

نوع مقاله: مروری

چکیده

مدل‌سازی فیزیکی به‌عنوان یکی از روش‌های آزمایشگاهی در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد گسترده‌ای دارد. از این روش برای مطالعه رفتار لرزه‌ای زمین‌های سطح و شیب‌دار، خاک‌های مسئله‌دار مانند رس‌های نرم و رمنبده، خاکریزها، دیوارهای حائل، خاک‌های مستعد روانگرایی و نیز سیستم‌های خاک-سازه نظیر پی‌های سطحی و عمیق و روش‌های بهسازی آن استفاده می‌شود. در مدل‌سازی فیزیکی سیستم‌های خاک-سازه که در دو حالت ۱ g در محیط گرانشی زمین و یا Ng با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ بر روی میز لرزان انجام می‌شود، نمی‌توان خاک را به‌صورت مستقیم بر روی عرشه میز قرار داد. از این رو، به یک محفظه برای نگهداری مدل خاک-سازه بر روی میز لرزان به‌منظور بازتولید تنش‌های محصورکننده ستون خاک در واقعیت و نیز شبیه‌سازی تنش‌های ایجاد شده در حین اعمال تحریک دینامیکی نیاز است. با ساخت اولین محفظه مدل در دهه ۱۹۵۰ میلادی، مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک وارد عصر نوینی شد. از آن زمان، محققین بسیاری سعی در ساخت و توسعه محفظه‌های مدل با توجه به اهداف پژوهشی خود کردند و بدین ترتیب انواع محفظه‌ها با اهداف و ویژگی‌های متنوع توسعه یافتند. در پژوهش حاضر که به‌صورت یک مطالعه مروری است، ابتدا تاریخچه مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به‌طور مختصر بیان شده است. سپس روند توسعه انواع محفظه‌های مدل و شرایط مرزی ایده‌آل برای شبیه‌سازی ستون خاک در واقعیت و شرایط مرزی محفظه برشی لایه‌ای به‌طور جامع تشریح شده است. در میان محفظه‌های ساخته شده در ادبیات فنی، محفظه برشی لایه‌ای به دلیل دقت مناسب در مدل‌سازی شرایط مرزی ستون خاک، توانایی شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد خاک و ایجاد امکان حرکت آزادانه ستون خاک بدون اعمال اصطکاک قابل توجه، به پرکاربردترین نوع محفظه در چند دهه اخیر تبدیل شده است. محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در مراکز معتبر پژوهشی داخلی که در ادبیات فنی موجود هستند به همراه مشخصات اصلی از جمله ویژگی‌های مدل‌سازی، جزئیات طراحی و شرایط مرزی به تفصیل در این تحقیق بررسی شده است.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی فیزیکی، ژئوتکنیک لرزه‌ای، محفظه برشی لایه‌ای، میز لرزان.

مروری بر روند توسعه محفظه‌های برشی لایه‌ای در مدل‌سازی فیزیکی مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای

پوریا اسمعیل‌پور

دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

آرمان مام‌عزیزی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، a.mamazizi@uok.ac.ir

۱- مقدمه

پارامترهای مهم، ساده‌سازی مسئله انجام شود. از این رو، مهندسی اساساً به شناخت و مدل‌سازی ویژگی‌های مهم مسئله گره خورده است. محققین در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی، با استفاده از مدل‌سازی، سعی در پیدا کردن راه‌حل قابل قبول برای مسائل واقعی دارند. علت اصلی انجام مدل‌سازی در علوم مهندسی این

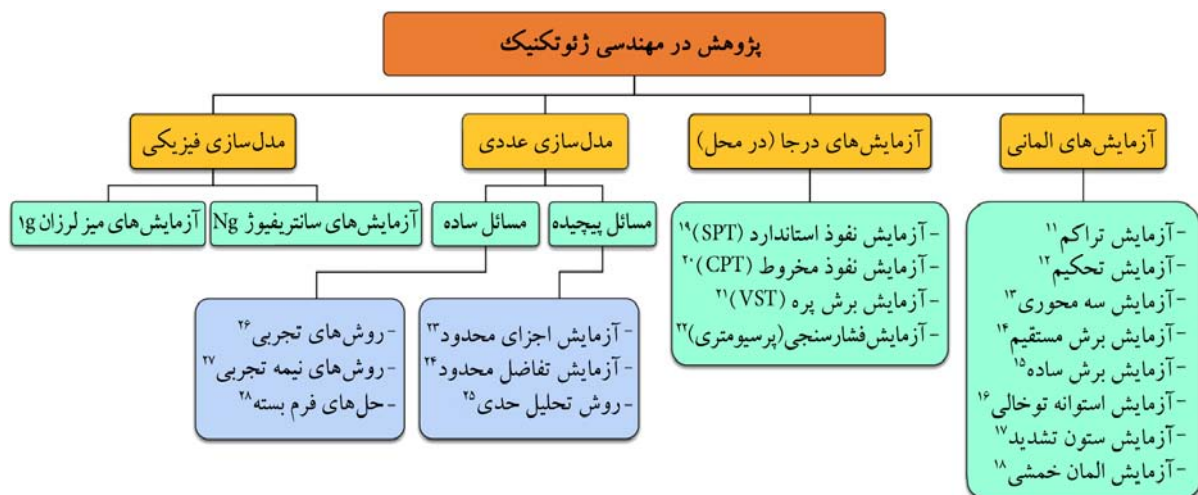
مدل‌سازی، یک نوع ساده‌سازی مناسب و منطقی از مسائل پیچیده واقعی است. مهارت اصلی در مدل‌سازی، یافتن سطح مناسبی از ساده‌سازی است؛ به گونه‌ای که آن دسته از ویژگی‌ها و پارامترهای مهم تأثیرگذار در مسئله از ویژگی‌های غیر مهم که در نتایج تأثیر چندانی ندارند، تفکیک شود و با تکیه بر

این قوانین پل ارتباطی میان مقادیر پارامترهای اصلی مسئله در مقیاس مدل و اصلی را تبیین می‌کنند. هرچند انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی می‌تواند در مقیاس کامل و بدون مقیاس کردن مدل اصلی صورت گیرد که در این حالت می‌توان تمام ویژگی‌های مدل را بدون در نظر گرفتن قوانین ابعادی و در مقیاس واقعی تفسیر کرد. به هر حال، اکثر مدل‌های فیزیکی در مقیاس کوچک‌تر از مدل اصلی ساخته می‌شوند که در این صورت استفاده از قوانین ابعادی متناسب با نوع مسئله، برای تفسیر نتایج به‌دست آمده بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، محققین مختلف همواره در تلاش بودند روابط تشابه مختلفی متناسب با شرایط هر آزمایش ارائه دهند [۲-۴].

همان‌طور که در شکل (۱) نمایان است، پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک به‌عنوان یکی از شاخه‌های مهندسی عمران که بیشتر با درک رفتار خاک سر و کار دارد، به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شود [۱]؛ (۱) آزمایش‌های المانی^۱، (۲) آزمایش‌های درجا (در محل^{۱۰})، (۳) مدل‌سازی عددی و (۴) مدل‌سازی فیزیکی؛ در این میان، مدل‌سازی فیزیکی به‌عنوان یکی از روش‌های آزمایشگاهی در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد گسترده‌ای دارد. از این شاخه پژوهش برای مطالعه رفتار لرزه‌ای زمین‌های مسطح و شیب‌دار، خاک‌های مسئله‌دار مانند رس‌های نرم و رمنده، خاکریزها، دیوارهای حائل، خاک‌های مستعد روانگرایی و نیز سیستم‌های خاک-سازه نظیر پی‌های سطحی و عمیق و روش‌های بهسازی استفاده می‌شود [۵].

است که امکان حل کامل مسائل پیش روی مهندسين به صورت واقعی تا آن زمان مقدور نبوده و یا به دلیل محدودیت زمانی و مسائل مالی، حل دقیق و کامل مسئله مقرون‌به‌صرفه نیست. مدل‌سازی در علوم مهندسی از اهمیت خاصی برخوردار بوده و به انواع مختلفی تقسیم می‌شود. در هر پروژه، با توجه به نیازهای مهندسی آن پروژه، محدودیت‌های مالی و زمانی پیاده‌سازی مدل‌سازی، دقت و میزان قابلیت اطمینان نتایج، یکی از انواع مدل‌سازی انتخاب می‌شود. مهم‌ترین روش‌های مدل‌سازی رایج در علوم مهندسی عبارت‌اند از [۱]: (۱) مدل‌سازی تجربی^۱، (۲) مدل‌سازی تحلیلی^۲، (۳) مدل‌سازی عددی^۳، (۴) مدل‌سازی فیزیکی^۴ و (۵) مدل‌سازی با شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک^۵.

در مدل‌سازی فیزیکی، به‌منظور مطالعه جنبه‌های مختلف مسئله در واقعیت، غالباً مدل مقیاس شده^۶ از مدل واقعی (پروتوتایپ^۷) به صورت فیزیکی ساخته می‌شود و در شرایط مورد نظر تحت آزمایش قرار می‌گیرد. مقیاس (و یا کوچک) کردن مدل واقعی مزایایی دارد؛ (۱) درک رفتار واقعی مسئله در زمان کوتاه‌تر و با هزینه کمتر، (۲) کنترل بیشتر و دقیق‌تر بر پارامترهای مورد نظر در هر مسئله و (۳) اعتبارسنجی مدل‌های تئوری یا عددی از مزایای استفاده از مدل‌سازی فیزیکی هستند. لازم به ذکر است برای تبدیل نتایج به‌دست آمده از آزمایش مدل‌سازی فیزیکی به نتایج در مقیاس واقعی، باید روابط تشابه (و یا قوانین ابعادی^۸) متناسب با پارامترهای کلیدی مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. به عبارت دیگر،



شکل (۱): پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای [۱].

میدان جاذبه g بر روی میز لرزان گرچه نمی‌تواند به دلیل محدودیت عمق لایه خاک سطح تنشی مشابه واقعیت تولید کند ولی در مسائلی که سطوح تنش کم بوده و یا تأثیر کمتری بر نتایج دارند (مانند رفتار لرزه‌ای پی‌های سطحی)، پاسخ‌های قابل قبولی به دست می‌دهند [۹]. به علاوه، هزینه آزمایش‌های g بسیار کمتر از آزمایش‌های Ng است. با رشد و پیشرفت فناوری، میز لرزان‌های مدرن امروزی از لحاظ اندازه، تعداد درجات آزادی، ظرفیت و دقت اعمال بار دینامیکی، بهبود قابل توجهی یافته‌اند؛ به گونه‌ای که می‌توان کلیه مودهای تغییر شکل سیستم‌های خاک-سازه بزرگ مقیاس را با دقت خوبی مدل کرد. به علاوه، با استفاده از محرک‌های ظرفیت بالا، امکان افزایش سطح تنش در مدل از طریق افزایش ابعاد مدل خصوصاً عمق مدل خاک وجود دارد، زیرا دیگر محدودیت فضا برای قرار دادن مدل‌های بزرگ‌تر و سایر تجهیزات ابزار دقیق مورد نیاز وجود ندارد [۱۰].

در پژوهش حاضر که به صورت یک مطالعه مروری است، ابتدا تاریخچه مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به طور مختصر بیان شده است. سپس شرایطی که محفظه‌ها بایستی برای شبیه‌سازی ایده‌آل خاک داشته باشند، بیان شده است. روند توسعه انواع محفظه‌های مدل به همراه مزایا و معایب هر یک به طور جامع تشریح شده است. در ادامه، محفظه برشی لایه‌ای معرفی شده و مشخصات اصلی آن اعم از ویژگی‌های مدل‌سازی، جزئیات طراحی و شرایط مرزی بیان شده است. همچنین محفظه‌های ساخته شده در مراکز معتبر پژوهشی کشور که در ادبیات فنی موجود هستند به همراه جزئیات طراحی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تاریخچه مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای

در مصر قدیم، ایران، یونان و روم، سازندگان سازه‌ها پیش از شروع مراحل ساخت، مدل‌هایی با مقیاس کوچک‌تر می‌ساختند تا بتوانند ایرادهای طراحی و مشکلات و موانع پیش روی ساخت را بهتر درک کنند و به کمک این مدل‌ها، آنها را رفع کنند [۷]. همین امر باعث شده است که از آن‌ها آثار تاریخی

آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به واسطه توانایی شبیه‌سازی شرایط واقعی خاک در حین اعمال بارهای دینامیکی نسبت به سایر آزمایش‌های المانی و میدانی مزیت دارد. کنترل مناسب بر شرایط آزمایش و نیز امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف حین و بعد از اعمال بار نظیر شتاب، جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ای^{۲۹}، با استفاده از ابزارگذاری مناسب از مزایای مهم این دسته از آزمایش‌ها است. به علاوه، مطالعه برخی از پدیده‌های ژئوتکنیکی پیچیده که در آنها کرنش‌های بزرگ اتفاق می‌افتد (مانند پدیده روانگرایی و زمین لغزش) تنها با انجام این نوع آزمایش‌ها میسر است [۶]. آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به طور کلی به دو صورت انجام می‌شود:

(۱) آزمایش‌های g در میدان گرانشی زمین بر روی میز لرزان و (۲) آزمایش‌های Ng در میدان جاذبه افزایش یافته با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی^{۳۰}؛ که هر یک از این دو دسته از آزمایش‌ها مزایا و محدودیت‌هایی دارند. در آزمایش‌های g بر روی میز لرزان، به دلیل عمق محدود لایه خاک مدل، امکان شبیه‌سازی تنش‌های مؤثر مشابه با واقعیت، امکان‌پذیر نیست. از این رو، عدم تطابق سطوح تنش در مدل و واقعیت، مهم‌ترین محدودیت آزمایش‌های g بر روی میز لرزان محسوب می‌شود.

