

مطالعه آزمایشگاهی ضریب شتاب لرزه‌ای مورد استفاده در تحلیل شبه‌استاتیک دیوارهای خاک مسلح پلیمری در مجاورت ساختگاه‌های سنگی

محمد سعید رمضانی (دانشجوی دکتری)

علی کمک‌پناه* (استاد)

مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۴، صص. ۱۹-۲۹، (پژوهشی)

طراحی لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح غالباً بر مبنای تحلیل‌های مبتنی بر رویکرد شبه استاتیک انجام می‌شود. در این رویکرد، انتخاب مناسب پارامتر ضریب شتاب لرزه‌ای افقی (K_h) نقش مهمی را در میزان دقت نتایج ایفا می‌کند. اکثر روش‌های ارائه شده برای محاسبه ضریب شتاب لرزه‌ای مبتنی بر فرضیات تئوری هستند و تاکنون روشی بر پایه پژوهش‌های آزمایشگاهی برای محاسبه و یا صحت‌سنجی این پارامتر مهم ارائه نشده است. در این پژوهش، ابتدا رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار خاک مسلح پلیمری در مجاورت ساختگاه سنگی با استفاده از نتایج آزمایش میز لرزان مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه آزمایش فشار از پشت که در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است، بار افقی افزون شبه‌استاتیک به گوه گسیختگی لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح پلیمری در مجاورت ساختگاه سنگی وارد شده است و بر این اساس، نمودارهای سختی سیستم در برابر جابه‌جایی ترسیم می‌شود. از تلفیق نتایج دو آزمایش فشار از پشت و میز لرزان، منحنی‌های ضریب شتاب لرزه‌ای برای سطوح تغییر مکان مختلف ارائه شده است. مقایسه نتایج این مطالعه با روابط پژوهشگران پیشین و توصیه آیین‌نامه آشتو نشان می‌دهد که در شرایط تغییر مکان مجاز محدود، مقدار ضریب شتاب لرزه‌ای بر مبنای روش پیشنهادی، نسبت به توصیه آیین‌نامه آشتو، کمتر محاسبه می‌شود و در شرایطی که سیستم اجازه تغییر مکان کافی داشته باشد، مقدار ضریب شتاب لرزه‌ای بر مبنای روش پیشنهادی تقریباً معادل پیشنهاد آیین‌نامه محاسبه می‌شود.

واژگان کلیدی: تحلیل فشار از پشت، دیوار خاک مسلح، ساختگاه سنگی، ضریب شتاب لرزه‌ای، مدل فیزیکی میز لرزان.

saeed.ramezani@modares.ac.ir
a-panah@modares.ac.ir

۱. مقدمه

با این تفاوت که چند ردیف از مسلح‌کننده‌ها به پیچ سنگ‌های تعبیه شده در شیب سنگی متصل می‌شوند (شکل ۱). دلیل این امر، افزایش پایداری دیوار و محدود کردن حرکت قطعات ابتدایی رویه دیوار است.^[۱] در دیوارهای خاک مسلح معمولی نیز حرکت قطعات اول به وسیله عمق مدفون خاک محدود می‌شود.^[۲] به‌طور کلی انتظار می‌رود که حضور سطح سنگی منجر به کاهش فشارهای جانبی در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای شود. با این وجود، به دلیل عدم شناخت کامل

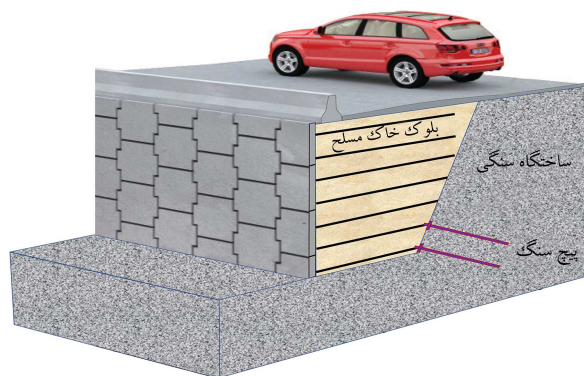
یکی از کاربردهای اصلی دیوارهای خاک مسلح، استفاده از آن‌ها به‌عنوان سیستم نگهدارنده راه‌ها است. در بسیاری از مواقع، در نواحی کوهستانی، این دیوارها در مجاورت پی و سطح سنگی^۱ ساخته می‌شوند. روش اجرای دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود به ساختگاه سنگی، مشابه دیوارهای خاک مسلح معمولی است،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۲۰، پذیرش ۱۴۰۲/۱/۲۰.

استناد به این مقاله:

رمضانی، محمد سعید و کمک‌پناه، علی، ۱۴۰۲. مطالعه آزمایشگاهی ضریب شتاب لرزه‌ای مورد استفاده در تحلیل شبه‌استاتیک دیوارهای خاک مسلح پلیمری در مجاورت ساختگاه‌های سنگی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۱۹-۲۹. DOI:10.24200/J30.2023.61407.3171



شکل ۱. دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود به ساختگاه سنگی.

از پاسخ این سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای، طراحان برای دوری از خطر گسیختگی، همچنان تمایل به استفاده از فرضیات محافظه‌کارانه دارند. بنابراین، فهم درست از رفتار و پاسخ لرزه‌ای این سیستم، منجر به ارائه یک طرح ایمن و در عین حال بهینه می‌شود.

اولین مطالعات در رابطه با عملکرد لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۷۷ توسط ریچاردسون و همکاران انجام پذیرفت.^[۳] این پژوهشگران، مدل مقیاس کاملی از دیوار خاک مسلح شش متری را تحت بار انفجار (به منظور شبیه‌سازی زلزله) مطالعه کردند. در این مطالعه، عملکرد لرزه‌ای دیوار در قالب متغیرهای تغییر شکل، نیروی بیشینه دینامیکی مسلح‌کننده‌ها و میزان اضافه بار دینامیکی حاصل از انفجار، بررسی شد. نتایج نشان داد که نیروهای محاسباتی به‌طور محسوسی کمتر از مقادیر حاصل از تئوری‌های مرسوم طراحی است.

بترست و حاتمی در سال ۱۹۹۸ با استفاده از تحلیل‌های عددی، تأثیر متغیرهایی همچون طول و سختی مسلح‌کننده‌ها و گیرداری پای دیوار را بر پاسخ دینامیکی دیوار خاکی مسلح شده با ژئوسینتیک بررسی کردند.^[۵] نتایج این پژوهش نشان داد که بیشینه‌ی نیرو در مسلح‌کننده‌ها برخلاف توصیه آیین‌نامه آشتو^[۶]، در ارتفاع تابعی خطی نیست. هاروارد و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از یکسری آزمایش سائتریفیوژ، رفتار دینامیکی دیوارهای خاکی مسلح شده با شبکه‌هایی از فولاد را تحت شتابی معادل ۰/۸۵ شتاب گرانش، بررسی کردند.^[۷] دستاورد اصلی این پژوهش، پیشنهاد مود گسیختگی لرزه‌ای دو خطی برای سیستم دیوارهای خاک مسلح بود.

صابر ماهانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به منظور بررسی مودهای تغییر شکل لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح، یکسری آزمایش‌های میز لرزه بر روی مدل‌های دیوار حائل خاک مسلح با ارتفاع یک متر انجام دادند و تأثیر پارامترهایی نظیر دانسیته خاک، طول مسلح‌کننده و فاصله مسلح‌کننده‌ها را بر روی پاسخ دینامیکی مطالعه کردند.^[۸] نتایج این تحقیق نشان داد که سختی مسلح‌کننده‌ها، پارامتر اصلی در تعیین پاسخ دینامیکی و مود تغییر شکل دیوار است. آناستاسوپولوس و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی تجربی و تئوری عملکرد لرزه‌ای یک نوع دیوار حائل مسلح شده با شبکه میله‌های فلزی پرداختند.^[۹] در آزمایش‌های میز لرزه این پژوهشگران، تأثیر اعمال انواع مختلف بار لرزه‌ای بر روی عملکرد دیوار ارزیابی شد.

کمک‌پناه و همکاران در سال ۲۰۱۵، رفتار دینامیکی دیوارهای حائل خاکی مسلح شده با تسمه‌های پلیمری را با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه بررسی نمودند.^[۱۰] در این پژوهش، تأثیر متغیرهایی نظیر بیشینه شتاب ورودی، طول مسلح‌کننده‌ها، نحوه اجرای مسلح‌کننده‌ها و عمق مدفون بر روی مودهای گسیختگی و تغییر مکان دیوار بررسی شد. نتایج نشان داد که سطح گسیختگی در دیوارهای خاکی مسلح شده با

تسمه‌های پلیمری شامل یک قسمت خطی و یک قسمت منحنی معکوس است. در سالیان اخیر، مطالعات مهم دیگری بر روی رفتار دینامیکی انواع دیوار خاک مسلح انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به هوانگ در سال ۲۰۱۹^[۱۱]، ژو و همکاران در سال ۲۰۲۰^[۱۲]، عسگری و همکاران در سال ۲۰۲۱^[۱۳] و یانکول و گورباز در سال ۲۰۲۲^[۱۴] اشاره نمود.

