

# بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی

مجید یزدان دوست (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

رضا ملایی (پژوهشگر)

اداره کل اموال و املاک، بنیاد مستضعفان انقلاب اسلامی، گیلان، ایران

حمیدرضا صبا\* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، ایران

مهندسی عمران شریف، (پهار ۱۴۰۳)  
دوری ۴۰، شماره ۱، صص. ۱۳۵-۱۴۷، (پنداشت فنی)

در پژوهش حاضر با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه به بررسی اثر نحوه چیدمان و طول میخ بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه افزایش طول میخ به‌طور هم‌زمان در تمامی ردیف‌ها موجب بهبود قابل توجه رفتار لرزه‌ای سیستم می‌شود، اما می‌توان همین اثر را تنها با افزایش طول میخ‌ها در نیمه بالایی و تحتانی دیوار به‌ترتیب برای میخ‌های افقی و مایل به‌دست آورد. همچنین، مشخص شد که کاربرد میخ‌های مایل به‌جای میخ‌های افقی، یک راهکار مناسب برای کاهش بزرگ‌نمایی شتاب و تغییرات به وجود آمده در محتوای فرکانس می‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که میزان اثربخشی این راهکار هنگام استفاده از میخ‌های کوتاه در نیمه فوقانی دیوار کاهش می‌یابد و نهایتاً با کاهش طول میخ‌ها در سراسر ارتفاع دیوار به حداقل می‌رسد. از سوی دیگر، میخ‌های نصب شده در نیمه پایینی دیوار به عنوان مؤثرترین المان‌های تسلیح بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های افقی شناسایی شده‌اند. شایان ذکر است که در هنگام نصب مایل میخ‌ها، این امر کاملاً معکوس بود.

واژگان کلیدی: دیوار میخ‌کوبی شده، عملکرد لرزه‌ای، مکانیزم گسیختگی،

میخ‌مارپیچی، میز لرزه.

M.yazdandoust@qom.ac.ir  
mollaiei.reza585@gmail.com  
hr.saba@tafreshu.ac.ir

## ۱. مقدمه

میخ‌کوبی خاک<sup>۱</sup> روشی برای تسلیح برجای خاک است که از سیستم مهار سنگ در روش تونل‌سازی جدید اتریشی<sup>۲</sup> الهام گرفته شده است.<sup>[۱]</sup> در این روش، که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ برای پایدارسازی موقت در شیب‌ها، ترانشه‌ها و عملیات حفاری معرفی گردید، المان‌های تسلیح بدون پیش‌تنیدگی در توده‌ی خاک نصب می‌گردد.<sup>[۲]</sup> عملکرد مناسب میخ‌کوبی در درازمدت و مقاومت لرزه‌ای خوب آن، باعث شده که امروزه از این روش به‌عنوان راه حلی دائمی برای پایدارسازی خاک استفاده شود.<sup>[۳-۷]</sup>

در روش میخ‌کوبی خاک، مقاومت برشی خاک مسلح شده در اثر اندرکنش المان‌های تسلیح (میخ‌ها) با توده‌ی خاک و بسیج نیروی محوری در این المان‌ها

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۲/۴/۶، پذیرش ۱۴۰۲/۴/۲۵.

استناد به این مقاله:

یزدان دوست، مجید، ملایی، رضا، و صبا، حمیدرضا، ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)،

صص. ۱۳۵-۱۴۷. DOI:10.24200/J30.2023.62328.3219



افقی و قائم برابر با  $15^\circ$  و  $2^\circ$  متر نصب شدند. این فواصل در محدوده‌ی توصیه‌شده برای میخ‌های مارپیچی می‌باشد.<sup>[۲۶]</sup>