برای جبران این محدودیت مهم در آزمایش‌های g ، استفاده از ایده دستگاه سانتریفیوژ برای افزایش میدان شتاب حاکم بر مدل خاک که پیش‌تر در علوم دیگر استفاده می‌شد، مورد توجه محققین حوزه ژئوتکنیک قرار گرفت [۷]. فلسفه اصلی استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی در مطالعه مسائل لرزه‌ای سیستم‌های خاک-سازه^{۳۱}، افزایش سطح تنش مؤثر در عمق خاک مدل به وسیله شتاب مرکز گرای بیشتر از شتاب ثقل زمین (و یا Ng) است که توسط دستگاه سانتریفیوژ ایجاد می‌شود. مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای با استفاده از سانتریفیوژ، به دلیل انطباق سطح تنش در مدل با سطح تنش در واقعیت، نتایج کاربردی تری به دست می‌دهد. البته لازم به ذکر است، نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ هم بدون در نظر گرفتن خطاهای ناشی از مقیاس کردن پارامترها ممکن است قابل اعتماد نباشند [۸]. همچنین مدل‌سازی ژئوتکنیکی در

پایان یافتن جنگ جهانی دوم، استفاده از مدل مقیاس شده در مطالعه بسیاری از انواع سازه‌ها در رشته مهندسی راه و ساختمان در میان پژوهشگران مورد توجه قرار گرفت. امروزه با پیشرفت فناوری، ساخت میز لرزان‌های بزرگ مقیاس با درجات آزادی بیشتر و همچنین توسعه ابزارهای دقیق اندازه‌گیری نظیر جابه‌جایی سنج‌ها، نیروسنج‌ها، شتاب‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها سرعت بیشتری یافته است. این پیشرفت‌ها موجب شده است که مدل‌سازی فیزیکی در علوم مهندسی به‌ویژه در مهندسی ژئوتکنیک رواج بیشتری یافته و راه خود را در میان سایر روش‌های تحقیقاتی باز کند.

در چند سال اخیر، اقداماتی برای ساخت، توسعه و بهره‌گیری از میز لرزان برای استفاده در مدل‌سازی فیزیکی مسائل لرزه‌ای در برخی از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی داخلی نیز صورت گرفته است. در جدول (۱)، میز لرزان‌های موجود در کشور به همراه مشخصات هر یک آورده شده است [۱۱].

۲-۲- دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

ایده استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در مدل‌سازی سازه‌ها برای اولین بار در اواخر قرن نوزدهم توسط ادواردو فیلیپس مطرح شد [۸]. اولین مقاله به زبان انگلیسی که در آن از دستگاه سانتریفیوژ برای مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی استفاده شد، توسط پوکروسکی و فیودوروف [۱۲] در اولین کنفرانس جهانی مکانیک خاک و مهندسی پی در سال ۱۹۳۶ در دانشگاه هاروارد آمریکا ارائه شد. پس از جنگ جهانی دوم، این آزمایش‌ها غالباً در مهندسی

تحسین برانگیزی به جای مانده است. آثاری که قدمت آن‌ها گاهی به بیش از هزار سال می‌رسد. این سازندگان دنیای کهن، اطلاعات امروزی ما در مورد رفتار و خواص مصالح ساختمانی، سازه‌ها، ریاضیات و روش‌های اندازه‌گیری را نمی‌دانستند و در ساخت مدل اغلب به مشاهده بصری و بررسی مشکلات اجرایی قناعت می‌کردند. در عصر جدید، مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به پیشینه ساخت و توسعه: (۱) میز لرزان، (۲) دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی و (۳) محفظه مدل گره خورده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۲-۱- میز لرزان

با ساخت اولین میز لرزان در اواخر قرن نوزدهم میلادی در کشور ژاپن، مدل‌سازی فیزیکی به‌ویژه در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای پیشرفت قابل ملاحظه‌ای کرد [۱۰]. این میز لرزان بسیار ساده بوده و با نیروی دست به حرکت درمی‌آمد. در ابتدای قرن بیستم، اولین میز لرزانی که با استفاده از محرک‌های الکتروموتور^{۳۲} به حرکت درمی‌آمد در دانشگاه استنفورد آمریکا توسعه یافت و مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. پس از آن و با وقوع زلزله‌های مخرب متعدد در دهه ۱۹۲۰ میلادی، محققین دانشگاه استنفورد بر آن شدند که برای ساخت نسل جدیدی از میز لرزان‌های یک جهته، طرح قبلی خود را توسعه دهند. با گذشت زمان، پژوهشگران دیگر نیز اقدام به طراحی و ساخت مدل‌های جدیدتری از میز لرزان کردند که بتواند تحریک ورودی به مدل را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. با

جدول (۱): میز لرزان‌های موجود در داخل کشور [۱۱].

دانشگاه/مؤسسه تحقیقاتی	اندازه عرشه (متر)	ظرفیت (تن)	درجات آزادی
دانشگاه صنعتی شریف	۴×۴	۳۰	۳
دانشگاه تهران	۱/۸×۱/۲	۶	۱
دانشگاه علم و صنعت	۲×۰/۵	۵	۱
دانشگاه امیرکبیر	۴×۲/۵	۱۵	۱
دانشگاه تبریز	۳×۲	۶	۱
دانشگاه گیلان	۱×۱	۰/۵	۱
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله	۱/۴×۱/۲	۲	۱
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله	۶×۶	۴۰	۶

اولین محفظه در دهه ۱۹۵۰ میلادی برای انجام آزمایش‌های میدان آزاد^{۳۴}، مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک وارد عصر جدیدی شد [۱۵]. با رشد روزافزون آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در چند دهه اخیر، محققین مختلف همواره به دنبال ساخت محفظه‌هایی بوده‌اند که علاوه بر شبیه‌سازی حرکت ستون خاک و باز تولید شرایط تنش-کرنش در واقعیت، شرایط مرزی مناسبی نیز داشته باشد. از این‌رو، انواع محفظه‌های مدل برای انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی توسعه یافتند. از طرفی، مسائلی که امکان مطالعه آنها با آزمایش‌های المانی و برداشت‌های محلی امکان‌پذیر نبود، به راحتی توسط آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفتند و نتایج رضایت‌بخشی را به ارمغان آوردند. به علاوه، نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی برای کالیبره کردن مدل‌های رفتاری و همچنین توسعه و صحت‌سنجی نرم‌افزارها و روش‌های عددی نظیر روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود از اهمیت بسیاری برخوردار هستند [۱۶-۱۷].

۳- شرایط ایده‌آل برای محفظه‌های مدل

لایه‌های خاک در شرایط واقعی دارای محیطی نیمه‌بی‌نهایت^{۳۵} هستند، در حالی که در مدل مقیاس شده در داخل محفظه دارای ابعاد محدود و محصور میان مرزهای مصنوعی محفظه خواهند بود. از این‌رو، برای بازتولید شرایط ایده‌آل خاک در داخل محفظه، مسائل مهمی از جمله (۱) شبیه‌سازی میدان تنش و کرنش، (۲) وضعیت تنش قبل و هنگام اعمال بارگذاری دینامیکی، (۳) نحوه انتشار امواج در میان لایه‌های خاک، (۴) تولید امواج P و مسئله بازتاب امواج و (۵) آب‌بند بودن^{۳۶} محفظه بایستی به‌خوبی در نظر گرفته شود و در شبیه‌سازی آن به نحوی قابل قبول، اقدامات لازم را انجام داد.

۳-۱- شبیه‌سازی تنش و کرنش

برای مدل‌سازی صحیح تغییر شکل و تنش‌های ایجاد شده در ستون خاک هنگام اعمال تحریک افقی، بایستی از الگوی تغییر شکل و نحوه ایجاد تنش‌های برشی و عمودی در المان خاک

معدن و با مطالعه اثر مهارهای پیچی نصب شده در سنگ و اثرات اندرکنش سنگ-سازه از سر گرفته شد؛ تا اینکه در سال ۱۹۸۸ برای اولین بار در ژاپن از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی برای تحکیم سریع تر خاک‌های رسی بهره گرفته شد [۱۳]. از آن زمان به بعد و با پیشرفت ساخت دستگاه‌های سانتریفیوژ پیشرفته‌تر، مطالعه آزمایشگاهی دامنه وسیعی از موضوعات ژئوتکنیکی مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفت [۱۴].

در داخل کشور، سه دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی به‌صورت عملیاتی وجود دارد. دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله یکسان بوده و ساخت شرکت Actidyn System فرانسه است. این دستگاه دارای شعاع چرخشی ۳ متر و ظرفیت باربری ۱۵۰۰ کیلوگرم در شتاب اعمالی ۱۰۰g و ظرفیت باربری ۸۵۰ کیلوگرم در حداکثر شتاب ۱۳۰g است. ابعاد نمونه آزمایشگاهی (سبد دستگاه) ۱×۰/۸ متر است. این دستگاه امکانات متنوعی از قبیل امکان دسترسی به نمونه تحت آزمایش در حین چرخش از طریق کنترل‌های الکترونیکی، امکان تزریق مایعات و یا گاز به نمونه و همچنین برداشت تصاویر و ثبت اطلاعات از نمونه آزمایشگاهی حین چرخش را فراهم می‌سازد. دستگاه سانتریفیوژ دیگری که در دانشگاه علم و صنعت در سال ۱۳۸۳ هجری شمسی ساخته شده است، دارای بازوی یک متر و شتاب اسمی ۱۳۰g و توان ۱۲ Ton-g است. این دستگاه که برای اولین بار توسط محققین داخلی ساخته شده است، امکان انتقال اطلاعات از نمونه به‌صورت بی‌سیم را دارد [۱۱].

۳-۲- محفظه مدل

در مدل‌سازی فیزیکی مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر روی میز لرزان در هر دو حالت ۱g و N_g، نمی‌توان خاک را به‌صورت مستقیم بر روی عرشه میز قرار داد. به‌منظور نگهداری مدل خاک-سازه بر روی میز لرزان و نیز بازتولید تنش‌های محصور کننده^{۳۳} در واقعیت و شبیه‌سازی تنش‌های ایجاد شده در خاک در حین اعمال لرزش، به یک محفظه برای نگهداری مدل خاک-سازه بر روی میز لرزان نیاز است. با ساخت

اجتناب از اعوجاج^{۴۰} در صفحات افقی، ایجاد دیوارهای کناری^{۴۱} (و نه دیواره‌های انتهایی^{۴۲}) صاف و بدون اصطکاک است [۱۹].

۲-۳- وضعیت تنش قبل و حین اعمال بار دینامیکی افقی

قبل از اعمال بارگذاری دینامیکی (شرایط ژئواستاتیک)، میدان تنش در هر نقطه بر روی صفحه دلخواه در توده خاک را می‌توان به وسیله تنش‌های قائم (σ'_v) و افقی (σ'_h) نشان داد. در این حالت تنش برشی وجود ندارد و تنش‌های قائم و افقی در نقطه‌ای با عمق Z به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) برابر است با:

$$\sigma'_v = \gamma Z \quad (1)$$

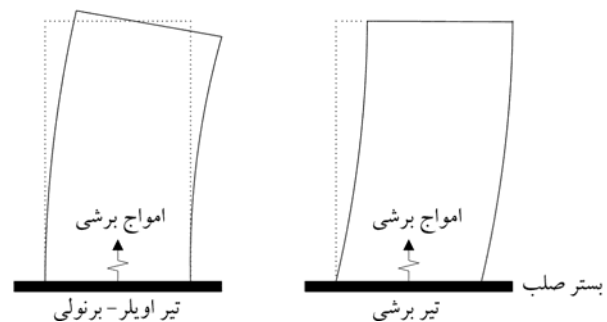
$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (2)$$

γ و K_0 به ترتیب وزن مخصوص و ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون هستند. در شرایط ژئواستاتیک، صفحات عمودی و افقی هر المان صفحات اصلی و تنش‌هایی که بر این صفحات اعمال می‌شوند، تنش‌های اصلی هستند. شکل (۳) تنش‌های قائم و برشی ایجاد شده حین اعمال بار در محیط نیمه‌بی‌نهایت خاک واقع بر بستر صلب و الگوی تغییر شکل خاک را نشان می‌دهد [۲۰].

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، اعمال بارگذاری افقی موجب به وجود آمدن تنش‌های برشی در هر دو صفحه افقی و عمودی می‌شود. اگر دیواره‌های انتهایی محفظه بدون اصطکاک باشند، تنش‌های برشی مکمل^{۴۳} بر روی صفحات قائم نزدیک مرزهای محفظه همانند شکل (۴) تولید نمی‌شوند و میدان تنش تشکیل شده در نزدیکی مرزها با نمونه واقعی متفاوت خواهد بود. عدم بازتولید تنش‌های برشی مکمل در اثر اعمال بارگذاری دینامیکی افقی در نزدیکی مرز به دلیل صاف و بدون اصطکاک بودن دیواره‌های انتهایی موجب انحراف میدان تنش به وجود آمده در داخل محفظه از شرایط واقعی و ایجاد خطا در نتایج می‌شود.