اثر مجاورت سطوح سنگی بر روی رفتار استاتیکی دیوارهای خاک مسلح، توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی سائتریفیوژ و دراف در سال ۲۰۰۳^[۱۵]، لی و همکاران در سال ۲۰۱۰^[۱۶]، مطالعات عددی لجنسکی و همکاران در سال ۲۰۰۴^[۱۷] و یانگ و لیو در سال ۲۰۰۷^[۱۸] و همچنین مطالعات صحرایی ماریسون در سال ۲۰۰۷^[۱۹] اشاره نمود. با این وجود، مطالعات اندکی برای فهم رفتار لرزه‌ای این دیوارها انجام شده است. در این ارتباط، کمک‌پناه و افتخاری^[۲۰] در سال ۲۰۲۲، رفتار دینامیکی دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود به شیب سنگی را بر روی میز لرزان بررسی کردند. دستاوردهای مطالعه این پژوهشگران، ارائه الگوی تغییر شکل لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح مجاور شیب سنگی و بررسی نحوه تشکیل گوه گسیختگی بحرانی است. پژوهش حاضر، در ادامه مطالعه مذکور انجام شده است.

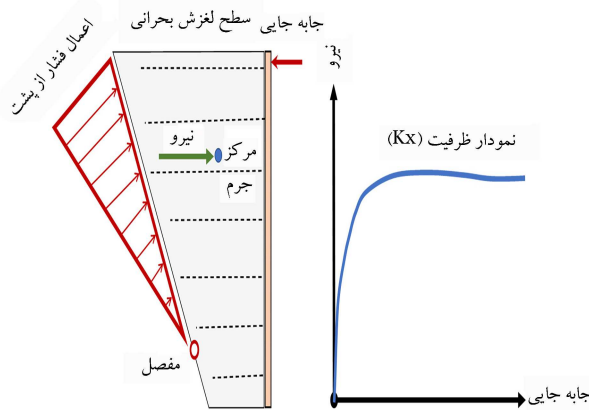
طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل از جمله دیوارهای خاک مسلح، غالباً بر مبنای تحلیل‌های مبتنی بر رویکرد شبه‌استاتیک انجام می‌شود. دلیل این امر، سادگی و کارآمد بودن روش شبه‌استاتیک است. مبنای روش شبه‌استاتیک برای تعیین فشار جانبی خاک در حین زلزله، اولین بار توسط اوکا به در سال ۱۹۲۶ و مونوبه و ماتسو در سال ۱۹۲۹^[۲۱] ارائه شد. این روش در واقع بسط یافته تئوری ارائه شده توسط کولمب در سال ۱۷۷۶ است که در آن اثر نیروی اینرسی زلزله به صورت یک نیروی شبه‌استاتیکی به گوه گسیختگی اعمال می‌شود.

به طور کلی در روش‌های مبتنی بر رویکرد شبه‌استاتیک، دو متغیر هندسه سطح لغزش بحرانی (گوه گسیختگی) و ضریب فشار شتاب لرزه‌ای (K_h)، نقش اساسی را در میزان دقت نتایج ایفا می‌کنند. بنابراین، در نظر گرفتن فرضیات مناسب برای انتخاب این دو متغیر، منجر به نتایج دقیق‌تر و در نتیجه طراحی اقتصادی‌تر و ایمن‌تر می‌شود. ضریب شتاب افقی انعکاس‌دهنده تأثیر حداکثر جنبش نیرومند زمین (PGA)^۲ بر روی گوه گسیختگی لرزه‌ای سیستم دیوار است. روش محاسبه این متغیر مهم، مورد اختلاف پژوهشگران است. بیشتر روابط ارائه شده مربوط به دیوارهای حائل معمولی هستند.^[۲۲، ۲۳] و پژوهش‌های محدودی در ارتباط با مقدار دقیق ضریب شتاب لرزه‌ای در دیوارهای خاک مسلح انجام شده است. در این زمینه، سگرستین و باستیک در سال ۱۹۸۸، رابطه ۱ را برای محاسبه ضریب فشار افقی زلزله وارده به دیوارهای خاک مسلح در شرایطی که مقدار شتاب بیشینه زلزله در کف دیوار (A_s) کوچک‌تر از ۰/۴۵ شتاب ثقل است، ارائه کردند.^[۲۴]

$$K_h = \frac{A_s}{g} \left(1.45 - \frac{A_s}{g} \right) \quad (1)$$

تاتسوکا و همکاران رفتار دیوارهای خاک مسلح شده با ژئوگرید را بعد از زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه (ژاپن) بررسی کردند و مقدار ضریب شتاب لرزه‌ای ۰/۲ K_h را به عنوان عددی منطقی برای این دیوارها پیشنهاد نمودند.^[۲۵] چوکیر رابطه زیر را برای محاسبه ضریب شتاب لرزه‌ای در دیوارهای خاک مسلح پیشنهاد نمود که در آن اثر فرکانس زلزله نیز لحاظ شده است.^[۲۶]

$$K_h = \left[0.5 / \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right) \right]^{0.5} \times \left[\frac{A_s}{g} \right] \quad (2)$$



شکل ۲. شکل کلی نحوه انجام آزمایش فشار از پشت و استخراج منحنی سختی (ظرفیت).

استفاده از رابطه ۳، منحنی‌های ضریب فشار لرزه‌ای (K_h) بر حسب شتاب حداکثر زلزله (A_s) برای سطوح عملکردی مختلف مورد انتظار از دیوار محاسبه می‌شود.

$$K_h = K'_h \times \frac{A_s}{g} = \frac{F}{W} \Rightarrow K_h = \frac{F}{W} \times \frac{g}{A_s} \quad (3)$$

در رابطه ۳، F نیروی شبه‌استاتیک اعمال شده به مرکز جرم گویه گسیختگی، W وزن گویه گسیختگی، A_s شتاب حداکثر تحریک اعمالی و K_h ضریب شتاب لرزه‌ای است. همچنین K'_h ضریب رابطه و متغیر اصلی مورد بررسی در این پژوهش است.

۳. بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود به ساختگاه سنگی

در این پژوهش، برای درک رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار خاک مسلح مجاور سطح سنگی، از نتایج آزمایش‌های میز لرزان استفاده شده است. برای این منظور، کمک پناه و افتخاری^[۱۴]، رفتار لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح پلیمری با خاکریز محدود به سطح سنگی را تحت تأثیر یک سناریو از رکوردهای همساز با دامنه متغیر بر روی میز لرزان مطالعه کردند. شکل ۳ هندسه مدل‌های فیزیکی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح سنگی به دو صورت شیب‌دار و پلکانی در نظر گرفته شده است. همچنین، فاصله پاشنه دیوار (فاصله سطح سنگی تا روبه دیوار) و آرایش مسلح‌کننده‌ها متغیرهای دیگر این پژوهش بوده است. خصوصیات بارگذاری اعمالی و شکل تاریخچه زمانی آن‌ها به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۴ نشان داده شده است.

با استفاده از نتایج آزمایش‌های میز لرزان، الگوی تغییر شکل لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح مجاور شیب سنگی و نحوه تشکیل گویه گسیختگی بحرانی در مدل‌های مختلف بررسی شد. بر این اساس، در شکل ۵ نحوه تغییر شکل لرزه‌ای مدل‌ها پس از انجام آزمایش میز لرزه و چگونگی تشکیل سطوح لغزش بحرانی نشان داده شده است. نتایج مهم آزمایش‌های میز لرزان که در مطالعه حاضر از آن‌ها استفاده می‌شود، به شرح زیر است:

۱. نحوه تغییر شکل لرزه‌ای این نوع از دیوارها، ترکیبی از شکم‌دادگی و چرخش است. در صورتی که مسلح‌کننده‌ها به سطح سنگی دوخته شوند، تغییر شکل غالب از نوع چرخش است.