## ۲.۲. اجزای مدل دیوار خاک میخ‌کوبی شده

### ۱.۲.۲. خاک

از آنجا که اجرای میخ‌های مارپیچی در خاک‌های غیرچسبنده، بسیار سست و ماسه‌های بسیار متراکم مناسب نمی‌باشد، برای ساخت بدنه مدل‌ها از یک ماسه‌ی سیلیسی (ماسه ۱۶۱ فیروزکوه) به همراه حدود ۶ درصد سیلت با دانسیته نسبی ۶۵ درصد استفاده شد. براساس پارامترهای تخمین زده شده از منحنی دانه‌بندی ( $C_u = 2,655$  و  $C_c = 1,147$ ) و نتایج آزمایش میز لرزان، این خاک در رده‌ی ماسه بدانه‌بندی شده سیلت‌دار با چگالی خشک حداکثر و حداقل به ترتیب برابر با  $16/6$  و  $14/6$  کیلونیوتن بر مترمکعب قرار دارد. از سوی دیگر، با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی شده تحت تنش‌های محصورکننده‌ی معادل با تنش موجود در مدل فیزیکی (۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال)، مقاومت برشی و سختی خاک تعیین شد. در نتایج آزمایش سه‌محوری مشخص شد که در تنش محصورکننده‌ی معادل با مدل فیزیکی، سختی خاک  $3/4$  تا  $3/8$  برابر کوچکتر از سختی تعیین شده تحت تنش محصورکننده‌ی برابر با مدل واقعی بود. این نسبت در محدوده روابط مقیاس برای سختی خاک در آزمایشات  $1g$  با مقیاس  $10:1$  است ( $E_{S(Prototype)} = (10)^{0.5} \cdot E_{S(Model)}$ ). مشخصات فیزیکی و مکانیکی این خاک که در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تعیین شد، در جدول ۲ ارائه شده است.

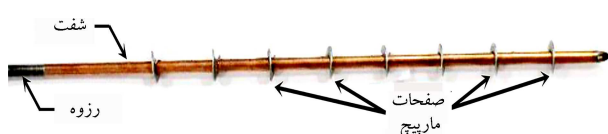
### ۲.۲.۲. المان‌های میخ

میخ‌های مارپیچ متداول معمولاً از یک شفت میانی به قطر  $3/8$  تا  $8/9$  سانتی‌متر تشکیل می‌شوند که صفحات مارپیچ در فواصل یکسان به آن جوش شده‌اند. به

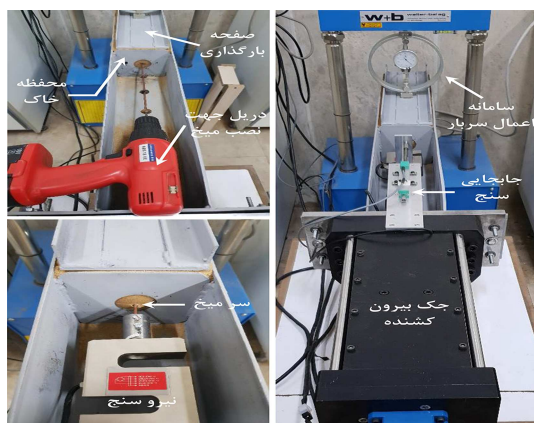
این ترتیب، سختی محوری میخ توسط شفت میانی تأمین شده و قطر و فاصله‌ی صفحات مارپیچ عامل ایجاد اندرکنش لازم میان میخ و خاک است. بنابراین، در این تحقیق، سختی محوری و ظرفیت بیرون‌کشیدگی<sup>۴</sup> به عنوان دو معیار اصلی جهت شبیه‌سازی المان‌های میخ در مقیاس آزمایشگاهی انتخاب گردید. براساس رابطه‌ی مقیاس سختی محوری ( $k_{prototype} = N^2 \cdot k_{model}$ )، المان میخ با قطر  $2/5$  میلی‌متر از جنس فسفر برنز تهیه گردید که معادل با یک میخ مارپیچی از جنس فولاد به قطر شفت برابر با ۳۸ میلی‌متر بود. همچنین، تعدادی آزمایش بیرون‌کشیدگی نیز بر روی میخ‌های کوچک مقیاس با نسبت‌های مختلف گام به قطر صفحات مارپیچ ( $S_{hx}/D_h$ ) انجام شد تا مشخصات هندسی مناسب صفحات مارپیچ تعیین گردد. نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی بر روی میخ‌های مارپیچ با مقیاس واقعی که توسط تخی و همکاران گزارش شده بود نیز به عنوان مرجع اصلی جهت مقیاس کردن میخ‌ها استفاده گردید.<sup>[۲۷]</sup> با توجه به قوانین مقیاس حاکم بر ظرفیت بیرون‌کشیدگی، در نهایت صفحات مارپیچ به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر  $10^\circ$  میلی‌متر انتخاب شدند تا با فواصل ۳۳ میلی‌متر به شفت متصل گردند. تصویری از میخ مارپیچ کوچک مقیاس و فرایند آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی انجام شده در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

