسبت بزرگنمایی طیفی
Sf	نمونه تازه
S5	نمونه ۵ ساله
S21	نمونه ۲۱ ساله
Vs	سرعت موج برشی ورودی، m/sec
f	فرکانس، Hz
z	عمق، m

### علائم یونانی

a, b	ضرایب کالیبراسیون معادله هیپربولیک تغییرات وزن مخصوص
Dl	حداکثر بعد المان، m
g	وزن مخصوص مصالح، kN/m <sup>۳</sup>
l	ضریب مقیاس بندی
l	طول موج
ρ	چگالی، kg/m <sup>۳</sup>
ss	تنش برشی، Pa
x	میرایی



of Kahrizak Landfill, in: IWWG International Waste Working Group, Specialized Session C, Waste-to-Energy Research and Technology Council, October, 2007.

[14] H. Zafarani, B. Hassani, A. Ansari, Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42(Supplement C) (2012) 197-218.

[15] Islamic Republic News Agency (IRNA), Retrieved from <http://www.irna.ir/fa/News/278262>, (2012, July 10).

[16] Iranian Students News Agency (ISNA), Retrieved from <https://www.isna.ir/news/96021106503>, (2017, May 1).

[17] Maps, G. (2016). Aerial and Three-dimensional View of the OII Landfill [Aradkooch waste processing plant]. 2014, Retrieved from <https://www.google.com/maps>, (2015, May 10)

[18] Iran Bana Arian, Geosynthetic Data Sheet, Retrieved from [http://ibagroup.ws/?page\\_id=449](http://ibagroup.ws/?page_id=449), (2015, Jan 14).

[19] R.M. Koerner. Designing with Geosynthetics, Second Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1(1990).

[20] S. Iai, Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, *Soils and Foundations*, 29(1) (1989) 105-118.

[21] P.J. Meymand, Shaking Table Scale Model Tests of Non-linear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay, University of California, Berkeley, 1998.

[22] N. Matasovic, E.J. Kavazanjian, Cyclic Characterization of OII Landfill Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(3) (1998) 197-210.

[23] E.J. Kavazanjian, N. Matasovic, R. Bonapart, G.R. Schmertmann, Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis, New Orleans, LA, 1995.

[24] P. Yuan, E.J. Kavazanjian, W. Chen, B. Seo, Compositional Effects on the Dynamic Properties of Municipal Solid Waste, *Waste Management*, 31(12) (2011) 2380-2390.

[25] G.A. Ordonez, SHAKE2000: A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, in: User's Manual, Geomotions, LLC, Lacey, Washington, 2010.

[26] M.K. Yegian, M. Catan, Soil Isolation for Seismic Protection Using a Smooth Synthetic Liner, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11) (2004) 1131-1139.

[27] D. Zekkos, J.D. Bray, E.J. Kavazanjian, N. Matasovic, E.M. Rathje, M.F. Riemer, K.H. Stokoe, Unit Weight of Municipal Solid Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10) (2006) 1250-1261.

[28] N. Shariatmadari, A.H. Sadeghpour, F. Razaghian, Effects of Aging on the Shear Strength Behavior of Municipal

[1] K. Han, C. Yun-min, L. Dao-sheng, W. Zhen-tong, Stability and Permanent Displacements Analysis of Wasteland During Earthquakes, *Acta Seismologica Sinica*, 14(2) (2001) 216-224.

[2] M.G. Ayoola, H.I. Inyang, V.O. Ogunro, Analyses of Seismic Damage to Interfaces in Waste Containment Systems: A Review, *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 9(4) (2005) 292-304.

[3] N. Matasovic, E. Kavazanjian, Seismic Response of a Composite Landfill Cover, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(4) (2006) 448-455.

[4] E.J. Kavazanjian, 11th Peck Lecture: Predesign Geotechnical Investigation for the OII Superfund Site Landfill, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11) (2013) 1849-1863.

[5] F. Castelli, V. Lentini, M. Maugeri, Stability Analysis of Landfills in Seismic Area, in: *Geo-Congress 2013*, 2013.

[6] G.N. Richardson, E.J. Kavazanjian, N. Matasovic, RCRA Subtitle D (258): Seismic Design Guidance for Municipal Solid Waste Landfill Facilities, EPA/600/R-95/051, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio : Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, 1995.

[7] E.J. Kavazanjian, Seismic Design of Solid Waste Containment Facilities, in: *Proceedings of the Eight Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, 1999, pp. 51-89.

[8] N. Matasovic, E. Kavazanjian, A. Augello, J.D. Bray, R.B. Seed, Solid Waste Landfill Damage Caused by 17 January 1994 Northridge, in: Woods, Mary C. and Seiple, Ray W., Eds., *The Northridge, California, Earthquake of 17 January 1994*, California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, 1995, pp. 221-229.

[9] M.K. Yegian, U. Kadakal, Geosynthetic Interface Behavior under Dynamic Loading, *Geosynthetics International*, 5(1-2) (1998) 1-16.

[10] C.A. Kircher, 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, FEMA P-750, 2009.

[11] M.K. Yegian, A. M. Lahlaf, Dynamic Interface Shear Strength Properties of Geomembranes and Geotextiles, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(5) (1992) 760-779.

[12] M.K. Yegian, U. Kadakal, Foundation Isolation for Seismic Protection Using a Smooth, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11) (2004) 1121-1130.

[13] S.A. Harati, R.J. Jamshidi, A. Abdollahi-Nasab, Landfill Gas Extraction Potential from Conventional Landfills-Case Study

brane/Geosynthetic Clay Liner Interfaces, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(6) (2001) 543-552.

Solid Waste, International Journal of Civil Engineering, 12(3) (2014) 226-237.

[29] E.J. Triplett, P.J. Fox, Shear Strength of HDPE Geomem-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

V. Mirhaji1, Y. Jafarian , M. H. Baziar, M.K. Jafari, Numerical and Experimental Studies of Seismic in-Soil Isolation of MSW Landfill by Geosynthetic Liners: Case Study of Kahrizak Landfill, Tehran, Iran , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)557-574.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13759.5471