در رابطه بالا، A_s مقدار شتاب بیشینه زلزله در کف دیوار، ω_n فرکانس طبیعی سیستم و ω فرکانس بارگذاری است. لازارته و همکاران، رابطه $K_h = 0.5 \times (A_s/g)$ را برای دیوارهای خاک مسلح که امکان جابه‌جایی دارند، پیشنهاد کردند.^[۲۷] رویکرد آیین‌نامه آشتو و FHWA در ارتباط با طراحی شبه‌استاتیک دیوارهای خاک مسلح مشابه دیوارهای معمولی است. این آیین‌نامه‌ها برای حالتی که دیوار اجازه جابه‌جایی کافی در هنگام زلزله را دارد، بر مبنای مطالعات بری و تراواسارو، مقدار شتاب لرزه‌ای را و برای شرایطی $K_h = 0.5 \times (A_s/g)$ که دیوار اجازه جابه‌جایی ندارد، $K_h = 1.0 \times (A_s/g)$ پیشنهاد می‌کنند.^[۲۸]

همانطور که شرح داده شد، اکثر روش‌ها و روابط ارائه شده برای محاسبه ضریب افقی فشار شبه‌استاتیک (K_h) مبتنی بر فرضیات تئوری است و تاکنون روشی بر پایه پژوهش‌های آزمایشگاهی برای محاسبه و یا صحت‌سنجی این پارامتر مهم ارائه نشده است. بنابراین، در این پژوهش، یک روش آزمایشگاهی جدید برای شبیه‌سازی فرضیات روش شبه‌استاتیک ارائه می‌شود. برای این منظور، ابتدا رفتار لرزه‌ای دیوار خاک مسلح مجاور شیب سنگی با استفاده از نتایج آزمایش‌های میز لرزان بررسی می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه فشار از پشت^۳ که در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است، بار شبه‌استاتیک به گویه گسیختگی لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی اعمال می‌شود. در نهایت، از تلفیق نتایج حاصل از آزمایش‌های میز لرزان و آزمایش‌های فشار از پشت، فرضیات بارگذاری شبه‌استاتیک با توجه به عملکرد مورد انتظار از سازه، شبیه‌سازی می‌شود و بر این اساس، نمودارهای مقدار ضریب فشار شبه‌استاتیک افقی ارائه می‌شود.

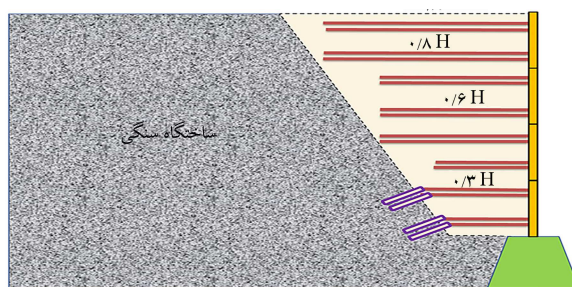
۲. روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا رفتار لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود به ساختگاه سنگی، بر اساس نتایج آزمایش‌های میز لرزان ارزیابی می‌شود. پارامترهای مورد ارزیابی در این مرحله شامل نحوه تغییر شکل دیوار، نحوه شکل‌گیری گویه گسیختگی (هندسه سطح لغزش بحرانی) و حداکثر شتاب تحریک ورودی در هنگام گسیختگی است. بنابراین، در گام اول، هندسه سطح لغزش بحرانی دیوار خاک مسلح متکی بر ساختگاه سنگی از نتایج آزمایش‌های میز لرزان استخراج می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه آزمایش اعمال فشار از پشت که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده است، بار افقی افزون شبه‌استاتیک به گویه گسیختگی لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی اعمال می‌شود. این بارگذاری در واقع نماینده فشار افقی ناشی از بارگذاری لرزه‌ای است. انجام آزمایش اعمال فشار از پشت به مدل‌های فیزیکی، منتج به استخراج منحنی‌های سختی (ظرفیت)^۴ می‌شود که در واقع سختی سیستم در برابر جابه‌جایی ناشی از بارگذاری شبه‌استاتیک را نشان می‌دهد. با استفاده از منحنی‌های سختی (ظرفیت)، مقدار نیروی شبه‌استاتیک مورد نیاز برای جابه‌جایی گویه گسیختگی لرزه‌ای در سطوح عملکردی مختلف قابل استخراج است. در شکل ۲، تصویر شماتیک چگونگی انجام آزمایش اعمال فشار از پشت و استخراج منحنی‌های سختی نشان داده شده است.

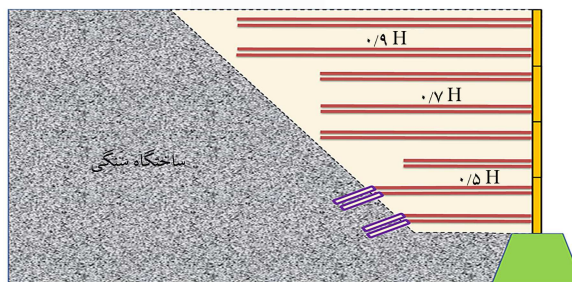
همچنین، با استفاده از نتایج آزمایش میز لرزان، عملکرد مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح مجاور ساختگاه سنگی تحت سلسله رکوردهایی با بیشینه شتاب‌های مختلف ارزیابی می‌شود و منحنی‌های مقدار جابه‌جایی به حداکثر شتاب اعمالی برای هر مدل استخراج می‌شود. در نهایت، از تلفیق نتایج دو آزمایش مذکور و با

جدول ۱. خصوصیات تحریک اعمالی به مدل فیزیکی در آزمایش میز لرزان.

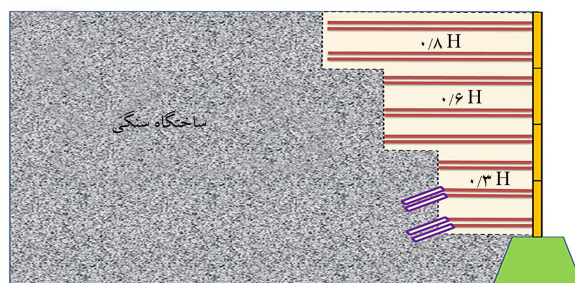
شماره رکورد	شتاب حداکثر ($a_{max}(g)$)	مدت زمان (ثانیه)
R(۱)	۰/۲۰	۴
R(۲)	۰/۲۵	۵
R(۳)	۰/۳۰	۶
R(۴)	۰/۳۵	۷
R(۵)	۰/۴۰	۸
R(۶)	۰/۴۵	۹
R(۷)	۰/۵۰	۱۰
R(۸)	۰/۵۵	۱۱
R(۹)	۰/۶۰	۱۲
R(۱۰)	۰/۶۵	۱۳
R(۱۱)	۰/۷۰	۱۴
R(۱۲)	۰/۷۵	۱۴
R(۱۳)	۰/۸۰	۱۴
R(۱۴)	۰/۸۵	۱۴
R(۱۵)	۰/۹۰	۱۴
R(۱۶)	۰/۹۵	۱۴
R(۱۷)	۱/۰	۱۴



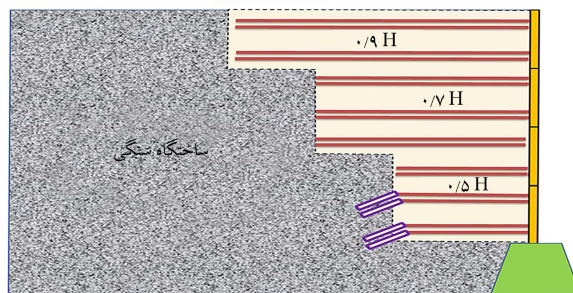
الف) آزمایش ۱



ب) آزمایش ۲



ج) آزمایش ۳

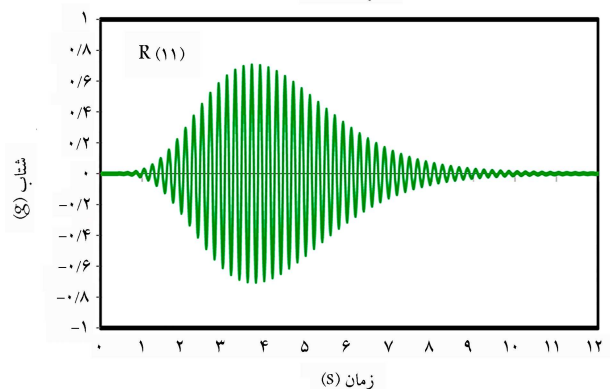
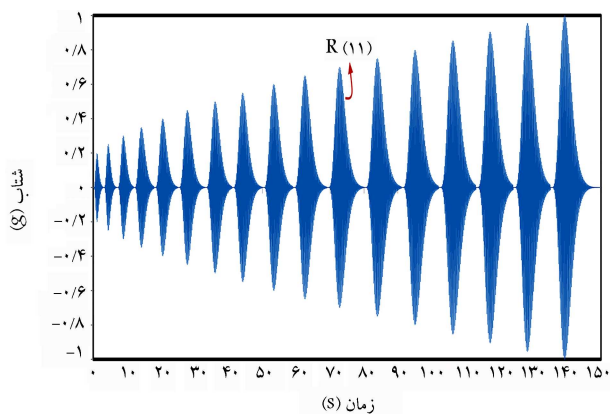