### ۳.۲.۲. المان رویه

به دلیل آنکه رویه در پایداری دیوار میخ‌کوبی شده به عنوان یک المان خمشی رفتار می‌کند، در نتیجه مقاومت خمشی آن به عنوان معیار اصلی جهت انتخاب رویه‌ی کوچک مقیاس در نظر گرفته شد. از این رو، با توجه به قوانین مقیاس حاکم بر مقاومت



شکل ۲. المان میخ مارپیچ با مقیاس  $10:1$ .



شکل ۳. فرایند آزمایش بیرون‌کشیدگی بر روی میخ‌های کوچک مقیاس.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های دیوار.

شماره مدل	وضعیت میخ‌ها در نیمه فوقانی دیوار		وضعیت میخ‌ها در نیمه تحتانی دیوار	
	طول	زاویه ( $^\circ$ )	طول	زاویه ( $^\circ$ )
۱	$5H$	$0^\circ$	$5H$	$0^\circ$
۲	$9H$	$0^\circ$	$9H$	$0^\circ$
۳	$9H$	$0^\circ$	$5H$	$0^\circ$
۴	$5H$	$0^\circ$	$9H$	$0^\circ$
۵	$5H$	$30^\circ$	$5H$	$30^\circ$
۶	$9H$	$30^\circ$	$9H$	$30^\circ$
۷	$9H$	$30^\circ$	$5H$	$30^\circ$
۸	$5H$	$30^\circ$	$9H$	$30^\circ$

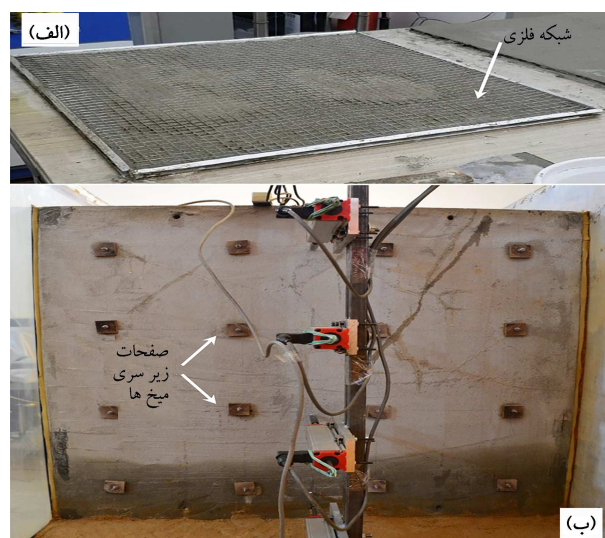
جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
چسبندگی (kPa)	۴	نسبت منافذ بیشینه	$786/^\circ$
زاویه اصطکاک بیشینه ( $^\circ$ )	۴۵-۴۱	نسبت منافذ کمینه	$571/^\circ$
زاویه اصطکاک ماندگار ( $^\circ$ )	۳۷-۳۵	اندازه متوسط (mm)	$285/^\circ$
زاویه اتساع ( $^\circ$ )	۷-۵	چگالی ذرات جامد	$654/^\circ$
سختی سکانتی در کرنش ۱٪	$1/89 - 4/30$	نسبت سیلت (%)	۶