همچنین در حین لرزش افقی، وزن توده خاک یک نیروی اینرسی تولید می‌کند که می‌توان آن را مطابق رابطه (۳) به عنوان یک نیروی افقی معادل در مرکز جرم لایه‌های خاک نظر گرفت

اطلاع دقیق داشت. الگوی نظری تغییر شکل خاک وابسته به فرضیاتی است که در خصوص تغییرات مدول برشی خاک با توجه به عمق در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. قابل ذکر است که جابه‌جایی نقاط هم‌عمق واقع بر یک صفحه مشخص افقی، یکسان است و دامنه جابه‌جایی به نسبت عمق تغییر می‌کند؛ بنابراین تغییر شکل یک ستون از خاک که تحت بارگذاری دینامیکی افقی قرار می‌گیرد را می‌توان با یک تیر برشی^{۳۷} مقایسه کرد. شکل (۲) مقایسه موده‌های تغییر شکل تیر برشی و تیر اویلر-برنولی^{۳۸} را نشان می‌دهد. طراحی محفظه مدل باید به گونه‌ای باشد که جابه‌جایی لایه‌های خاک داخل آن شبیه تیر برشی باشد و مشابه آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد، تغییر شکل‌های خمشی (و یا طره‌ای) نداشته باشد. به علاوه، محفظه مدل طراحی شده بایستی شرایط تنش-کرنش زمین با عمق نامحدود را تحت لرزش یک‌بعدی افقی در ابعاد محدود شبیه‌سازی کند.



شکل (۲): شماتیک مدل تیر برشی و تیر اویلر-برنولی با عملکرد خمشی [۱۸].

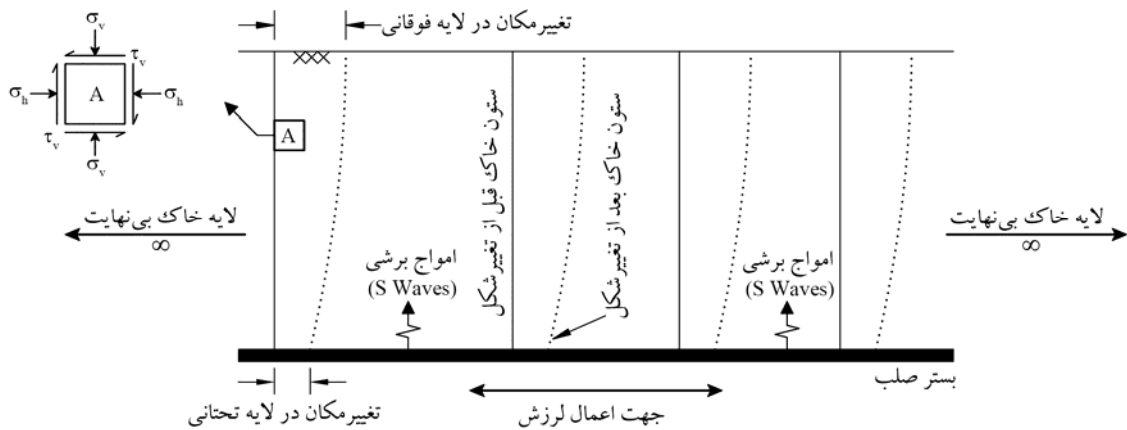
همان‌طور که بیان شد، پروفیل جابه‌جایی خاک ناشی از تحریک افقی در واقعیت به صورت مدل تیر برشی است و محفظه بایستی بتواند این شرایط را ارضا کند. به بیان دیگر، مقطع افقی خاک در داخل محفظه بایستی حین اعمال لرزش به صورت افقی باقی بماند. مسئله مهم دیگری که بایستی به آن پرداخته شود، حفظ شرایط کرنش-مسطح^{۳۹} در مدل خاک تحت تحریک یک‌بعدی است. در محفظه مدل، بعد محدود عرض محفظه (بعد عمود بر راستای لرزش) ممکن است باعث ایجاد تغییر در شرایط کرنش مسطح شود. یکی از راهکارهای ایجاد شرایط کرنش مسطح برای مدل خاک در آزمایش‌های تحریک یک‌بعدی و

واژگونی ساعت‌گرد^{۴۴} می‌شود. برای پایداری سیستم، این لنگر واژگونی باید با اثر تنش‌های برشی که بر روی صفحه‌های عمودی عمل می‌کند، برابر بوده تا نمونه خاک به تعادل برسد. بنابراین در فقدان اصطکاک کافی بین دیواره‌های انتهایی و خاک مجاور آن، تنش‌های برشی مکمل وجود نخواهد داشت و لنگر واژگونی

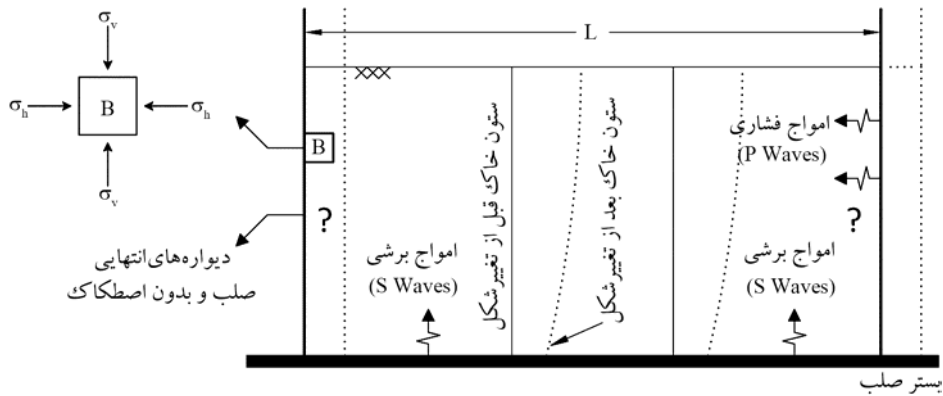
که در جهت خلاف نیروی اعمالی اثر می‌کند.

$$F_{\text{soil}} = k_h W_{\text{soil}} \quad (3)$$

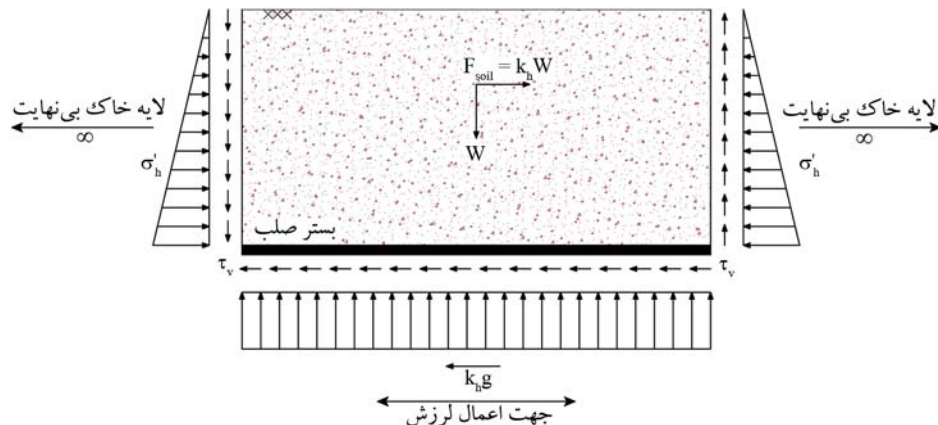
در این رابطه، ضریب فشار جانبی خاک در حالت لرزه‌ای و W_{soil} وزن لایه خاک تحت تأثیر تحریک است. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، نیروی اینرسی ناشی از وزن توده خاک باعث به وجود آمدن یک لنگر



شکل (۳): وضعیت تنش واقعی ایجاد شده در خاک در حین اعمال تحریک لرزه‌ای [۲۰].



شکل (۴): وضعیت تنش در محفظه صلب در حین اعمال تحریک دینامیکی افقی [۲۰].



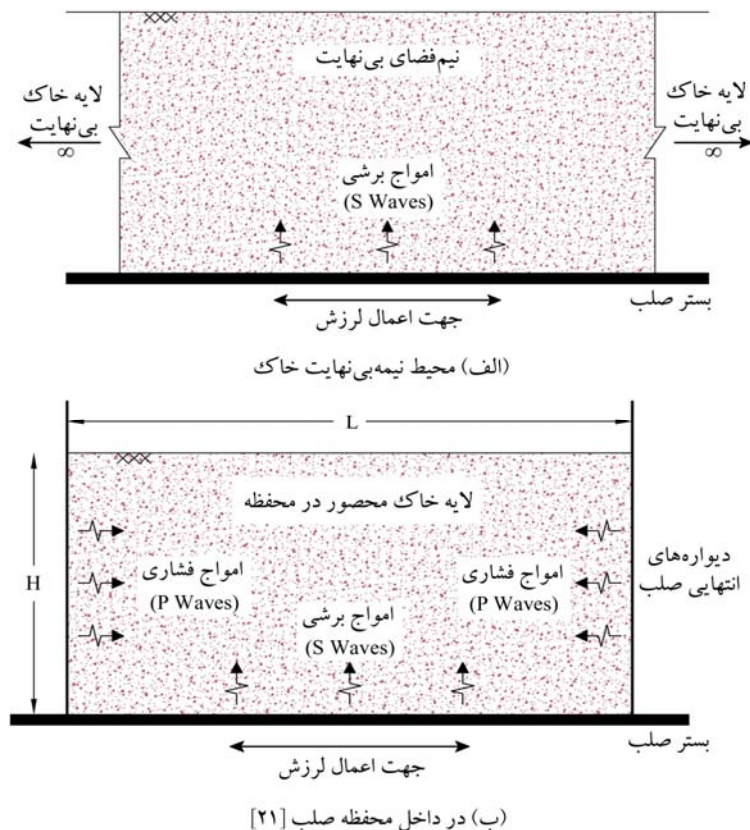
شکل (۵): تنش‌های قائم و برشی تولید شده در لایه خاک به دلیل اینرسی [۱۸].

خاک تحت لرزش افقی مورد نظر قرار گیرد، بازتاب امواج از مرزهای مصنوعی محفظه به داخل نمونه خاک است. مطابق شکل (۶)، با آغاز تحریک افقی نمونه خاک داخل محفظه، امواج برشی S تولید شده از کف صلب در بین لایه‌های خاک و به سمت سطح زمین انتشار می‌یابد. در حین لرزش، با برخورد امواج S به مرزهای محفظه، خاک کنار مرزها تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد و در نتیجه امواج فشاری P تولید می‌شوند و به داخل نمونه خاک باز می‌گردند. از این رو، پاسخ مدل تحت تأثیر اندرکنش میان امواج P و S قرار می‌گیرد [۲۱]. این در حالی است که در محیط نیمه‌بی‌نهایت لایه‌های خاک این پدیده به وجود نمی‌آید، زیرا مرز مشخصی درون خاک وجود ندارد و انرژی امواج در طول مسیر انتشار مستهلک شده و بازتاب پیدا نمی‌کند. در حالت کلی، میرایی انرژی امواج تاییده شده در محیط خاک را می‌توان با در نظر گرفتن دو مکانیزم مختلف توضیح داد: (۱) میرایی ذاتی^{۴۵} که با اصطکاک تولید شده توسط

ایجاد شده در اثر تحریک خنثی نمی‌شود. این مسئله موجب می‌شود لایه خاک درون محفظه تغییر شکل‌های خمشی داشته باشد و دیگر از مود تغییر شکل تیر برشی تبعیت نکند. پروفیل جابه‌جایی خاک ناشی از تحریک افقی در واقعیت به گونه‌ای است که در یک عمق مشخص جابه‌جایی نقاط کنار هم ثابت است و محفظه بایستی این شرایط را ارضا کند. به بیان دیگر، مقطع افقی باید افقی باقی بماند. در محفظه مدل، بعد محدود عرض محفظه (بعد عمود بر راستای لرزش) ممکن است باعث ایجاد تغییر در شرایط کرنش - مسطح شود. یکی از راهکارهای ایجاد شرایط کرنش مسطح برای مدل خاک در آزمایش‌های تحریک یک بعدی، ایجاد دیوارهای کناری صاف و بدون اصطکاک است.

۳-۳- تولید امواج P و مسئله بازتاب امواج

مسئله دیگری که باید در مدل‌سازی محیط نیمه‌بی‌نهایت



شکل (۶): امواج منتشر شده در خاک تحت بارگذاری دینامیکی.

آورده شده است.

جدول (۲): ضرایب مقیاس (تبدیل مدل به نمونه واقعی) برای آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی [۲، ۴].