د) آزمایش ۴

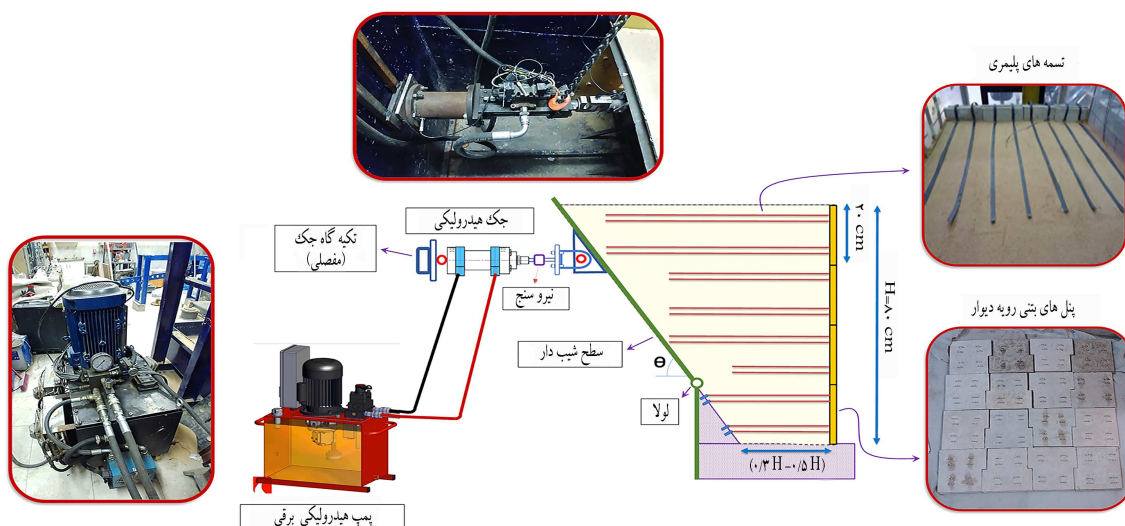
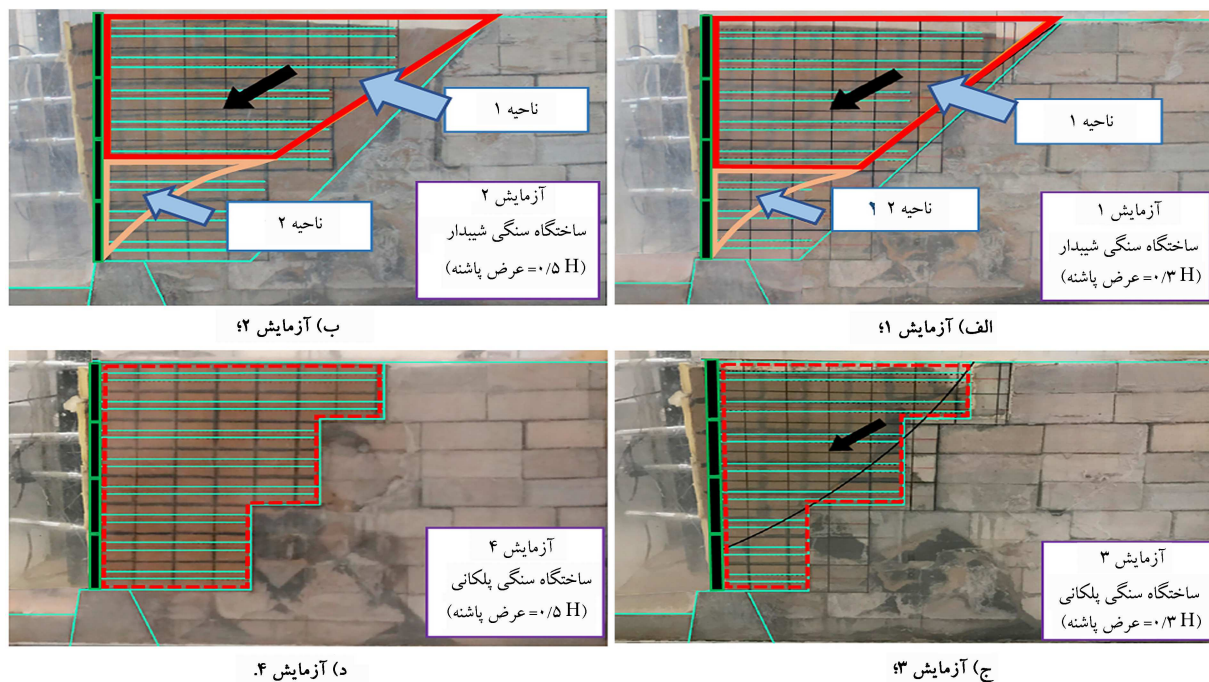
شکل ۳. هندسه مدل‌های فیزیکی در آزمایش میز لرزان.

۲. لغزش توده خاک مسلح بر روی ساختگاه سنگی، نقش به سزایی در افزایش تغییر مکان این نوع از دیوارها دارد. بر این اساس، تغییر مکان لرزه‌ای دیوار مجاور سطح سنگی پلکانی کمتر از سطح سنگی شیب‌دار است. علت این امر، کاهش پتانسیل لغزش توده خاک مسلح بر روی سطح سنگی پلکانی نسبت به سطح سنگی شیب‌دار است.

۳. مجاورت سطح سنگی با توده خاک مسلح باعث محدود شدن تشکیل گوه گسیختگی توسط محیط سنگی می‌شود. همان‌طور که در بخش ج و د شکل ۵ مشاهده می‌شود، در مدل‌های مجاور سطح پلکانی، گوه گسیختگی منطبق بر هندسه توده خاک مسلح تشکیل شده است. در دیوارهای مجاور سطح شیب‌دار (بخش الف و ب شکل ۵)، سطح گسیختگی بحرانی در نزدیکی سطح سنگی



شکل ۴. نمودار تاریخچه زمانی رکوردهای اعمالی به مدل فیزیکی در آزمایش میز لرزان.



ترتیب ۱۶۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشند. عملکرد دستگاه به این صورت است که بارافزون از طریق جک هیدرولیکی به گوه گسیختگی مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح با خاکریز محدود به سطح سنگی که از نتایج آزمایش میز لرزان استخراج شده است، اعمال می‌شود. مقدار نیرو به صورتی تدریجی افزایش می‌یابد و این فرایند تا ناپایداری سیستم دیوار خاک مسلح ادامه می‌یابد. در هر گام از بارگذاری، مقدار نیرو و جابه‌جایی دیوار توسط نیروسنج و جابجایی‌سنج‌ها ثبت می‌گردد. مشخصات مدل‌های دیوار خاک مسلح برای انجام آزمایش فشار از پشت، مشابه مدل‌های آزمایش میز لرزان در نظر گرفته شده است. بر این اساس، هندسه گوه گسیختگی مدل‌ها، منطبق بر نتایج آزمایش میز لرزان مدل‌سازی شده است که در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای ارزیابی نحوه تغییر شکل دیوار، سه جابه‌جایی‌سنج در رقوم ارتفاعی مختلف در جلوی دیوار جانمایی شد. همچنین، به منظور ارزیابی نحوه

تشکیل شده است و شامل یک قسمت خطی و یک قسمت منحنی معکوس است.

۴. انجام آزمایش فشار از پشت بر روی مدل‌های فیزیکی

همانطور که در بخش دو توضیح داده شد، در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی فرضیات روش شبه‌استاتیک، بارافقی شبه‌استاتیک به گوه گسیختگی لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح متکی بر ساختگاه سنگی اعمال می‌شود. برای این منظور، دستگاه آزمایش فشار از پشت طراحی شده و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد. شکل کلی و اجزای مختلف دستگاه آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. عرض جعبه دستگاه ۸۰ سانتی‌متر و طول و ارتفاع آن به



الف) مورد استفاده در مدل کوچک مقیاس؛ ب) مورد استفاده در مدل واقعی.

شکل ۹. تصویر مسلح کننده‌های پلیمری.

جدول ۲. مشخصات مسلح کننده‌های مورد استفاده در مدل کوچک مقیاس و مسلح کننده‌های پلیمری مدل واقعی.