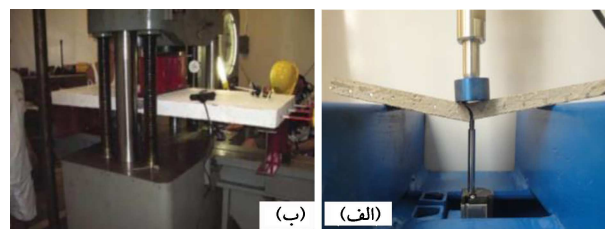
خمشي ( $M_{prototype} = N^{\lambda} \cdot M_{model}$ ) و انجام تعدادی آزمایش مقاومت خمشی بر روی رویه با مقیاس واقعی و المان‌های رویه کوچک مقیاس، از یک شبکه‌ی فلزی پوشانده شده با دوغاب سیمان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر به عنوان رویه‌ی دیوار کوچک مقیاس انتخاب شد. تصویری از این رویه و فرایند آزمایش‌های خمشی انجام شده در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ ارائه شده اند.

### ۳.۲. روند ساخت مدل

جهت شبیه‌سازی روند ساخت واقعی دیوارهای میخ‌کوبی شده که از بالا به پایین اجرا می‌شود، ابتدا رویه‌ی دیوار توسط یک سیستم مهاربند مقید شد و سپس ناحیه‌ی خاک برجا در پشت آن ساخته شد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، این سیستم مهاربند دارای چهار بازوی متحرک در ترازهای مختلف بوده که در ابتدا لایه‌های خاک را حین ساخت مقید کرده (شکل ۶ قسمت الف) و سپس با آزاد نمودن بازوهای مقابل لایه‌های ساخته شده از بالا به پایین به صورت مرحله به مرحله، شرایط خاکبرداری را شبیه‌سازی می‌نمود (شکل‌های ۶ قسمت ب الی ه). به این ترتیب، شرایط سکون در ناحیه‌ی خاک برجا قبل از خاکبرداری و همچنین حالت محرک در توده‌ی میخ‌کوبی شده در حین حفاری شبیه‌سازی می‌شد. جهت ساخت ناحیه‌ی برجا، مصالح خاکی با رطوبت ۶ درصد در لایه‌هایی به صورت سست داخل محفظه ریخته و با استفاده از یک کوبه متراکم می‌شد تا به ضخامت مورد نظر برسد. این تکنیک که به روش کوبش مرطوب با کنترل حجم معروف است، یک



شکل ۴. تصویری از الف) روند آماده‌سازی المان رویه کوچک مقیاس و ب) المان رویه داخل جعبه میز لرزه.



شکل ۵. تصویری از آزمایش خمش بر روی الف) المان رویه کوچک مقیاس و ب) المان رویه واقعی.

روش متداول جهت ساخت مدل‌های فیزیکی به‌شمار می‌رود. [۲۸-۳۲] همچنین، در پشت دیواره‌ی شفاف محفظه، لایه‌های افقی و قائمی از ماسه‌ی سیاه‌رنگ ریخته شد تا رؤیت تغییر شکل‌ها و نحوه‌ی تشکیل ناحیه‌های برشی ساده‌تر شود.

پس از اجرای خاک پشت دیوار، یک چهارم فوقانی دیوار آزاد و اولین ردیف میخ در فواصل افقی ۱۵/۰ متر نصب شد. جهت نصب میخ‌های مارپیچی از یک دریل برقی با قابلیت تنظیم سرعت استفاده شد. این دریل بر روی یک ریل (پایه) راهنمای فولادی قرار داده شد تا زاویه‌کوبش میخ در حین نصب ثابت نگه داشته شود. این ریل راهنما شامل یک پایه‌ی اصلی و یک بازوی مفصلی بود که اجازه می‌داد میخ‌ها تحت زاویه‌ی دلخواه درون خاک نصب گردند. پس از نصب هر میخ، یک قطعه‌ی چوبی مکعبی به ابعاد ۲۵ × ۲۵ × ۲۵ میلی‌متر در انتهای میخ قرار داده شده و با یک مهره در جای خود محکم می‌شد. در دیوار با میخ‌های مایل، از قطعات گوه‌ای شکل با زاویه‌ی رأس ۳۰ درجه استفاده شد. این روند برای ردیف‌های دوم تا چهارم نیز تکرار شد تا تمام دیوار و نصب تمام ردیف‌های میخ به پایان برسد.