ضرایب مقیاس		نماد	پارامتر
آزمایش ساتر فیوژ Ng [۴]	آزمایش میز لرزان ۱g [۲]		
N	M	L	طول
۱	۱	ρ	چگالی
N^3	N^3	M	جرم
N	۱	A	شتاب
۱	$N^{1/2}$	V	سرعت
۱	$N^{1/2}$	σ	تنش
۱	۱	ε	کرنش
۱	N	G	مدول برشی
N^2	N^3	F	نیرو
N	$N^{1/2}$	T_s	زمان بارگذاری
N^2	$N^{1/2}$	T_c	زمان تحکیم
N	$N^{-1/2}$	f	فرکانس

۴- توسعه محفظه‌های مدل

اولین و در عین حال ساده‌ترین راه برای مدل‌سازی نمونه خاک برای انجام آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی بر روی میز لرزان، استفاده از محفظه با دیواره‌های ثابت و صلب برای نگهداری مدل خاک-سازه است. در شرایط واقعی و در محیط نیمه‌بی‌نهایت خاک، امواج با انتشار به محیط بی‌نهایت میرا می‌شوند. این در حالی است که در محفظه صلب^{۴۸}، به دلیل داشتن دیواره‌های انتهایی ثابت و صلب، امواج منتشر شده از کف نمونه پس از برخورد با دیوارها به داخل مدل باز می‌گردند و بر خلاف شرایط واقعی خاک، میرا نمی‌شوند. به عبارت دیگر، نمی‌توان میرایی تشعشعی واقعی در خاک را به درستی مدل کرد [۲۲]. این مسئله موجب انحراف نتایج آزمایش از واقعیت و عدم امکان شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد می‌شود. البته می‌توان برای کاهش اثرات بازتاب امواج، از مواد جاذب انرژی نظیر اسفنج در دیواره‌های انتهایی محفظه صلب استفاده نمود، لیکن برای مدل‌سازی مسائلی مانند روانگرایی و زمین لغزش که طی آن

حرکت ذرات خاک بر روی هم مرتبط است و بخشی از انرژی الاستیک امواج را به حرارت و صدا تبدیل می‌کند و (۲) میرایی تشعشعی^{۴۶} که مربوط به هندسه انتشار امواج است. با انتشار امواج، انرژی آنها به حجم بیشتری از خاک توزیع شده و از چگالی سطحی آنها کاسته می‌شود. این پدیده که به عنوان میرایی هندسی نیز شناخته شده است می‌تواند در غیاب میرایی ذاتی خاک رخ دهد.

۳-۴- آب‌بند بودن محفظه

در آزمایش‌هایی که خاک دارای شرایط اشباع است، محفظه خاک باید آب‌بند باشد. در صورت آب‌بند نبودن، با خروج آب از منافذ محفظه در حین تحریک، جریان هیدرولیکی غیر واقعی شکل خواهد گرفت که بر روی نتایج اصلی تأثیرگذار خواهد بود. برای ایجاد آب‌بندی در داخل محفظه، غالباً از یک غشاء از جنس لاتکس^{۴۷} و یا لاستیک با ضخامت‌های کم (حدوداً ۰/۲ الی ۲ میلی‌متر) استفاده می‌شود که مانع نشست آب و تماس مستقیم دانه‌های خاک با دیواره محفظه می‌شود.

۳-۵- قوانین تشابه

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی، غالباً مدل کوچک‌تر (مقیاس شده) از مدل واقعی مسئله به صورت فیزیکی ساخته می‌شود و در شرایط مورد نظر تحت آزمایش قرار می‌گیرد. از این رو، برای برقراری ارتباط میان پارامترهای اصلی مدل در آزمایش و نمونه واقعی، نیاز است از روابط مقیاس مناسب استفاده شود. این روابط مقیاس با توجه به شرایط آزمایش و غالباً با استفاده از قوانین ابعادی توسعه یافته‌اند. روابط مقیاس متعددی در ادبیات فنی برای تبدیل نتایج آزمایش در مقیاس مدل به نتایج واقعی توسط محققین ارائه شده‌اند. در این میان، روابط مقیاس ارائه شده توسط ایایی [۲] و ایایی و همکاران [۴]، به ترتیب برای آزمایش‌های میز لرزان ۱g و ساتر فیوژ Ng بیشتر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. ضرایب مقیاس پارامترهای مهم در حالت ۱g و Ng در جدول (۲)

ایواتات [۲۴] از محفظه منعطف در آزمایش‌های خود استفاده کردند. محفظه منعطف محفظه‌ای است که دیواره‌های انتهایی آن بر خلاف محفظه صلب، ثابت نبوده و سختی برشی دیواره‌ها متناسب با سختی برشی خاک مورد آزمایش تعیین شود تا خاک داخل آن بتواند در اثر موج ورودی به صورت آزادانه حرکت داشته باشد [۲۵]. محفظه ساخته شده توسط کوکاشو و ایواتات [۲۴] متشکل از مجموعه قاب‌های بر روی هم^{۵۵} بود که حدود ۱ متر عمق داشت و برای مدل‌سازی فیزیکی نمونه خاک مسطح از جنس ماسه خشک بر روی میز لرزان ۱g مورد استفاده قرار گرفت. آنها به جای استفاده از مواد جاذب انرژی نظیر اسفنج در دیواره‌های انتهایی محفظه صلب که تا آن زمان تنها راه‌حل عملی برای کاهش اثرات نامطلوب مرزهای ثابت بود، از نوع جدیدی از محفظه استفاده کردند که امکان حرکت جانبی به خاک را حین اعمال بارگذاری می‌داد. در واقع آنها از ایده اصلی دستگاه برش ساده در ساخت محفظه خود برای شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد استفاده کردند. محققین بعدی نیز از همین ایده برای طراحی محفظه‌های منعطف و بهره‌گیری از آن در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در حالت ۱g و Ng استفاده کردند، با این تفاوت که بین قاب‌های محفظه از مصالح کم‌اصطکاک نظیر تفلون استفاده کردند [۲۶-۲۸]؛ تا اینکه هوشمند و همکاران [۲۸] با اعمال تغییراتی در ساختار محفظه منعطف معرفی شده توسط محققین قبلی و افزایش ابعاد آن، برای اولین بار از اصطلاح «محفظة برشی لایه‌ای» استفاده کردند. آنها برای اولین بار از این نوع محفظه برای مطالعه پاسخ میدان آزاد خاک ماسه‌ای در دو حالت خشک و اشباع در دستگاه سانتریفیوژ استفاده کردند. یوشیکاوا و آرانو [۲۹] نیز برای اولین بار از محفظه برشی لایه‌ای برای مطالعه پدیده روانگرایی در آزمایش‌های ۱g استفاده کردند. از آن زمان به بعد، با گسترش نیاز به شبیه‌سازی واقعی‌تر پدیده‌هایی نظیر روانگرایی، زمین لغزش و اندرکنش سیستم‌های خاک-سازه در شرایط لرزه‌ای، طراحی و ساخت محفظه‌های برشی لایه‌ای برای آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در هر دو حالت ۱g و Ng به سرعت مورد

کرنش‌های بزرگ در خاک ایجاد می‌شود، این کار خطای زیادی به همراه خواهد داشت. همچنین وجود دیواره‌های صلب مانع ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در نمونه خاک داخل محفظه خواهد شد که با واقعیت تغییر شکل خاک تحت جنبش قوی زمین مغایرت دارد. در کل، استفاده از این نوع محفظه برای به دست آوردن دید کیفی و مقایسه‌ای در برخی مسائل ژئوتکنیکی کفایت می‌کند ولی در مواردی که کمیت پارامترهای مدل دارای اهمیت باشد و رفتار واقعی پدیده‌ها مدنظر باشد، استفاده از محفظه صلب مناسب نیست [۲۳].

با ساخت اولین محفظه مدل در دهه ۱۹۵۰ میلادی توسط اوکاموتو [۱۵] برای انجام آزمایش‌های میدان آزاد، مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک وارد عصر جدیدی شد. محفظه ساخته شده توسط اوکاموتو به صورت صلب بوده و دیواره‌های آن در حین اعمال بارگذاری دینامیکی حرکتی نداشته و امکان جابه‌جایی افقی به ستون خاک داخل خود را نمی‌داد. با رشد روز افزون آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در چند دهه اخیر، محققین مختلف همواره به دنبال ساخت محفظه‌هایی بوده‌اند که بتوان علاوه بر شبیه‌سازی حرکت ستون خاک و باز تولید شرایط تنش در واقعیت، شرایط مرزی مناسبی نیز داشته باشد. از این رو، علاوه بر انجام برخی اصلاحات بر روی محفظه صلب، انواع محفظه‌های مدل منعطف^{۴۹} (یا انعطاف‌پذیر) برای انجام مدل‌سازی فیزیکی ژئوتکنیکی با هدف به حداقل رساندن تأثیرات نامطلوب مرز صلب و ایجاد امکان حرکت لایه‌های خاک توسعه یافتند که عبارتند از [۱]: ۱) محفظه صلب با مرزهای منعطف^{۵۰}، ۲) محفظه صلب با دیواره‌های مفصلی^{۵۱}، ۳) محفظه تیر برشی معادل^{۵۲}، ۴) محفظه برشی لایه‌ای^{۵۳} و ۵) محفظه با مرزهای فعال^{۵۴}.

۵- محفظه برشی لایه‌ای

۵-۱- تاریخچه

برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی، به منظور کاهش اثرات نامطلوب شرایط مرزی محفظه‌های صلب، کوکاشو و

توجه پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفت.

خاک محدود گردد.

۳. با ایجاد سطوح زبر در کف محفظه و در دیواره‌های انتهایی به ترتیب امکان انتقال امواج به داخل توده خاک و تشکیل تنش‌های برشی مکمل در حین اعمال بارگذاری دینامیکی فراهم شود.

۴. سختی جانبی دیواره‌های انتهایی در برابر جابه‌جایی افقی خاک داخل آن حین اعمال بار دینامیکی حتی المقدور کم و نزدیک به صفر باشد. این کار با به حداقل رساندن اصطکاک میان لایه‌ها از طریق استفاده از سیستم لغزشی کم اصطکاک ممکن خواهد بود.

۵. دیواره‌های کناری محفظه بایستی به اندازه کافی صلب باشد که تغییر شکل عمود بر جهت اعمال لرزش (و یا عرضی) ناچیز باشد و شرایط کرنش جانبی صفر (شرایط سکون K_0) در خاک داخل محفظه در جهت عرضی برقرار باشد.

۶. برای جلوگیری از نشست آب و یا مایع اشباع کننده (در آزمایش‌های Ng) و همچنین جلوگیری از تماس مستقیم خاک با دیواره‌های محفظه، از یک غشاء با حداقل ضخامت ممکن در داخل محفظه استفاده شود. غشاء بایستی کشسان باشد و مقاومتی در برابر حرکت آزادانه خاک اعمال نکند.

محفظه‌های برشی لایه‌ای غالباً از فولاد، آلومینیوم و یا مصالح شفاف نظیر اکریلیک (و یا پلکسی گلاس)^{۵۸} با دو رویکرد متفاوت ساخته می‌شوند؛ در رویکرد اول که کاربرد بیشتری دارد، تمامی قاب‌ها بر روی هم قرار می‌گیرند و در میان آنها سیستم‌های غلتشی/لغزشی مختلف قرار می‌گیرد. در این حالت، وزن قاب‌های

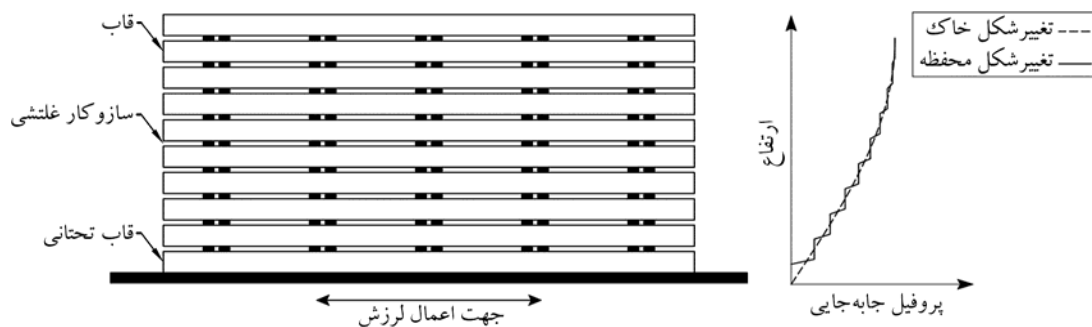
۵-۲- طرح و مشخصات فیزیکی

در روند معمول طراحی و ساخت محفظه برشی لایه‌ای، تعدادی قاب مطابق شکل (۷) بر روی هم قرار می‌گیرند و برای ایجاد امکان جابه‌جایی قاب‌ها^{۵۶} بر روی هم، سیستم‌های غلتشی^{۵۷} مختلف نظیر غلتک و یا بلبرینگ بین آنها قرار می‌گیرد. شکل اصلی این نوع محفظه‌ها غالباً مستطیلی است؛ اما در آزمایش‌هایی که میز لرزان امکان اعمال نیروی دینامیکی در دو جهت عمود بر هم (در صفحه افقی) را داشته باشد، هندسه محفظه‌ها به شکل مربع [۳۰]، دایره [۳۱] و یا چندضلعی منتظم [۳۲-۳۳] طراحی می‌شوند.

یک محفظه برشی لایه‌ای ایده‌آل برای شبیه‌سازی شرایط واقعی خاک حین اعمال بارگذاری لرزه‌ای بایستی دارای ویژگی‌هایی باشد که ویتمن و لمب [۲۱] آن را به شرح زیر توصیف می‌کنند:

۱. وزن محفظه بایستی تا حد امکان کم باشد تا به واسطه وزن لایه‌ها، نیروی اینرسی قابل توجهی در حین لرزش افقی به لایه خاک داخل محفظه اعمال نشود و جابه‌جایی و تغییر شکل خاک تحت نیروی اینرسی خود توده خاک دیکته شود.