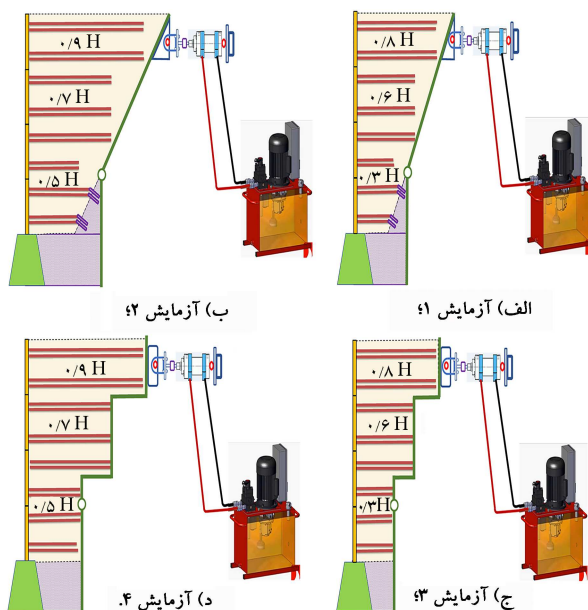
مدل	نمونه واقعی	پارامتر
Paragrid Grade	Grade Paraweb	نوع مسلح کننده
۵۰/۵	۷۵۲D	عرض (mm)
۱۲	۹۰	ضخامت (mm)
۰/۹	۳/۱	سختی محوری (kN/m)
۲۶/۶	۶۲۴	مقاومت کششی (MPa)
۲۲۱/۳	۲۶۸/۸	مدول الاستیسیته (GPa)
۲/۴۶	۲/۲۴	جنس هسته
رشته‌های پلی‌استر	رشته‌های پلی‌استر	جنس رویه
پلی‌اتیلن	پلی‌اتیلن	

میلی‌متر و به صورت T شکل برای استفاده در مدل فیزیکی در آزمایشگاه ساخته شدند. همچنین، در داخل پنل‌ها بست‌هایی برای اتصال مسلح‌های پلیمری تعبیه شدند.

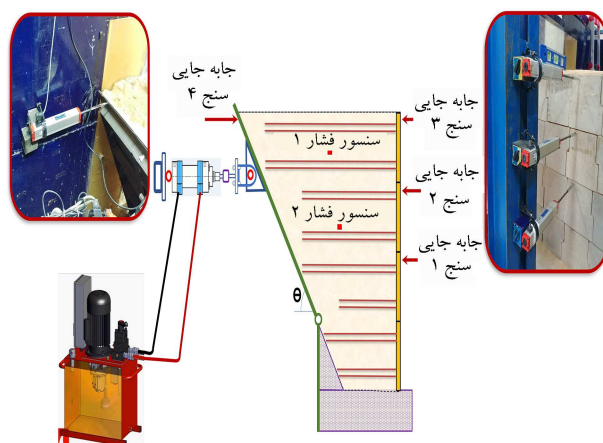
در این پژوهش، جنس مسلح کننده‌ها همانند آزمایش‌های میز لرزان از نوع پلیمری در نظر گرفته شده است. مسلح کننده‌های مورد استفاده در مدل‌های کوچک مقیاس باید بتواند رفتار مسلح کننده‌های پلیمری در مدل واقعی را شبیه‌سازی کنند. بر این اساس، کمک پناه و همکاران بیش از ۴۰ آزمایش کشش محوری (به منظور تعیین سختی محوری مسلح کننده‌ها) و حدود ۱۰۰ آزمایش بیرون کشیدن (به منظور مدل نمودن رفتار اندرکنشی اجزای تسلیح) بر روی مسلح کننده‌های با جنس‌های مشابه با تسمه پلیمری (الیاف پلی‌استر) اما با ابعاد کوچک‌تر، انجام دادند.^[۱۰]

نتیجه این آزمایش‌ها نشان داد که رشته‌های طولی ژئوگریدهای با شبکه ۵۰ می‌تواند بهترین شبیه‌سازی را برای رفتار کششی و اندرکنشی تسمه پلیمری از جنس پاراب در مدل واقعی را داشته باشند. بنابراین، در پژوهش حاضر نیز از همین نوع مسلح کننده‌ها با رعایت ضریب مقیاس ۷/۵ : ۱ استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات مسلح کننده‌های مورد استفاده در مدل فیزیکی و مسلح کننده‌های پلیمری مدل واقعی آورده شده است. در شکل ۹ تصویر مسلح کننده‌های پلیمری ارائه شده است.

خاک مورد استفاده در ساخت مدل‌های فیزیکی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه است. این خاک به عنوان یک خاک استاندارد توسط محققین قبلی معرفی شده است و دارای دانه‌بندی یکنواخت و مشابه ماسه توپواری ژاپن است.^[۳۱] در جدول ۳ مشخصات این خاک ارائه شده است.



شکل ۷. نحوه مدل سازی آزمایش‌های فشار از پشت.



شکل ۸. نحوه چیدمان حسگرها و ابزارگذاری مدل‌های فیزیکی در آزمایش فشار از پشت.

تغییر شکل بلوک خاک مسلح، یک جابه‌جایی‌سنج نیز در پشت گوه گسیختگی قرار داده شده است. در حین فرایند ساخت دیوار خاک مسلح، دو عدد حسگر فشارسنج در نزدیکی مرکز جرم توده خاک مسلح جانمایی شد تا بدین وسیله، مقادیر نیروی محاسباتی در مرکز جرم صحت‌سنجی شوند. نحوه چیدمان حسگرها و ابزارگذاری مدل‌های فیزیکی در شکل ۸ نشان داده شده است.

به طور کلی، برای ساخت یک مدل فیزیکی، لازم است که پارامترهای فیزیکی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده آن بر اساس پارامترهای مدل واقعی و با توجه به قوانین تشابه مقیاس شوند. در این پژوهش، هندسه و ابعاد مدل‌های آزمایشگاهی بر پایه معیارهای مقیاس‌سازی ارائه شده توسط یابی^[۲۹] و وود^[۳۰] مقیاس شده‌اند. بر این اساس، با در نظر گرفتن شاخص مقیاس (مقیاس مدل به واقعی) ۷/۵ : ۱، ارتفاع واقعی ۶ متر و ارتفاع دیوارها در مدل ۰/۸ متر در نظر گرفته شده‌اند. رویه‌های متداولی که در ساخت دیوارهای حائل مسلح شده استفاده می‌شوند، معمولاً دارای ابعاد ۱/۵ × ۱/۵ متر و ضخامت ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر هستند. با توجه به ضریب مقیاس انتخاب شده، پنل رویه‌ها با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰

جدول ۳. مشخصات ماسه فیروزکوه ۱۶۱. [۳۱]

نام اختصاری	SP
$\varphi(^{\circ})$	۳۶/۸
$\gamma_{d\max}(kN/m^3)$	۱۸
$\gamma_{d\min}(kN/m^3)$	۱۴/۶
e_{\min}	۰/۵۴۸
e_{\max}	۰/۹۴۳
D_{50}	۰/۲۷
C_c	۰/۸۸
C_u	۱/۸۷
G_s	۲/۶۵

جدول ۴. مشخصات مدل‌های مورد آزمایش.

شماره آزمایش	طول مسلح‌کننده‌ها (L/H)			هندسه ساخtingه
	لایه‌های پایین	لایه‌های میانی	لایه‌های فوقانی	
۱	۰/۳	۰/۶	۰/۸	شیب‌دار
۲	۰/۵	۰/۷	۰/۹	شیب‌دار
۳	۰/۳	۰/۶	۰/۸	پلکانی
۴	۰/۵	۰/۷	۰/۹	پلکانی

با توجه به بالا بودن مقدار تراکم نسبی در ساخت دیوارهای خاک مسلح، محدودیت‌های ساخت مدل فیزیکی با تراکم بالا و نوع خاک مورد استفاده (ماسه بد دانه‌بندی شده) وجود دارد. بالاترین تراکمی که در آزمایش‌ها می‌توان به آن دست یافت، ۸۵ درصد است که این مقدار تراکم در این پژوهش نیز مدنظر قرار گرفته است. به منظور تراکم بهتر، میزان ۵ درصد رطوبت به خاک اضافه شده است که این میزان رطوبت در حد رطوبت بهینه خاک است. فرایند تراکم خاک به صورت لایه به لایه و با استفاده از کوبه‌های دستی انجام شده است. در ساخت مدل‌های فیزیکی، سطح مشترک بین خاکریز و ساختگاه سنگی به وسیله لایه ملات ماسه - سیمان شبیه‌سازی شده است.

۵. نتایج آزمایش‌ها

در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به آزمایش‌های اعمال فشار از پشت ارائه می‌شود. سپس، از تلفیق نتایج آن با نتایج آزمایش‌های میز لرزان و بر مبنای روش پیشنهادی این پژوهش، مقادیر ضریب شتاب لرزه‌ای (K_h) با توجه به عملکرد مورد انتظار از دیوار خاک مسلح متکی بر ساختگاه سنگی و برحسب شتاب حداکثر زلزله ارائه می‌شود. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی فرضیات روش شبه‌استاتیک، آزمایش فشار از پشت بر روی چهار مدل فیزیکی از دیوار خاک مسلح متکی بر ساختگاه سنگی انجام شده است. مشخصات مدل‌ها در جدول ۴ ذکر شده است.

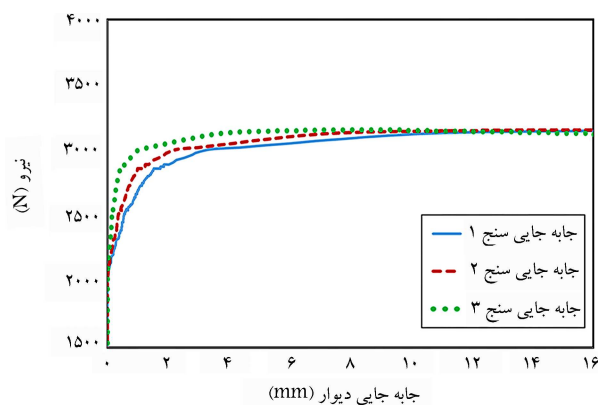
از آنجایی که یکی از فرضیات اصلی در روش شبه‌استاتیک، اعمال بار زلزله

به صورت یک نیروی متمرکز در مرکز جرم گوه گسیختگی است، لازم است که برآیند نیروی اعمالی به مرکز جرم انتقال یابد. بنابراین، ابتدا مرکز جرم مدل‌های آزمایش فشار از پشت که همان سطوح لغزش بحرانی آزمایش‌های میز لرزان هستند، تعیین شده و در ادامه مقدار نیرو در مرکز جرم در هر لحظه محاسبه شده است. بر این اساس، منحنی نیرو به جابه‌جایی مرتبط به هر یک از آزمایش‌ها در شکل ۱۰ ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده سختی سیستم در برابر تغییر مکان ناشی از اعمال بار افقی به مرکز جرم گوه گسیختگی است.

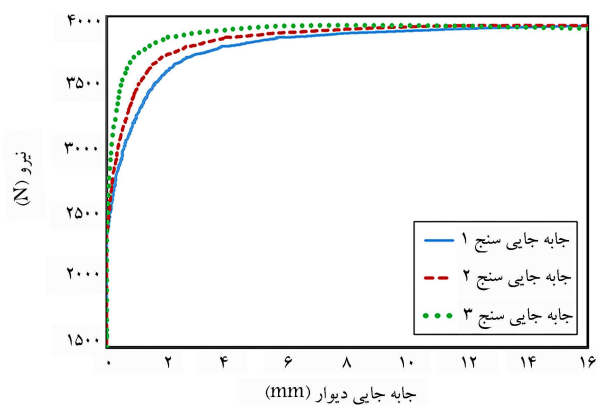
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی مدل‌ها، در ابتدا سیستم سختی نسبتاً بزرگی در برابر تغییر مکان از خود نشان می‌دهد. با افزایش سطح جابه‌جایی، از سختی سیستم کاسته شده و رفتار به سمت خمیری شدن تمایل پیدا می‌کند. به‌طور کلی در روش‌های محاسبه فشار وارده به دیوارها مبتنی بر تئوری تعادل حدی (از جمله کولمب و مونوبه اوکابه)، رفتار گوه گسیختگی به صورت صلب فرض می‌شود. این فرض ساده‌کننده به‌طور کامل با واقعیت مطابقت ندارد. در دیوارهای خاک مسلح، به دلیل تراکم بالای خاکریز و وجود مسلح‌کننده‌ها، این فرض تقویت می‌شود. در این پژوهش، به منظور ارزیابی صلبیت گوه گسیختگی، با قرار دادن یک جابه‌جایی سنج در پشت بلوک خاک مسلح، نحوه جابه‌جایی سطح شیب‌دار در طول آزمایش ثبت شده است (شکل ۷). در واقع، اختلاف جابه‌جایی میان رویه دیوار با سطح شیب‌دار پشت، به نوعی نشان‌دهنده تغییر شکل نسبی گوه گسیختگی است. بر این اساس، در شکل ۱۱ نحوه جابه‌جایی سطح پشت، رویه دیوار و میزان تغییر شکل نسبی گوه گسیختگی بر مبنای نتایج آزمایش شماره دو که بزرگ‌ترین سطح گوه گسیختگی را دارد، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان شروع حرکت دیوار، جابه‌جایی نسبی بلوک گوه گسیختگی کمتر از ۱ میلی‌متر است. همچنین، حداکثر جابه‌جایی نسبی خاکریز حدود ۱ میلی‌متر محاسبه شده است. بنابراین، با توجه به عرض گوه گسیختگی، مقدار جابه‌جایی نسبی کمتر از ۰/۲ درصد است که فرض صلبیت را تقویت می‌نماید.

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات نیرو به درصد جابه‌جایی ($\Delta x/H$) برای چهار مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌ها در مقدار جابه‌جایی ۰/۱ درصد، رفتار سیستم به سمت خمیری تمایل پیدا کرده است. همچنین، جابه‌جایی ۲ درصد، معرف حالتی است که رفتار سیستم به سمت رفتار خمیری کامل سوق پیدا می‌کند. همان‌طور که در بخش سوم توضیح داده شد، در آزمایش‌های میز لرزان، تغییر مکان لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی تحت تأثیر یک سناریو از تحریک‌های تناوبی با دامنه متغیر (شکل ۴) ارزیابی شده است. بر مبنای نتایج آزمایش‌های میز لرزان، نمودار درصد نسبت جابه‌جایی به حداکثر شتاب اعمالی در شکل ۱۳ ارائه شده است. نتایج نشان دادند که شروع تشکیل سطح گسیختگی بحرانی، در مدل‌های ۱ تا ۴ به ترتیب در حداکثر شتاب‌های ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۵۵ و ۰/۶۵ برابر شتاب گرانش روی می‌دهد.

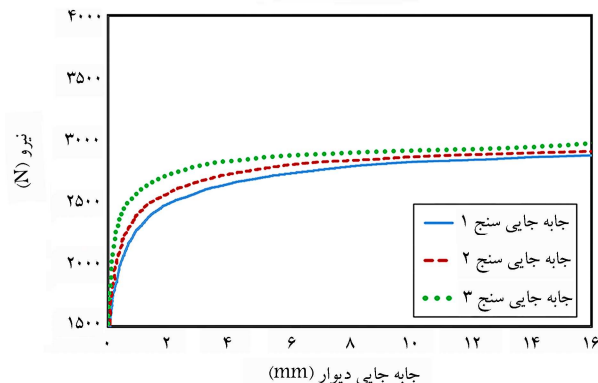
از تلفیق نتایج دو آزمایش فشار از پشت و میز لرزان و با استفاده از رابطه ۳، منحنی‌های ضریب شتاب لرزه‌ای افقی بر حسب شتاب حداکثر زلزله (A_s) برای سطوح تغییر مکان مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح تغییر مکان، از مقدار ضریب شتاب افقی کاسته می‌شود. مقایسه نتایج چهار آزمایش نشان می‌دهد که مقدار پارامتر ضریب شتاب لرزه‌ای در سیستم دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود، تابع عملکرد لرزه‌ای سیستم است. عملکرد لرزه‌ای نیز وابسته به عوامالی همچون هندسه ساختگاه سنگی و ابعاد