۲. محفظه باید به گونه‌ای طراحی و ساخته شود که در حین لرزش افقی قادر به حفظ مقاطع عرضی بدون اعوجاج باشد. به عبارت دیگر، جابه‌جایی ستون خاک درون آن بایستی به صورت برشی باشد و تغییر شکل‌های خمشی در ستون



شکل (۷): شماتیک محفظه برشی لایه‌ای [۱۱].

دارای پلان مستطیل شکل هستند. محفظه‌های یک جهت برای شبیه‌سازی دینامیکی حرکت ستون خاک تحت بارگذاری افقی یک‌بعدی طراحی و ساخته شدند و تنها در جهت اعمال بار (طولی) اجازه تغییر شکل را به خاک داخل آن می‌دهند. برای مدل‌سازی واقعی‌تر حرکت ستون خاک در دو بعد تحت بارگذاری دو جهت افقی، محفظه‌های برشی لایه‌ای دو جهت توسعه یافتند. پلان این محفظه‌ها منظم و غالباً به شکل مربع [۳۰]، دایره [۳۱]، هشت‌ضلعی منتظم [۳۲] و یا دوازده ضلعی منتظم [۳۳] طراحی می‌شوند. اندو و کومانوبو [۳۴] برای اولین بار از محفظه برشی لایه‌ای دو جهت برای بررسی پدیده روانگرایی استفاده کردند. در داخل کشور نیز تنها یک محفظه برشی لایه‌ای دو جهت در دانشگاه صنعتی شریف توسط جعفرزاده [۳۰] طراحی و ساخته شده است.

برای شبیه‌سازی مناسب حرکت ستون خاک تحت بارگذاری دو جهت، محفظه‌های برشی لایه‌ای بایستی دو شرط اصلی را تأمین نمایند: ۱) قاب‌های محفظه بایستی امکان جابه‌جایی آزادانه بر روی هم را داشته باشند و در عین حال از سختی کافی برای جلوگیری از ایجاد تغییر شکل‌های جانبی غیر مجاز در حین لرزش و حفظ شرایط سکون (یا شرایط K_0) برخوردار باشند و ۲) برای جلوگیری از ایجاد لنگرهای پیچشی در صفحات افقی، حداکثر جابه‌جایی نسبی قاب‌های محفظه بایستی در هر دو جهت محدود شود. در حالت تحریک دو بعدی، مرکز جرم ستون خاک به صورت مداوم در حال تغییر است. تغییر محل مرکز جرم ستون خاک موجب به وجود آمدن خروج از مرکزیت بارگذاری خواهد شد و بدین ترتیب لنگرهای پیچشی در صفحات افقی لایه‌های خاک ایجاد می‌شود. با ترکیب لنگر پیچشی به وجود آمده در یک جهت، با لنگر پیچشی به وجود آمده در جهت دیگر، اثرات ناخواسته پیچشی در ستون خاک بیشتر می‌شود. اگر مقدار جابه‌جایی لایه‌های محفظه در هر دو جهت محدود نشود، با افزایش مقدار خروج از مرکزیت بار، اثرات ناخواسته پیچشی افزایش یافته و موجب انحراف میدان تنش - کرنش نمونه از حالت واقعی خواهد شد [۳۵].

بالایی محفظه به قاب‌های پایین‌تر انتقال می‌یابد و در نهایت وزن کل محفظه به همراه مدل خاک داخل آن به میز لرزان منتقل می‌شود. این مسئله موجب می‌شود که در هنگام اعمال بارگذاری دینامیکی، نیروی اینرسی لایه‌ها به واسطه وزنشان به مدل خاک اعمال شود و خاک دیگر تحت نیروی اینرسی خالص ناشی از وزن خود نباشد. به علاوه، به دلیل انباشت تجمعی وزن لایه‌ها از بالا به پایین، نیروی اصطکاک لایه‌ها در برابر حرکت به دلیل تفاوت در نیروی عکس‌العمل سطح (N) آنها متفاوت است. البته این موضوع نکته منفی محسوب نخواهد شد زیرا با ذات تغییر شکل برشی توده خاک در واقعیت در هنگام لرزش سازگار است.

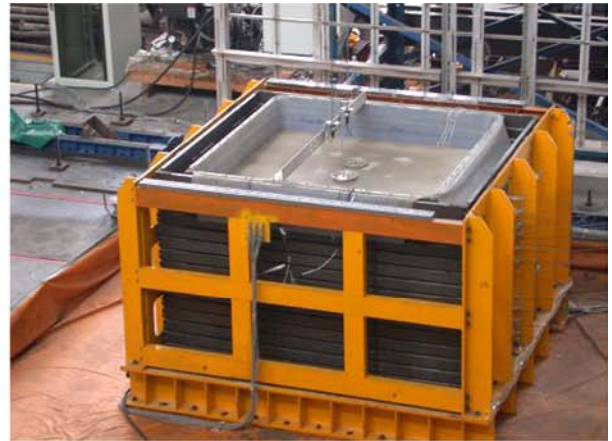
در آزمایش‌هایی که ظرفیت میز لرزان^{۵۹} محدود باشد، وزن مجموعه محفظه و خاک داخل آن بایستی از مقدار ظرفیت مجاز میز فراتر نرود. این محدودیت وزنی میز لرزان بر روی اندازه مدلی که قرار است بر روی آن ساخته شود تأثیرگذار بوده و در نهایت منجر به ساخت مدل‌های خاک - سازه با مقیاس کوچک‌تر می‌شود که می‌تواند در مقایسه با مدل‌های مشابه بزرگ‌تر دقت نتایج کمتری داشته باشد. در رویکرد دوم که برای به حداقل رساندن اثرات منفی رویکرد اول توسعه یافت، هر یک از لایه‌های محفظه به صورت مستقل به یک قاب خارجی متصل می‌شوند و در نهایت وزن آن‌ها بر روی میز لرزان قرار نمی‌گیرد [۳۵-۳۶]. در این حالت وزن لایه‌های بالایی محفظه به صورت تجمعی به لایه‌های پایین‌تر اعمال نمی‌شود و در نتیجه نیروی اصطکاک لایه‌ها یکنواخت است [۳۶]. همچنین می‌توان با ایزوله کردن پایین‌ترین قاب محفظه از میز لرزان و اتصال آن به قاب خارجی، مانع از اعمال وزن محفظه و خاک داخل آن به میز لرزان شد. برخی از محفظه‌های برشی لایه‌ای شاخص موجود در ادبیات فنی در شکل (۸) نشان داده شده است.

۵-۳- محفظه‌های برشی لایه‌ای دو جهت

در ادبیات فنی، اکثر محفظه‌های برشی لایه‌ای که در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی استفاده می‌شود، یک جهت و



(ب) محفظه دانشگاه کالیفرنیا سن دیگو (UCSD)



(الف) محفظه دو جهته مرکز NCREE تایوان



(ث) محفظه دانشگاه بوفالو (University of Buffalo)



(پ) محفظه دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (Penn State)



(ت) محفظه دانشگاه کمبریج انگلستان

شکل (۸): مثال‌هایی از محفظه برشی لایه‌ای.

۵-۴- شرایط مرزی محفظه

بوده است. هیچ‌کدام از محفظه‌های مدل توسعه یافته قادر به شبیه‌سازی کامل شرایط مرزی واقعی خاک نیستند. از این‌رو، اثرات نامطلوب شرایط مرزی بر نتایج آزمایش‌ها تقریباً امری اجتناب‌ناپذیر است. همان‌طور پیش‌تر بیان شد، محفظه صلب به

بازتولید کامل شرایط مرزی خاک در ابعاد محدود محفظه مطابق معیارهایی که توسط ویتمن و لمب [۲۱] ارائه شد، همواره یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و ساخت محفظه‌های مدل

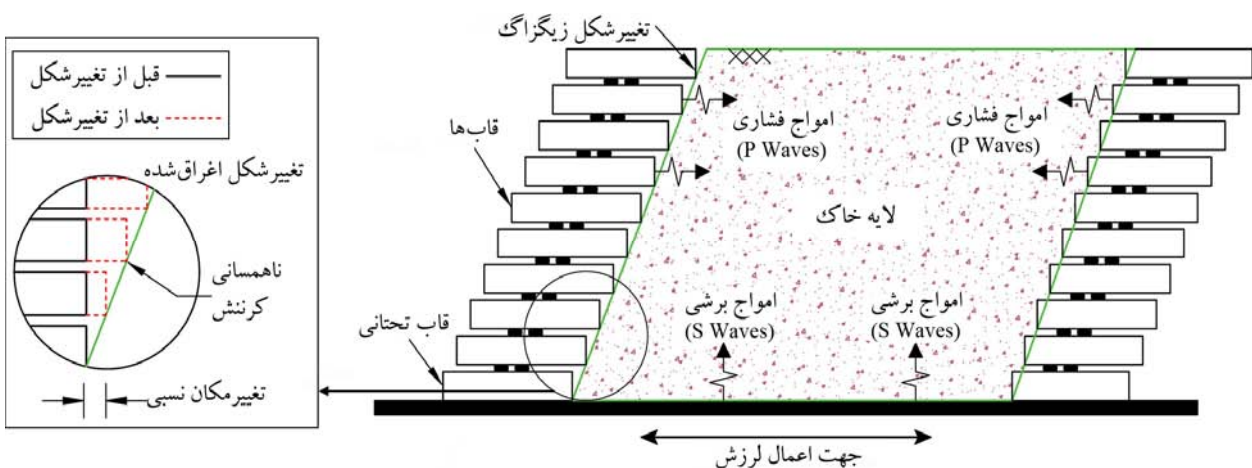
نزدیک مرز با مقادیر اندازه‌گیری شده در وسط نمونه خاک، جایی که تقریباً امواج P بازگشتی مستهلک شده است و ناسازگاری کرنش وجود ندارد، امکان‌پذیر است [۴۰]. البته شدت اثرات با افزایش شدت تحریک ورودی و ارتفاع قاب‌های محفظه رابطه مستقیم دارد. از این رو، طراحی بهینه برای به حداقل رساندن ارتفاع قاب‌های محفظه در طراحی محفظه‌های کوچک مقیاس آن بسیار حائز اهمیت است.

۵-۵- روابط اصلاحی شرایط مرزی محفظه

در چند دهه اخیر، محققین مختلف در تلاش بودند اثرات نامطلوب مرزی را در صورت امکان به نحوی کاهش دهند و یا با بهره‌گیری از روش‌های مختلف، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها را اصلاح نمایند. یکی از راهکارهای کاربردی، مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در محیط $1g$ و یا Ng بر روی میز لرزان، با روابط و مقادیر تجربی به‌دست آمده از رخدادهای واقعی زلزله است [۴۱]. این راهکار برای بررسی پاسخ (۱) میدان آزاد خاک [۳۹] و (۲) پی سطحی بر روی خاک در دو حالت خشک و اشباع [۱۹] مورد استفاده قرار گرفته است. راهکار دیگری که توسط تسای و همکاران [۴۲] برای اصلاح اثرات مرزی ارائه شد، استفاده از عملیات محاسبات برگشتی^{۶۳} برای محاسبه سرعت موج برشی خاک (V_s) از روی تعادل نیروی برشی و سازگاری کرنش در نمونه خاک است. برای این کار، آنها در

دلیل داشتن دیواره‌های انتهایی ثابت و صلب، امواج منتشر شده از کف نمونه پس از برخورد با دیوارها به داخل مدل باز می‌گردند و بر خلاف شرایط واقعی خاک، میرا نمی‌شوند. به علاوه، با برخورد امواج S به مرزهای محفظه، خاک کنار مرزها تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد و در نتیجه امواج بازگشتی به داخل نمونه از نوع P خواهند بود و پاسخ مدل تحت تأثیر اندرکنش میان امواج P و S قرار گیرد. این مسئله در محفظه برشی لایه‌ای نیز وجود دارد؛ با برخورد امواج S به مرزهای محفظه برشی لایه‌ای، بخشی از انرژی امواج صرف به حرکت درآوردن قاب‌های محفظه شده و مقداری از آن نیز به صورت امواج P به داخل نمونه خاک برمی‌گردد [۳۷]. هرچند مقدار بازگشت امواج به داخل نمونه در محفظه برشی لایه‌ای در مقایسه با محفظه صلب ناچیز است، لیکن بازگشت امواج به داخل محفظه موجب انحراف نتایج آزمایش از واقعیت می‌شود [۳۸].

علاوه بر مسئله بازگشت امواج به داخل نمونه، ناسازگاری جابه‌جایی^{۶۰} میان لایه خاک و قاب مجاور آن و ناهمسانی کرنش^{۶۱} در داخل محفظه برشی لایه‌ای، یکی دیگر از مسائل مهمی است که به واسطه شرایط مرزی محفظه ایجاد می‌شود [۳۹]. همان‌طور که در شکل (۹) نمایان است، جابه‌جایی لایه‌های محفظه برشی لایه‌ای به صورت دندان‌های^{۶۲} بوده و با تغییر شکل پیوسته ستون خاک ناسازگار است. در محفظه‌های برشی لایه‌ای بزرگ مقیاس، اندازه‌گیری این اثرات از طریق مقایسه نتایج شتاب



شکل (۹): ناسازگاری جابه‌جایی (ناهمسانی کرنش) بین دیواره‌های انتهایی محفظه برشی لایه‌ای و خاک داخل آن در حین لرزش افقی [۴۰].