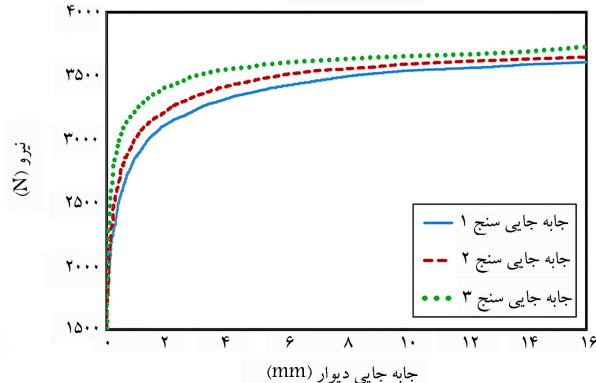
الف) آزمایش ۱



ب) آزمایش ۲

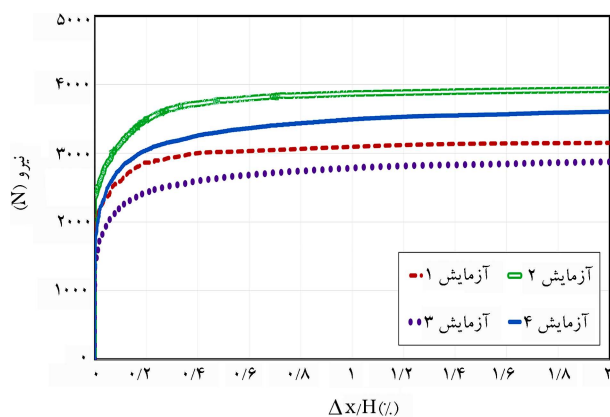


ج) آزمایش ۳

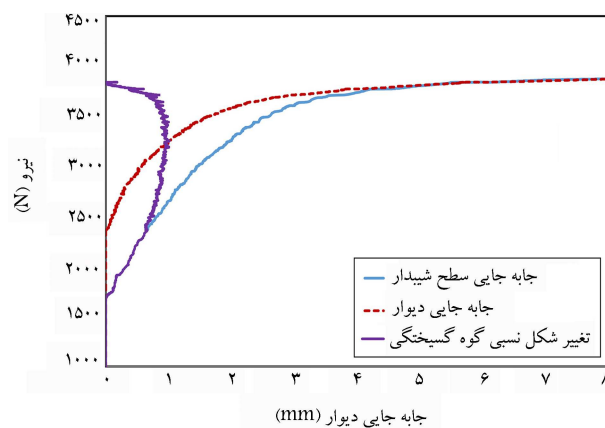


د) آزمایش ۴

شکل ۱۰. نتایج مربوط به تحلیل‌های فشار از پشت بر روی گوه گسیختگی مدل‌های فیزیکی.



$\Delta x/H(\%)$



جابه جایی دیوار (mm)

شکل ۱۲. نمودار تغییرات نیرو به درصد جابه‌جایی (مقایسه نتایج آزمایش فشار از پشت بر روی چهار مدل فیزیکی).

شکل ۱۱. نحوه جابه‌جایی سطح پشت، رویه دیوار و میزان تغییر شکل نسبی گوه گسیختگی بر مبنای نتایج آزمایش شماره ۲.

انتظار از سیستم دیوار حائل محدود می‌شود. بر این اساس، درصد تغییر مکان مجاز لرزه‌ای سیستم‌های حائل در محدوده‌ای در بازه ۰ الی ۲ درصد قابل پذیرش است و جابه‌جایی‌های بیش از این مقادیر، به عنوان خرابی دیوار تلقی می‌شود.^[۶] با توجه به معیار ارائه شده در آیین‌نامه آشتو^[۶]، سطوح عملکردی در این مطالعه به سه سطح تقسیم می‌شود:

۱. دیوار با تغییر مکان محدود؛

۲. دیوار نیمه منعطف؛

بلوک خاک مسلح است. به عنوان مثال، در دیوارهای خاک مسلح مجاور سطح سنگی پلکانی که عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به سطح شیب‌دار ساده دارند، مقدار شتاب لرزه‌ای با ضربه کمتری به گوه گسیختگی اعمال می‌شود. با افزایش ابعاد و سختی بلوک خاک مسلح، آستانه تحمل‌پذیری سیستم در برابر تغییر مکان ناشی از افزایش شتاب ورودی افزایش یافته و در نتیجه ضربه شتاب اعمالی کاهش یافته است. به‌طور کلی در طراحی دیوارهای حائل، سطح عملکرد بر مبنای مقدار تغییر مکان مجاز سیستم تعریف می‌شود. تغییر مکان مجاز نیز با توجه به کاربری مورد

جدول ۵. ضریب شتاب لرزه‌ای برای سطوح عملکرد مختلف و مقایسه با روابط پژوهشگران دیگر و آیین‌نامه آشتو.

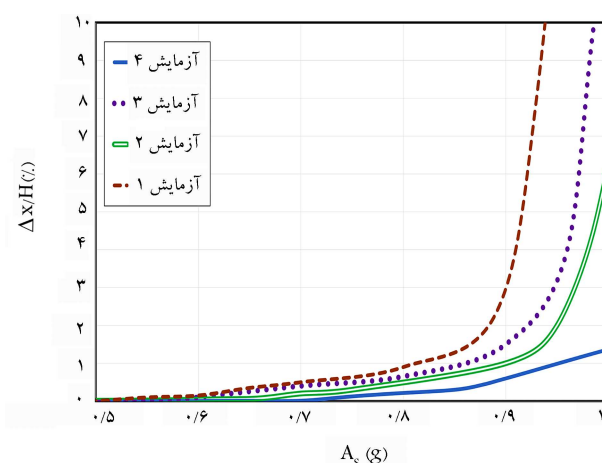
نوع ساختگاه	ابعاد بلوک	سطح عملکرد مورد انتظار از دیوار		
		تغییر مکان محدود	نیمه منعطف	انعطاف پذیر
روش پیشنهادی	شیب دار	$0.78(A_s/g)$	$0.73(A_s/g)$	$0.57(A_s/g)$
	شیب دار	$0.73(A_s/g)$	$0.65(A_s/g)$	$0.50(A_s/g)$
	پلکانی	$0.76(A_s/g)$	$0.69(A_s/g)$	$0.54(A_s/g)$
	پلکانی	$0.70(A_s/g)$	$0.61(A_s/g)$	$0.45(A_s/g)$
چوکیر [۲۳]	-	-	$0.72(A_s/g)$	$0.72(A_s/g)$
لازارته و همکاران [۲۴]	-	-	-	$0.50(A_s/g)$
آیین‌نامه آشتو [۵]	-	-	-	$0.50(A_s/g)$

افقی برای سطوح عملکرد مختلف ارائه شده و با روابط پیشنهادی پژوهشگران دیگر و آیین‌نامه آشتو مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که در شرایط تغییر مکان محدود، مقدار ضریب شتاب لرزه‌ای بر مبنای روش پیشنهادی نسبت به توصیه آیین‌نامه کمتر است. در شرایطی که سیستم اجازه تغییر مکان کافی داشته باشد (سیستم انعطاف پذیر)، مقدار ضریب شتاب لرزه‌ای بر مبنای روش پیشنهادی تقریباً معادل پیشنهاد آیین‌نامه محاسبه می‌شود.

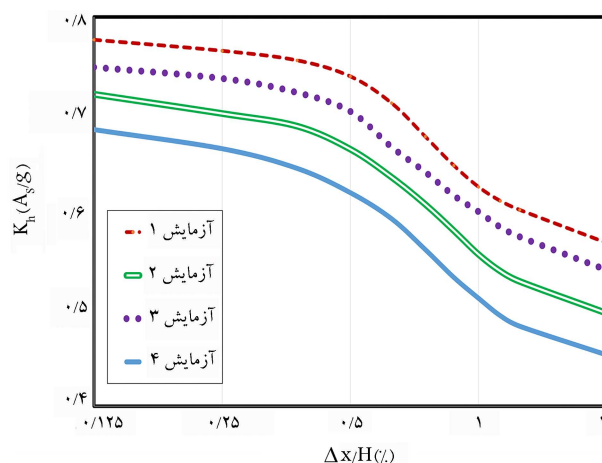
۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر حضور ساختگاه سنگی بر روی ضریب شتاب لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح بررسی شد. ابتدا، رفتار لرزه‌ای چهار مدل مختلف از دیوار خاک مسلح با خاکریز محدود به ساختگاه سنگی با استفاده از نتایج آزمایش‌های میز لرزان ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که شکل غالب تغییر مکان لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح متکی بر شیب سنگی از نوع چرخش است. در شرایطی که شیب سنگی در نزدیکی دیوار قرار دارد، تشکیل گوه گسیختگی توسط محیط سنگی محدود می‌شود. بر این اساس، در مدل‌های مجاور سطح پلکانی، گوه گسیختگی منطبق بر هندسه بلوک خاک مسلح تشکیل می‌شود و در دیوارهای مجاور سطح سنگی شیبدار، سطح گسیختگی بحرانی شامل یک قسمت خطی و یک قسمت منحنی معکوس است.

در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه آزمایش اعمال فشار از پشت، بار افقی افزون شبه‌استاتیکی به گوه گسیختگی لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی دیوار خاک مسلح متکی بر ساختگاه سنگی اعمال شد و نمودارهای سختی سیستم در برابر جابه‌جایی ترسیم شد. از تلفیق نتایج دو آزمایش فشار از پشت و میز لرزان، منحنی‌های ضریب شتاب لرزه‌ای برای سطوح تغییر مکان مختلف ارائه شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار پارامتر ضریب شتاب لرزه‌ای در سیستم دیوارهای خاک مسلح با خاکریز محدود، تابع عملکرد لرزه‌ای سیستم است. به‌عنوان مثال، در دیوارهای خاک مسلح مجاور سطح سنگی پلکانی که عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به سطح شیب‌دار ساده دارند، مقدار شتاب لرزه‌ای با ضریب کمتری به گوه گسیختگی اعمال می‌شود. همچنین، با افزایش ابعاد و سختی بلوک خاک مسلح، آستانه تحمل‌پذیری سیستم در برابر تغییر مکان ناشی از افزایش شتاب رکورد ورودی افزایش یافته و در نتیجه ضریب شتاب اعمالی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳. نمودار درصد جابه‌جایی به حداکثر شتاب اعمالی.



شکل ۱۴. منحنی‌های ضریب شتاب حداکثر افقی بر حسب شتاب حداکثر لرزه‌ای (A_s) برای سطوح تغییر مکان مختلف.

۳. دیوار انعطاف پذیر.

در دیوارهای با تغییر مکان محدود، مقدار جابه‌جایی مجاز بسیار کم است و در دیوارهای انعطاف پذیر، امکان جابه‌جایی کافی (تا جایی که کاربری آن‌ها دچار آسیب نشود) وجود دارد. تغییر مکان مجاز در این سه سطح به ترتیب ۱/۵، ۰/۵ و ۲ درصد فرض شده است. در جدول ۵ محدوده پیشنهادی ضریب شتاب لرزه‌ای

و توصیه آیین‌نامه آستو نشان می‌دهد که در شرایط تغییر مکان محدود، مقدار ضریب شتاب لرزهای بر مبنای روش پیشنهادی نسبت به توصیه آیین‌نامه، کمتر محاسبه می‌شود. در شرایطی که سیستم اجازه تغییر مکان کافی داشته باشد (سیستم انعطاف‌پذیر)، مقدار ضریب شتاب لرزهای بر مبنای روش پیشنهادی تقریباً معادل پیشنهاد آیین‌نامه محاسبه می‌شود.

همچنین، نتایج نشان داد که مقدار ضریب شتاب لرزهای وابسته به تغییر مکان مجاز دیوار است. بر این اساس، در دیوارهای با تغییر مکان محدود که سطح جابه‌جایی مجاز بسیار کم است، مقدار ضریب شتاب لرزهای در محدوده $0.78(A_s/g)$ الی $0.70(A_s/g)$ و در دیوارهای انعطاف‌پذیر در محدوده $0.57(A_s/g)$ الی $0.45(A_s/g)$ محاسبه شد. مقایسه نتایج این مطالعه با روابط پژوهشگران پیشین

پانوشته‌ها

1. Rock Foundation
2. Pick Ground Acceleration (PGA)
3. Push-Back Pressure
4. Capacity Curve

منابع (References)

1. Morrison, K.F., Harrison, F.E., Collin, P., Dodds, P. and Ben Arndt, P., 2006. Shored mechanically stabilized earth (SMSE) wall systems Design Guidelines. Fhwa-Cfl/Td-06-001.
2. FHWA., 2009. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-Volume I, vol. I. DOI: FHWA-NHI-10-024 & FHWA-NHI-10-025.
3. Richardson, G.N. and Lee, K.L., 1975. Seismic design of reinforced earth walls. *Geotech. Eng. Div*, 101(2), pp.167-188.
4. Richardson, G.N., Feger, D., Fong, A. and Lee, K.L., 1977. Seismic testing of reinforced earth walls. *ASCE J Geotech Eng Div*, 103(1). DOI: 10.1061/ajgeb6.0000364.
5. Bathurst, R.J. and Hatami, K., 1998. Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall. *Geosynth. Int*, 5, pp.1-2. DOI: 10.1680/gein.5.0117.
6. AASHTO., 2014. Aashto LRFD Bridge Design Specifications, 7th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
7. Howard, R.W.A., Kutter, B.L. and Siddharthan, R., 1999. Seismic deformation of reinforced soil centrifuge models. in *3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Dynamics Conference*, pp.446-457.
8. Sabermahani, M., Ghalandarzadeh, A. and Fagher, A., 2009. Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls *Geotext. Geomembranes*, 27(2). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2008.09.009.
9. Anastasopoulos, I., Georgarakos, V. Georgiannou, V. Drosos, V. and Kourkoulis, R., 2010. Seismic performance of bar-mat reinforced-soil retaining wall: Shaking table testing versus numerical analysis with modified kinematic hardening constitutive model. *Soil Dyn. Earthq. Eng*, 30(10). DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.04.020.
10. Komak Panah, A., Yazdi, M. and Ghalandarzadeh, A., 2015. Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips *Geotext. Geomembranes*, 43(2). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2015.01.001.
11. Huang, C.C., 2019. Seismic responses of vertical-faced wrap-around reinforced soil walls. *Geosynth. Int*, 26(2). DOI: 10.1680/jgein.18.00044.
12. Xu, P., Hatami, K. and Jiang, G., 2020. Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests. *Geotext. Geomembranes*, 48(1). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2019.103507.
13. Askari, M., Razeghi, H.R. and Mamaghanian, J., 2021. Numerical study of geosynthetic reinforced soil bridge abutment performance under static and seismic loading considering effects of bridge deck *Geotext. Geomembranes*, 49(5). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.05.007.
14. Yunkul, K. and Gurbuz, A., 2022. Shaking table study on seismic behavior of MSE wall with inclined backfill soils reinforced by polymeric geostrips. *Geotext. Geomembranes*, 50(1). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.09.005.
15. Woodruff, R., 2003. Centrifuge modeling of MSE-shoring composite walls. University of Colorado.
16. Lee, Y.B., Ko, H.Y. and McCartney, J.S., 2010. Deformation response of shored MSE walls under surcharge loading in the centrifuge. *Geosynth. Int*, 17(6). DOI: 10.1680/gein.2010.17.6.389.
17. Leshchinsky, D., Hu, Y. and Han, J., 2004. Limited reinforced space in segmental retaining walls. *Geotext. Geomembranes*, 22(6), pp.543-553. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2004.04.002.
18. Yang, K.H. and Liu, C.N., 2007. Finite element analysis of earth pressures for narrow retaining walls. *J. Geoenviron*, 2(2). DOI: 10.6310/jog.2007.2(2).1.
19. Morrison, K.F., Harrison, F.E., Collin, J.G. and Anderson, S.A., 2007. Full-scale testing of a shored mechanically-stabilized earth (SMSE) wall employing short reinforcements. DOI: 10.1061/40909(228)6.
20. Komak Panah, A. and Eftekhari, Z., 2021. Shaking table tests on polymeric-strip reinforced-soil walls adjacent to a rock slope. *Geotext. Geomembranes*, 49(3). DOI: 10.1016/j.geotexmem.2020.12.005.
21. Mononobe, N. and Matsuo, H., (1929). On the determination of earth pressure during earthquake. in *Proceedings of the World Engineering Conference*.

22. Hayashi, S., Noda, S. and Uwabe, T., 1977. Relation between seismic coefficient and ground acceleration for gravity quaywall. *in Natl Bur Stand Spec Publ*, 477.
23. Lee, M.G., Ha, J.G., Jo, S.B., Park, H.J. and Kim, D.S., 2017. Assessment of horizontal seismic coefficient for gravity quay walls by centrifuge tests. *Geotech. Lett*, 7 (2). DOI: 10.1680/jgele.17.00005.
24. Segrestin, P. and BASTICK, M.J., 1988. Seismic design of reinforced earth retaining walls: The contribution of finite element analysis. *in International Geotechnical Symposium*, pp.577-582.
25. Tatsuoka, F., Tateyama, M. and Koseki, J., 1995. Performance of geogrid-reinforced soil retaining walls during the Great Hanshin-Awaji earthquake. *in 1st International Symposium on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 55-60.
26. Choukeir, M., Juran, I. and Hanna, S., 1997. Seismic design of reinforced-earth and soil-nailed structures. *Gr. Improv*, 1(4). DOI: 10.1680/gi.1997.010404.
27. Lazarte, C., Robinson, H., Gomez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R.R., 2015. Geotechnical engineering circular No. 7 soil nail walls - reference manual. Federal Highway Administration and National Highway Institute, Washington, DC, FHWA-NHI-14-007, 2015.
28. Bray, J.D. and Travarasrou, T., 2009. Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng*, 135(9), DOI: 0.1061/(asce)gt.1943-5606.0000012.
29. Iai, S., 1989. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils Found*, 29 1. DOI: 10.3208/sandf1972.29.105.
30. Wood, D.M. Geotechnical Modelling. 2004. DOI: 10.4324/9780203477977.
31. Farahmand, K., Lashkari, A. and Ghalandarzadeh, A., 2016. Firoozkuh sand: Introduction of a benchmark for geomechanical studies. *Iran. J. Sci. Technol- Trans. Civ. Eng*, 40(2). DOI: 10.1007/s40996-016-0009-0.