که در این رابطه، C ضریب افزایشی برای اصلاح اثر اینرسی ناشی از وزن محفظه است که با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$C = 1 + \frac{\text{وزن محفظه}}{\text{وزن خاک}} = 1 + \frac{W_{\text{Box}}}{(L \times B \times H)_{\text{Box}} \times \gamma_t} \quad (5)$$

LL ، BB و HH به ترتیب طول، عرض و ارتفاع محفظه هستند. γ_t وزن مخصوص واقعی خاک در شرایط آزمایش و W_{Box} وزن کل محفظه در حالت خالی است. محققین دیگر نیز روابطی برای اصلاح اثر اینرسی محفظه بر روی نتایج شتاب به دست آمده از آزمایش ارائه کردند. مطابق رابطه (۶)، شتاب‌های به دست آمده در نقاط مختلف نمونه خاک با استفاده از ضریب اصلاحی C به شتاب اصلاح شده تبدیل می‌شود [۴۵-۴۷]:

$$a_m = Ca \quad (6)$$

در رابطه (۶)، C ضریب اصلاحی اثر اینرسی ناشی از وزن محفظه است که از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$C = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، m_1 و m_2 به ترتیب جرم محفظه خالی و جرم خالص توده خاک درون آن است. در پژوهش دیگری که توسط لی و همکاران [۴۸] انجام شد، روشی برای تعیین دقیق اثرات مرزی محفظه برشی لایه‌ای ارائه شد. در این روش، یک ضریب خطای شتاب R مطابق رابطه (۸) تعریف شد که با آن شدت اثرات مرزی محفظه قابل اندازه‌گیری بود.

$$R = \left| \frac{A_i - A_0}{A_0} \right| \times 100\% \quad (8)$$

در رابطه (۸)، R ضریب خطای شتاب، A_0 شتاب ورودی به مدل و A_i شتاب ثبت شده در نقطه i نمونه خاک تحت آزمایش میدان آزاد است. آنها همچنین گزارش کردند که مقایسه پارامتر شتاب مطابق رابطه (۸) نمی‌تواند به تنهایی شدت اثرات مرزی را به صورت کامل تعیین کند. از این رو، شاخص دیگری تحت عنوان شاخص اثرات مرزی (K) را به صورت نسبتی از

آزمایش‌های مدل‌سازی خود در دستگاه سانتریفیوژ، قسمتی از محفظه (۲۰ درصد) را خالی گذاشتند و شتاب و سرعت موج برشی معادل خاک را با فرض یک سیستم مرکب متشکل از دو مصالح خاک و هوا محاسبه کردند. در مطالعه دیگری، سگالین و همکاران [۳۷] با استفاده از تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) اثرات مرزی محفظه برشی لایه‌ای شفاف خود را در آزمایش‌های $1g$ بر روی ماسه خشک بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که ناسازگاری جابه‌جایی در نزدیک مرز به واسطه‌ی: (۱) عدم تشابه حرکت دندانه‌ای محفظه با خاک داخل آن و (۲) بازگشت امواج به داخل نمونه، با فاصله گرفتن از مرز کاهش یافته و این اثرات در وسط نمونه ناچیز است. از این رو، نتایج به دست آمده در وسط نمونه نیاز به اصلاح ندارد.

مسئله مهم دیگری که در ارتباط با شرایط مرزی باید در نظر گرفت، بحث اثرات وزن خود محفظه است. یک محفظه ایده‌آل بایستی بدون وزن باشد که نیروی اینرسی اضافی به توده خاک داخل آن حین بارگذاری دینامیکی اعمال نکند؛ هرچند در عمل، ساخت محفظه‌های مدل بی وزن امکان‌پذیر نیست. در محفظه‌هایی که نسبت وزنی محفظه به خاک کوچک باشد، می‌توان از اثرات نامطلوب وزن محفظه بر حرکت توده خاک چشم‌پوشی کرد. در محفظه‌های بزرگ مقیاس که برای ایجاد صلبیت جانبی کافی در برابر بار خاک و حفظ شرایط سکون در جهت عرضی، به ناچار از مصالح با چگالی زیاد نظیر فولاد برای ساخت استفاده می‌شود، نمی‌توان از وزن قابل توجه محفظه چشم‌پوشی کرد [۴۳]. لذا اثرات نامطلوب وزن محفظه بر نتایج آزمایش همواره مسئله‌ای اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، پژوهشگران با لحاظ اهمیت اثر وزن بر نتایج، در تلاش بودند که با روش‌هایی اثر وزن محفظه در نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها را اصلاح کنند. ون لاک و همکاران [۴۴] برای اصلاح اثر اینرسی ناشی از وزن محفظه، پیشنهاد کردند به جای استفاده از چگالی واقعی خاک در محاسبات، از مقدار افزایش یافته آن مطابق رابطه (۴) استفاده شود:

$$\gamma_{\text{eff}} = C\gamma_t \quad (4)$$

بر پاسخ میدان آزاد خاک را بررسی کردند. در این مطالعه، محفظه صلب، محفظه برشی لایه‌ای و محفظه صلب با مرز پوشیده شده با سه ضخامت مختلف اسفنج (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر)، تحت بارگذاری هارمونیک با یکدیگر مقایسه شدند. بر خلاف محفظه صلب و محفظه صلب با مرزهای منعطف، نتایج شتاب به‌دست آمده در وسط نمونه و نزدیک مرز برای محفظه برشی لایه‌ای نزدیک به هم بود که نشانگر اثرات مرزی کمتر محفظه برشی لایه‌ای است.

۵-۶- محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در کشور

با رشد روز افزون آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک در دنیا و استفاده از انواع محفظه‌های مدل برای شبیه‌سازی سیستم‌های خاک-سازه، پژوهشگران داخلی نیز در دو دهه اخیر اقدام به طراحی و ساخت انواع محفظه‌ها در داخل کشور کردند. محفظه‌های ساخته شده در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی داخلی غالباً از دو نوع محفظه صلب و یا محفظه برشی لایه‌ای بوده است. این محفظه‌ها اکثراً به‌صورت مستطیلی و یک جهته بوده و تنها محفظه کوچک مقیاس ساخته شده در دانشگاه صنعتی شریف به‌صورت مربعی و دو جهته است [۳۰]. به علاوه، تمامی محفظه‌ها برای آزمایش‌های ۱g بر روی میز لرزان ساخته شده‌اند. لیکن اخیراً در دانشگاه تهران یک محفظه برشی لایه‌ای برای استفاده در دستگاه ساترنیفریوژ ساخته شده که متأسفانه در زمان نگارش این مقاله، اطلاعاتی از مشخصات آن در دسترس نیست. شکل (۱۰) محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در کشور را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات کامل محفظه‌ها در جدول (۳) قابل مشاهده است.

در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله دو محفظه برشی لایه‌ای یک جهته با اندازه‌های مختلف برای آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی ۱g ساخته شده است [۵۷-۵۸]. محفظه برشی لایه‌ای کوچک مقیاس شفاف از جنس اکریلیک (پلکسی گلاس) و برای آزمایش بر روی میز لرزان متوسط مقیاس آزمایشگاه سازه پژوهشگاه ساخته شده است. یک محفظه برشی

مقدار انحراف استاندارد دو شتاب ورودی و شتاب نقطه \ddot{a}_i ، به شتاب مرکز مدل خاک، مطابق رابطه (۹) تعریف کردند:

$$K = \frac{V_{ab}}{A_{center}} \times 100\% \quad (9)$$

در رابطه (۹)، V_{ab} مقدار انحراف استاندارد دو شتاب ورودی و شتاب نقطه \ddot{a}_i است و مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

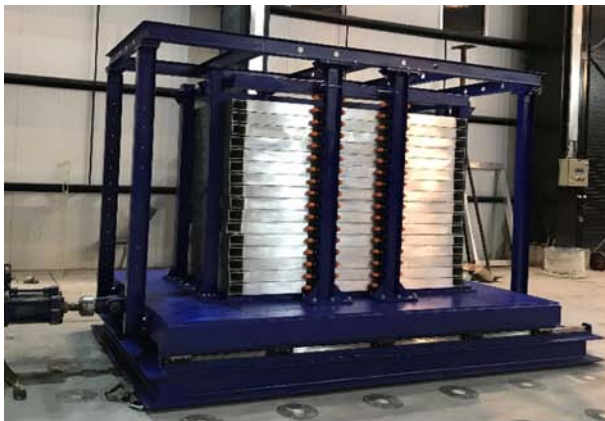
$$V_{ab} = \sqrt{\frac{\sum (a_i - b_i)^2}{n-1}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، a_i شتاب نقطه مرکز نمونه از نظر ارتفاع و b_i شتاب نقطه هم ارتفاع با نقطه \ddot{a}_i ولی نزدیک به مرزهای محفظه است. n هم تعداد نقاطی است که شتاب آنها برای اندازه‌گیری اثرات مرزی ثبت شده و مورد استفاده قرار گرفته است. هرچه مقدار V_{ab} بیشتر باشد، اختلاف میان شتاب‌های ثبت شده بیشتر بوده و در نتیجه شدت اثرات مرزی محفظه بیشتر است.

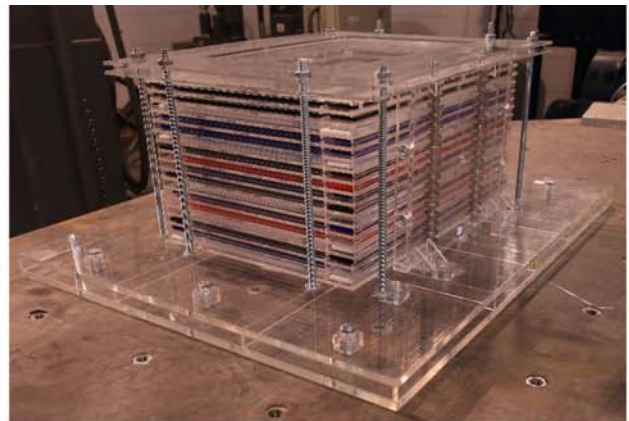
مقایسه عملکرد محفظه‌های مختلف در مدل‌سازی نمونه خاک خشک و اشباع تحت بارگذاری لرزه‌ای و بررسی عملکرد آنها اطلاعات مفیدی در زمینه شرایط مرزی در اختیار محققین قرار می‌دهد. در این راستا، پژوهشگران مختلف عملکرد انواع محفظه‌های مدل در شبیه‌سازی ستون خاک تحت شرایط مختلف را با هم مقایسه کردند. گرتاس [۴۹]، تیلور و همکاران [۵۰]، پییلاکس و همکاران [۵۱]، تانگ و همکاران [۵۲]، تسای و همکاران [۵۳]، طباطبایی فر [۵۴]، و ویوک و رایچودوری [۵۵] با بررسی شرایط مرزی و مقایسه عملکرد محفظه برشی لایه‌ای با سایر محفظه‌های مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی خاک حین لرزش به این نتیجه رسیدند که محفظه برشی لایه‌ای کمترین میزان اثرات مرزی را به نمونه خاک داخل آن اعمال می‌کند. همچنین محفظه برشی لایه‌ای در مدل‌سازی شرایط تنش-کرنش در حین اعمال بارگذاری لرزه‌ای بهترین عملکرد را در میان سایر محفظه‌ها دارد. در مطالعه دیگری، کیم و همکاران [۵۶] با استفاده از آزمایش‌های میز لرزان ۱g، اثرات مرزی سه نوع محفظه مختلف

شتاب در هر دو حالت خشک و اشباع اندک و قابل صرف نظر کردن است و در مجموع محفظه ساخته شده عملکرد خوبی در مدل‌سازی شرایط میدان آزاد دارد [۱۹]. این در حالی است که محفظه بزرگ مقیاس آلومینیومی به دلیل عدم اتمام راه‌اندازی آزمایشگاه پیشرفته مهندسی زلزله، مورد آزمایش قرار نگرفته است.

لایه‌ای بزرگ مقیاس آلومینیومی نیز برای شبیه‌سازی مدل‌های بزرگ تر خاک-سازه ساخته شده و در آزمایشگاه پیشرفته مهندسی زلزله واقع در سوهانک نصب شده است. سازندگان محفظه برشی لایه‌ای کوچک مقیاس در پژوهشی، اثرات مرزی محفظه بر روی نتایج آزمایش‌های میدان آزاد را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که اثرات مرزی محفظه بر روی نتایج



(ب) محفظه بزرگ مقیاس پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [۵۳]



(الف) محفظه کوچک مقیاس پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [۱۹]



(ت) محفظه کوچک مقیاس دانشگاه گیلان [۶۰]



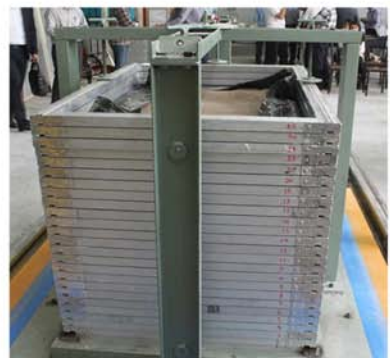
(پ) محفظه بزرگ مقیاس دانشگاه صنعتی شریف [۴۳]



(ج) محفظه کوچک مقیاس دانشگاه تهران
برای دستگاه سانتریفیوژ



(ج) محفظه کوچک مقیاس
دانشگاه صنعتی شریف [۳۰]



(ث) محفظه دانشگاه تبریز [۵۹]

شکل (۱۰): محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در کشور.

جدول (۳): محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در کشور.

مرجع	نکات طراحی	۱g/Ng	ارتفاع×عرض×طول (میلی‌متر)	نوع	شکل	دانشگاه/مؤسسه
جعفریان و همکاران [۱۹]	محفظه متشکل از ۱۸ قاب ساخته شده از مصالح شفاف اکریلیک (پلکسی گلاس) است که به فواصل ۴ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته‌اند. برای ایجاد سهولت جابه‌جایی میان قاب‌ها از ۴۰ عدد غلتک با قطر ۱۰ میلی‌متر از پلکسی گلاس استفاده شده است. جابه‌جایی افقی نسبی میان قاب‌ها به ۸ میلی‌متر محدود شده است. وزن محفظه در حالت خالی ۱۵/۶ کیلوگرم و نسبت وزنی محفظه به خاک برابر با ۰/۲۴ است.	۱g	۳۶۵×۲۴۳×۲۶۳	یک جهته	مستطیلی	پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
اسمعیل پور و جعفریان [۵۷]	محفظه متشکل از ۱۷ قاب ساخته شده از پروفیل‌های آلومینیوم H- شکل نورد شده است که به فواصل ۴ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته‌اند. برای ایجاد سهولت جابه‌جایی میان قاب‌ها از ۴۸ عدد غلتک با قطر ۲۰ میلی‌متر از جنس فولاد ضد زنگ استفاده شده است. جابه‌جایی افقی نسبی میان قاب‌ها به ۲۸ میلی‌متر محدود شده است. وزن محفظه در حالت خالی ۶۱۵ کیلوگرم و نسبت وزنی محفظه به خاک برابر با ۰/۱۱ است.	۱g	۱۸۰۰×۹۰۰×۱۵۷۷	یک جهته	مستطیلی	پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
حائری و همکاران [۴۳]	محفظه متشکل از ۲۳ قاب فولادی از نوع IPE140 با ابعاد خارجی ۲۰۰×۳۳۴۰ میلی‌متر است. برای ایجاد امکان حرکت از سیستم لغزشی بلبرینگ میان قاب‌ها استفاده شده است.	۱g	۳۰۶۰×۱۷۲۰×۱۸۰۰	یک جهته	مستطیلی	دانشگاه صنعتی شریف
جعفرزاده [۳۰]	محفظه متشکل از ۲۴ قاب ساخته شده از پروفیل‌های قوطی مربعی از جنس آلومینیوم با ابعاد ۴۰×۴۰ میلی‌متر است که به فواصل ۳ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته‌اند. برای ایجاد سهولت جابه‌جایی قاب‌ها در هر دو جهت، از هشت بالشتک غلتان به قطر ۱۶ میلی‌متر بین هر دو قاب استفاده شده است. جابه‌جایی حداکثر محفظه در هر دو جهت به ۱۵۰ میلی‌متر محدود شده است.	۱g	۱۰۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰	دو جهته	مربعی	دانشگاه صنعتی شریف
فرین و حاجی علیلوی بناب [۵۹]	محفظه متشکل از ۲۵ قاب ساخته شده از جنس آلومینیوم با ارتفاع ۳۸ میلی‌متر است که به فواصل ۴ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته‌اند. برای ایجاد سهولت جابه‌جایی قاب‌ها در هر دو جهت، از ساچمه‌های فلزی استفاده شده است. جابه‌جایی حداکثر محفظه در هر دو جهت به ۱۵۰ میلی‌متر محدود شده است.	۱g	۱۳۲۰×۸۱۴×۸۶۰	یک جهته	مستطیلی	دانشگاه تبریز
فتحی و همکاران [۶۰]	محفظه متشکل از ۱۵ قاب ساخته شده از جنس پروفیل آلومینیوم با ابعاد ۳۰×۶۰ میلی‌متر است که به فواصل ۳ میلی‌متر بر روی هم قرار گرفته‌اند. برای ایجاد سهولت جابه‌جایی قاب‌ها از غلتک استفاده شده است.	۱g	۵۰۰×۷۰۰×۱۰۰۰	یک جهته	مستطیلی	دانشگاه گیلان

به‌دست آمده از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی و کاهش اثرات نامطلوب مرزی محفظه وجود دارد. در انتها، محفظه‌های برشی لایه‌ای ساخته شده در مراکز معتبر پژوهشی داخل کشور که در ادبیات فنی موجود هستند به همراه مشخصات اصلی از جمله ویژگی‌های مدل‌سازی، جزئیات طراحی و شرایط مرزی به تفصیل در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

مراجع

1. Fardis, M.N. and Rakicevic, Z.T. (Eds.) (2011) *Role of Seismic Testing Facilities in Performance-Based Earthquake Engineering: SERIES Workshop*, 22, Springer Science and Business Media. ISBN: 978-94-007-1977-4.
2. Iai, S. (1989) Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, 29(1), 105-118, <https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.15>.
3. Meymand, P.J. (1998) *Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Super-Structure Interaction in Soft Clay*. Ph.D. Dissertation, University of California Berkeley, California, USA.
4. Iai, S., Tobita, T., and Nakahara, T. (2005) Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Géotechnique*, 55(5), 355-362, <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.5.355>.
5. Wartman, J. (2006) Geotechnical physical modeling for education: Learning theory approach. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 132(4), 288-296, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1052-3928\(2006\)132:4\(288\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1052-3928(2006)132:4(288)).
6. Addis B., Kurrer K.E., and Lorenz W. (2020) *Physical Models: Their Historical and Current Use in Civil and Building Engineering Design*. John Wiley and Sons, ISBN: 978-3-433-03257-2.
7. Addis, B. (2020) Past, current and future use of physical models in civil engineering design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 174(2), 61-70, <https://doi.org/10.1680/jcien.20.00028>.
8. Taylor, R.E. (Ed.) (2018) *Geotechnical Centrifuge Technology*. CRC Press, London. ISBN: 9780367863852.

متأسفانه نتایج آزمایشگاهی اثرات مرزی سایر محفظه‌های برشی ساخته شده در کشور تا به حال منتشر نشده است که بتوان در مورد عملکرد آنها قضاوت صحیحی داشت. بدیهی است فارغ از بررسی عملکرد سیستم‌های لغزشی/غلثشی به کار رفته در محفظه‌ها، ابعاد محفظه می‌تواند در نیل به نتایج دقیق‌تر بسیار کاربردی باشد. هرچقدر ابعاد محفظه بزرگ‌تر باشد، مدل‌های خاک-سازه با اندازه بزرگ‌تری را می‌توان مدل کرد و نتایج بهتری حاصل می‌گردد. البته بایستی توجه داشت که هزینه ساخت محفظه‌های بزرگ‌مقیاس بالا بوده و برای انجام آزمایش مدل با آن لازم است میز لرزان بزرگ‌مقیاس با ظرفیت مناسب و تجهیزات جانبی دیگر وجود داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه مروری حاضر، ابتدا تاریخچه مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک مورد بررسی قرار گرفت. سپس روند توسعه انواع محفظه‌های مدل به‌طور جامع تشریح شد. در میان محفظه‌های ساخته شده در ادبیات فنی، محفظه برشی لایه‌ای به دلیل دقت مناسب در مدل‌سازی شرایط مرزی ستون خاک، توانایی شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد خاک و ایجاد امکان حرکت آزادانه ستون خاک بدون اعمال اصطکاک قابل توجه، به پرکاربردترین نوع محفظه در چند دهه اخیر تبدیل شده است. هرچند شبیه‌سازی شرایط ایده‌آل خاک تحت بارگذاری دینامیکی به‌صورت کامل امکان‌پذیر نیست، لیکن بررسی پژوهش‌های موجود در ادبیات فنی حاکی از دقت قابل قبول نتایج آزمایش‌های میز لرزان در هر دو حالت $1g$ و Ng با استفاده از محفظه برشی لایه‌ای است. از این‌رو، با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف، برای دستیابی به نتایج مطلوب با کم‌ترین میزان خطا، استفاده از محفظه برشی لایه‌ای در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی در هر دو حالت $1g$ و Ng توصیه می‌گردد. البته قابل ذکر است وجود اثرات مرزی محفظه امری اجتناب‌ناپذیر است؛ لیکن با بهره‌گیری از روش‌های پیشنهادی و روابط اصلاحی ارائه شده، امکان اصلاح نتایج

- 60(4), 989-1000, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.001>.
18. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. ISBN-13: 978-0133749434.
 19. Jafarian, Y., Esmailpour, P., Shojaemehr, S., Taghavizade, H., Rouhi, S., and McCartney, J.S. (2021) Impacts of fixed-end and flexible boundary conditions on seismic response of shallow foundations on saturated sand in 1g shaking table tests. *Geotechnical Testing Journal*, **44**(3), 637-664, <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00485-4>.
 20. Zeng, X. and Schofield, A.N. (1996) Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modelling. *Géotechnique*, **46**(1), 83-102, <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.1.83>.
 21. Whitman, R.V. and Lambe, P.C. (1986) Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation. *Geotechnical Testing Journal*, **9**(2), 61-71, <https://doi.org/10.1520/GTJ11031J>.
 22. Fishman, K.L., Mander, J.B., and Richards Jr, R. (1995) Laboratory study of seismic free-field response of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **14**(1), 33-43, [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)00017-B](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)00017-B).
 23. Jakrapiyanun, W. (2002) *Physical Modeling of Dynamics Soil-Foundation- Structure-Interaction Using a Laminar Container*. Ph.D. Dissertation, University of California San Diego, California, USA.
 24. Kokusho, T. and Iwatate, T. (1979) Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft grounds. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, **1979**(285), 57-67, https://doi.org/10.2208/jscej1969.1979.285_57.
 25. Lambe, P.C. (1981) *Dynamic Centrifuge Modeling of a Horizontal Sand Stratum*. ScD thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA.
 26. Whitman, R.V., Lambe, P.C., and Kutter, B.L. (1981) Initial results from a stacked ring apparatus for simulation of a soil profile. *Proceeding of 1st*
 9. Jafarian, Y., Taghavizade, H., Rouhi, S., Shojaemehr, S., and Esmailpour, P. (2020) Shaking table experiments to evaluate the boundary effects on seismic response of saturated and dry sands in level ground condition. *International Journal of Civil Engineering*, **18**(7), 783-795, <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00485-4>.
 10. Severn, R.T. (2011) The development of shaking tables—a historical note. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**(2), 195-213, <https://doi.org/10.1002/eqe.1015>.
 11. Esmailpour, P. (2018) *Seismic Behavior of Shallow Foundations on Saturated Loose Sand and Rehabilitation Using Helical Piles: 1g Physical Modeling in Laminar Shear Container*. Ph.D. Dissertation, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran (in Persian).
 12. Pokrovskii, G.I. and Fiodorov, I.S. (1936) Studies of soil pressures and deformations by means of a centrifuge. *Proceeding of 1st International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, p. 70.
 13. Kimura, T. (1988) *Centrifuge Research Activities in Japan*. Centrifuges in Soil Mechanics, Craig, W.H. James, R.G. and Schofield A.N. (Ed.) Balkema, Rotterdam, 19-28.
 14. Craig, W.H. (1989) The use of a centrifuge in geotechnical engineering education. *Geotechnical Testing Journal*, **12**, 288-291, <https://doi.org/10.1520/GTJ10986J>.
 15. Okamoto, S. (1956) Bearing capacity of sandy soil and lateral earth pressure during earthquake. *Proceeding of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*, California, USA, 1-26.
 16. Drosos, V.A., Gerolymos, N., and Gazetas, G. (2012) Constitutive model for soil amplification of ground shaking: Parameter calibration, comparisons, validation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **42**, 255-274, <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.003>.
 17. Giridharan, S., Gowda, S., Stolle, D.F., and Moormann, C. (2020) Comparison of UBCSAND and hypoplastic soil model predictions using the material point method. *Soils and Foundations*,

- Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Japan, 675-681.
35. Ueng, T.S., Wang, M.H., Chen, M.H., Chen, C.H., and Peng, L.H. (2006) A large biaxial shear box for shaking table test on saturated sand. *Geotechnical Testing Journal*, **29**(1), 1-8, <https://doi.org/10.1520/GTJ12649>.
 36. Turan, A., Hinchberger, S.D., and El Naggar, H. (2009) Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(2), 404-414, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.04.003>.
 37. Segaline, H., Sáez, E., and Ubilla, J. (2021) Continuous characterization of dynamic soil behavior by digital image correlation in a transparent shear laminar box. *Acta Geotechnica*, 1-20, <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01351-1>.
 38. Krishna, A.M. and Latha, G.M. (2009). Container boundary effects in shaking table tests on reinforced soil wall models. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, **9**(4), 1-14, <https://doi.org/10.1680/ijpimg.2009.090401>.
 39. Teymur, B. and Madabhushi, S.P.G. (2003) Experimental study of boundary effects in dynamic centrifuge modelling. *Géotechnique*, **53**(7), 655-663, <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.655>.
 40. Lee, C.J., Wei, Y.C., and Kuo, Y.C. (2012) Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **34**(1), 37-51, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.10.011>.
 41. Pozo, C., Gng, Z., and Askarnejad, A. (2016) Evaluation of soft boundary effects (SBE) on the behavior of a shallow foundation. *Proceeding of the 3rd European Conference on Physical Modeling in Geotechnics (Eurofuge 2016)*, Nantes, France, 385-390.
 42. Tsai, C.C., Lin, C.Y., Dashti, S., and Kirkwood, P. (2021) Influence of centrifuge container boundaries and loading characteristics on evaluation of dynamic properties in dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **142**, 106567, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106567>.
 - International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, S. Prakash (Ed.), University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, USA, **3**, 1105-1110.
 27. Arulanandan, K., Anandarajah, A., and Abghari, A. (1983) Centrifugal modeling of soil liquefaction susceptibility. *Journal of Geotechnical Engineering*, **109**(3), 281-300, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(281\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(281)).
 28. Hushmand, B., Scott, R.F., and Crouse, C.B. (1988) Centrifuge liquefaction tests in a laminar box. *Géotechnique*, **38**(2), 253-262, <https://doi.org/10.1680/geot.1988.38.2.253>.
 29. Yoshikawa, M. and Arano, M. (1989) Dynamic behavior of a model pile foundation-ground systems in the liquefaction process. *Proceeding of the 9th World Conference on Earthquake Engineering (9WCEE)*, **3**, 599-604, Tokyo-Kyoto, Japan.
 30. Jafarzadeh, B. (2004) Design and evaluation concepts of laminar shear box for 1g shaking table tests. *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE)*, Vancouver, Canada, p. 1391.
 31. Li, Y., Zheng, S., Luo, W., Cui, J., and Chen, Q. (2020) Design and performance of a laminar shear container for shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **135**, 106157, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106157>.
 32. Thevanayagam, S., Kanagalingam, T., Reinhorn, A., Tharmendhira, R., Dobry, R., Abdoun, T., Zeghal, M., Ecemis, N., and El Shamy, U. (2009) Laminar box system for 1-g physical modeling of liquefaction and lateral spreading. *Geotechnical Testing Journal*, **32**(5), 1-19, <http://doi.org/10.1520/GTJ102154>.
 33. Shen, C.K., Li, X.S., Ng, C.W.W., Van Laak, P.A., Kutter, B.L., Cappel, K., and Tauscher, R.C. (1998) Development of a geotechnical centrifuge in Hong Kong. *Proceeding of the International Conference Centrifuge 98*, Tokyo, Japan.
 34. Endo, O. and Komanobe, K. (1995) Single and multi-directional shaking table tests of sand liquefaction. *Proceeding of the 1st Conference on*

- and Modaressi, A. (2008) Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(6), 453-467, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.07.011>.
52. Tang, L., Ling, X., Xu, P., Gao, X., and Wang, D. (2010) Shake table test of soil-pile groups-bridge structure interaction in liquefiable ground. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **9**(1), 39-50, <https://doi.org/10.1007/s11803-009-8131-7>.
53. Tsai, C.C., Lin, W.C., and Chiou, J.S. (2016) Identification of dynamic soil properties through shaking table tests on a large saturated sand specimen in a laminar shear box. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **83**, 59-68, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.007>.
54. Tabatabaiefar, H.R. (2016) Detail design and construction procedure of laminar soil containers for experimental shaking table tests. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **10**(4), 328-336, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1145419>.
55. Vivek, B. and Raychowdhury, P. (2019) Design and calibration of a laminar soil box suitable for a low-capacity shake table using free-field tests on Ganga sand. *Soils and Foundations*, **59**(5), 1602-1612, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.010>.
56. Kim, H., Kim, D., Lee, Y., and Kim, H. (2020) Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model soil in 1g shaking table test. *Applied Sciences*, **10**(13), 4642, <https://doi.org/10.3390/app10134642>.
57. Esmaeilpour, P. and Jafarian, Y. (2019) Detail design and construction procedure of a large-scale aluminum laminar shear box for 1g shaking table tests. *Proceeding of 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*, Tehran, Iran.
58. Esmaeilpour, P., Shojaemehr, S., Taghavizadeh, H., and Jafarian, Y. (2019) Detail design and performance of a small-scale laminar shear box for 1g shaking table experiments. *Proceeding of 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*, Tehran, Iran.
59. Farrin, M. and Hajjalilue-Bonab, M. (2019)
43. Haeri, S.M., Rajabigol, M., Salaripour, S., Kavand, A., Sayyaf, H., Afzalsoltani, S., and Pakzad, A. (2019) Effects of liquefaction-induced lateral spreading on a 3×3 pile group using 1g shake table and laminar shear box. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, Silvestri F., Moraci N. (Ed.) CRC Press, London, 2764-2770.
44. Van Laak, P.A., Taboada, V.M., Dobry, R., and Elgamal, A.W. (1994) Earthquake centrifuge modeling using a laminar box. *Proceeding of Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM International*, San Francisco, California, USA, 370-384, <https://doi.org/10.1520/STP13225S>.
45. Prasad, S.K. (1996) *Evaluation of Deformation Characteristics of 1-g Model Ground during Shaking Using a Laminar Box*. Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Japan.
46. Prasad, S.K., Towhata, I., Chandradhara, G.P., and Nanjundaswamy, P. (2004) Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. *Current Science*, **87**(10), 1398-1404, <http://www.jstor.org/stable/24109480>.
47. Ecemis, N. (2013) Simulation of seismic liquefaction: 1-g model testing system and shaking table tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **17**(10), 899-919, <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.833140>.
48. Lei, H., Hu, Y., Han, Q., Zheng, G., Zhao, B., and Du, Y. (2020) Design and test verification of a cylindrical 3D laminar shear soil container for use on shaking tables. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **139**, 106384. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106384>.
49. Gazetas, G. (1982) Vibrational characteristics of soil deposits with variable wave velocity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **6**(1), 1-20, <https://doi.org/10.1002/nag.1610060103>.
50. Taylor, C.A., Dar, A.R., and Crewe, A.J. (1995) Shaking table modeling of seismic geotechnical problems. *Proceeding of the 10th European Conference on Earthquake Engineers*, Vienna, Austria, 441-446.
51. Pitilakis, D., Dietz, M., Wood, D.M., Clouteau, D.,

Empirical Methods	۲۶- روش‌های تجربی	Experimental study of the seismic response of Tabriz subway tunnel in dry sand. <i>Bulletin of Earthquake Science and Engineering</i> , 6(3), 85-101.
Semi-Empirical Methods	۲۷- روش‌های نیمه تجربی	
Closed-Form Solutions	۲۸- حل‌های فرم بسته	
Pore Water Pressure	۲۹- فشار آب حفره‌ای	60. Fathi, H., Jamshidi Chenari, R., and Vafaeian, M. (2020) Shaking table study on PET strips-sand mixtures using laminar box modelling. <i>Geotechnical and Geological Engineering</i> , 38(1), 683-694, https://doi.org/10.1007/s10706-019-01057-y .
Geotechnical Centrifuge Apparatus	۳۰- دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی	
Soil-Structure Systems	۳۱- سیستم‌های خاک-سازه	
Electromotor Actuators	۳۲- محرک‌های الکتروموتور	
Confining Stresses	۳۳- تنش‌های محصور کننده	
Free-Field	۳۴- میدان آزاد	
Semi-Infinite Stratum	۳۵- محیط نیمه بی‌نهایت	
Water Tightness	۳۶- آب‌بند بودن	
Shear Beam	۳۷- تیر برشی	
Euler-Bernoulli Beam	۳۸- تیر اویلر-برنولی	
Plain-Strain	۳۹- کرنش-مسطح	
Distortion	۴۰- اعوجاج	
Side Walls	۴۱- دیواره‌های کناری	
End Walls	۴۲- دیواره‌های انتهایی	
Complementary Shear Stresses	۴۳- تنش‌های برشی مکمل	
Clockwise Overturning Moment	۴۴- لنگر واژگونی ساعت‌گرد	
Hysteresis Damping	۴۵- میرایی ذاتی	
Radiation Damping	۴۶- میرایی تشعشعی	
Latex Membrane	۴۷- غشاء لاتکس	
Rigid Container	۴۸- محفظه صلب	
Flexible Container	۴۹- محفظه منعطف	
Rigid Container with Flexible Boundaries	۵۰- محفظه صلب با مرزهای منعطف	
Rigid Container with Hinged End-Walls	۵۱- محفظه صلب با دیواره‌های مفصلی	
Equivalent Shear Beam Container (ESB)	۵۲- محفظه تیر برشی معادل	
Laminar Shear Beam Container (LSB)	۵۳- محفظه برشی لایه‌ای	
Active Boundary Container	۵۴- محفظه با مرزهای فعال	
Stacked-Ring Apparatus	۵۵- مجموعه قاب‌های بر روی هم	
Container Frames (or Laminates)	۵۶- قاب‌های (لایه‌های) محفظه	
		Empirical Modeling ۱- مدل‌سازی تجربی
		Analytical Modeling ۲- مدل‌سازی تحلیلی
		Numerical Modeling ۳- مدل‌سازی عددی
		Physical Modeling ۴- مدل‌سازی فیزیکی
		Neural Networks and Genetic Algorithm Modeling ۵- مدل‌سازی با شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک
		Scaled Model ۶- مدل مقیاس شده
		Prototype ۷- مدل واقعی (پروتوتایپ)
		Similitude (or Scaling) Laws ۸- روابط تشابه (و یا قوانین ابعادی)
		Element Testing ۹- آزمایش‌های المانی
		In-Situ (Field) Testing ۱۰- آزمایش‌های برجا (در محل)
		Compaction Test ۱۱- آزمایش تراکم
		Consolidation Test ۱۲- آزمایش تحکیم
		Triaxial Test ۱۳- آزمایش سه محوری
		Direct Shear Test ۱۴- آزمایش برش مستقیم
		Simple Shear Test ۱۵- آزمایش برش ساده
		Hollow Cylinder Test ۱۶- آزمایش استوانه توخالی
		Resonant Column Test ۱۷- آزمایش ستون تشدید
		Bender Element Test ۱۸- آزمایش المان خمشی
		Standard Penetration Test (SPT) ۱۹- آزمایش نفوذ استاندارد
		Cone Penetration Test (CPT) ۲۰- آزمایش نفوذ مخروط
		Vane Shear Test (VST) ۲۱- آزمایش برش پره
		Pressuremeter Test ۲۲- آزمایش فشارسنجی (پرسیومتری)
		Finite Element Method ۲۳- روش اجزای محدود
		Finite Difference Method ۲۴- روش تفاضل محدود
		Limit Analysis Method ۲۵- روش تحلیل حدی

واژه‌نامه

Bearing Systems	۵۷- سیستم‌های غلتشی
Acrylic (or Plexiglas)	۵۸- اکریلیک (و یا پلکسی گلاس)
Shaking Table Payload	۵۹- ظرفیت میز لرزان
Incompatible Displacement	۶۰- ناسازگاری جابه‌جایی
Strain Dissimilarity	۶۱- ناهمسانی کرنش
Zigzagged Deformation	۶۲- تغییر شکل دندان‌ه‌ای
Back Calculation	۶۳- محاسبات برگشتی
Digital Image Correlation (DIC)	۶۴- همبستگی تصاویر دیجیتال

Development of Laminar Shear Beam (LSB) Containers in Physical Modeling of Geotechnical Earthquake Problems: A Review

Pouria Esmailpour¹ and Arman Mamazizi^{2*}

1. Ph.D. in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, *Corresponding Author, email: a.mamazizi@uok.ac.ir

Physical modelling experiments at 1 g via shaking table or augmented gravitational field (N_g) with geotechnical centrifuge are powerful tools that have been widely used to investigate the seismic behaviour of various earthquake-related problems in recent decades. It is an established method for verifying design hypothesis, realization failure mechanisms, and gaining an insight into complex geotechnical problems including liquefaction-induced phenomena and their mitigation techniques, level or inclined grounds, problematic soils, retaining walls and embankments, and soil-structure systems such as shallow or pile foundation system through the use of appropriate similitude laws. While element tests are frequently used to obtain dynamic soil parameters, they fail in providing realistic observations of how soil and structures interact in reality. Thus, physical modelling is a better approach to understanding the behaviour of a wide range of geotechnical problems where large deformations occur such as liquefaction, lateral spreading, or landslide. However, geotechnical models cannot be directly mounted on shaking tables due to the requirements of confinement. To properly model the ground in full or reduced-scale physical modelling tests, a model container is required to hold the soil in place and provide confining stresses. Replication of the semi-infinite extent of the ground in a finite dimension model soil container could raise challenging issues; the undesirable effects of the container's artificial boundaries could affect the obtained results by altering the stress-strain field of the soils through reflected P-waves along other superfluous waves within the model.

In the current study, a comprehensive literature review on the advancement of physical modelling in geotechnics has been carried out. In this regard, a brief historical development of shaking tables and geotechnical centrifuge apparatus was outlined. Further, different types of developed model containers were explored. Additionally, vital criteria and requirements of an ideal container for carrying out seismic model tests at 1 g shaking table or N_g centrifuge experiments were thoroughly discussed. In particular, the development of laminar shear beam (LSB) containers as well as key properties in terms of detail design, construction, and particular usage in designated projects was presented in this paper. In the end, the recently fabricated LSBs were examined nationwide providing key properties and features in their design procedures.

Among all types of developed model containers, LSBs are the most common containers due to their accuracy in reproducing one-dimensional (1D) ground response in seismic conditions. The LSB allows free movement of soil column during shaking without imposing significant boundary effects and is able to maintain 1D soil column behaviour. Moreover, the use of LSBs enables the modelling of large strain modelling problems. Comparative studies by numerous researchers have confirmed that LSBs are the most advanced and efficient type of soil container in modelling soil-structure systems.

Keywords: Physical Modelling, Geotechnical Earthquake, Laminar Shear Beam (LSB) Container, Shaking Table.