### ۴.۲. ابزارگذاری و بارگذاری دینامیکی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به منظور اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی رویه از چهار سنسور جابه‌جایی سنج (LVDT) در ترازهای مختلف استفاده گردید. بر روی سطح خاکریز هر مدل و بر روی جعبه میز لرزه نیز یک شتاب‌نگار نصب شد تا به ترتیب پاسخ شتاب دیوار و شتاب ورودی اندازه‌گیری شود.

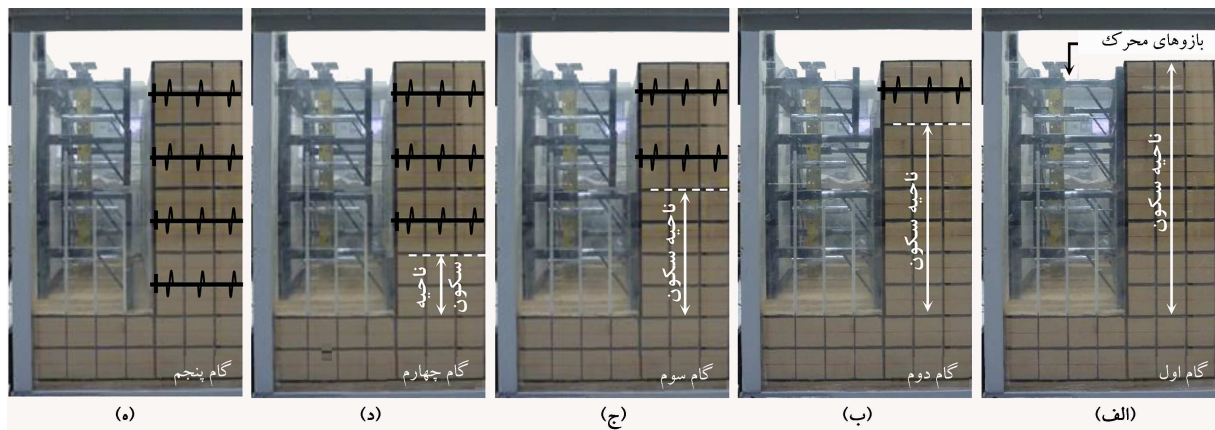
به منظور تحریک مدل‌ها، از تعدادی بار هارمونیک دوکی شکل متوالی با دامنه‌ی ثابت ۵/۰g و مدت تداوم متفاوت جهت تحریک مدل‌ها استفاده شد. در هر گام از بارگذاری، مدت دوام بار با گام‌های ۳ ثانیه تا لحظه‌ی وقوع گسیختگی افزایش یافت. این الگوی بارگذاری امکان بررسی اثر تغییرات سرعت مطلق تجمعی (CAV)<sup>۵</sup> را بر رفتار لرزه‌ای مدل‌ها ممکن ساخت. همچنین، فرکانس ۵ هرتز برای تحریک‌های ورودی انتخاب شد تا به قدر کافی از فرکانس طبیعی به دست آمده برای مدل‌ها فاصله داشته باشد و از وقوع پدیده‌ی تشدید در آن‌ها پیشگیری گردد. بر اساس آزمایش‌های ارتعاش آزاد که قبل از بارگذاری اصلی بر روی مدل‌ها انجام شد، فرکانس طبیعی مدل‌ها در محدوده‌ی ۱۶/۴ تا ۲۵/۳ هرتز برآورد شد. بر اساس قوانین تشابه ارائه شده برای فرکانس در خاک‌های غیرچسبنده  $(f)_{prototype} = 1/N^{1-\lambda/2} (f)_{model}$ ، فرکانس انتخاب شده برای تحریک ورودی متناظر با فرکانس غالب یک تحریک واقعی برابر با ۱ هرتز بود.

## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳. عملکرد استاتیکی دیوار

به منظور بررسی عملکرد مدل‌ها قبل از تجربه بار لرزه‌ای، تغییر شکل‌های جانبی رویه دیوارها در پایان آخرین گام شبیه‌سازی خاکبرداری در شکل ۷ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش شیب میخ‌در تمامی چیدمان‌ها موجب کاهش جابه‌جایی دیوار می‌شود. این کاهش در مدل‌هایی که در آن از میخ‌های کوتاه‌تر و بلندتر در تمامی ردیف‌ها استفاده شده بود به ترتیب به حداکثر و حداقل مقدار خود رسید. این بدان معنی است که تأثیر نصب میخ به صورت مایل هنگامی برجسته می‌شود که دیوار به واسطه نصب میخ‌های کوتاه به شدت دچار تغییر شکل شده است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که علاوه بر افزایش طول میخ در تمامی ردیف‌ها، افزایش موضعی طول میخ در برخی قسمت‌های دیوار نیز می‌تواند یک



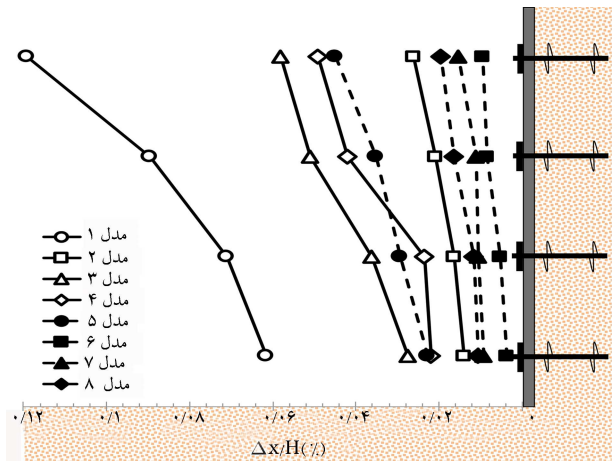


الف) گام اول: ساخت بدنه ی مدل؛ ب) گام دوم: آزادسازی لایه اول و نصب میخ های ردیف اول؛ ج) گام سوم: آزادسازی لایه دوم و نصب میخ های ردیف دوم؛ د) گام چهارم: آزادسازی لایه سوم و نصب میخ های ردیف سوم؛ ه) گام پنجم: آزادسازی لایه چهارم و نصب میخ های ردیف چهارم؛

شکل ۶. شبیه سازی فرایند خاکبرداری با استفاده از سازه مهاری.

سازه محسوب شده و می بایستی پارامترهای زلزله طرح جهت طراحی لرزه ای سازه بر اساس پاسخ لرزه ای سیستم نگهدارنده تعیین شود. برای این منظور لازم است که تغییرات به وجود آمده در محتوای فرکانسی شتاب ورودی (تغییر فرکانس و تغییر شتاب پایه) از طریق تحلیل پاسخ شتاب در سطح خاکریز تخمین زده شود. علیرغم پیرنگ تر بودن اهمیت این موضوع در سیستم های خاک مسلح به دلیل انعطاف پذیری بالای آن ها، تاکنون توجه اندکی به آن در این سیستم ها به خصوص سازه های خاک میخ کوبی شده است. بنابراین، در این مطالعه با استفاده از داده های ثبت شده توسط شتاب سنج قرار گرفته در سطح خاکریز دیوارها، به بررسی تغییرات محتوای فرکانسی شتاب ورودی در سیستم های مسلح شده با میخ های مارپیچی پرداخته شد. بر این اساس، با تعیین نسبت پاسخ شتاب حداکثر به بیشینه شتاب ورودی که ضریب بزرگ نمایی شتاب ( $A_{mm}$ ) نامیده می شود. [۳۵-۳۳] همچنین، تعیین نسبت فرکانس غالب شتاب نگاشت ثبت شده در سطح خاکریز به فرکانس شتاب ورودی ( $f_r$ ) در هر مرحله از بارگذاری، تغییرات ضریب بزرگ نمایی شتاب و  $f_r$  در مقابل سرعت مطلق تجمعی تخمین زده شده و در شکل ۸ ارائه شده است.

مقایسه ی  $f_r$  مدل ها در شکل ۸ نشان می دهد که طول، چیدمان و زاویه ی نصب میخ ها به طور چشمگیری می تواند موجب تغییر فرکانس تحریک ورودی شود. بنابراین، با استفاده از این سه عامل می توان فرکانس تحریک ورودی به سازه را بر اساس شرایط مورد نیاز مدیریت نمود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، کمترین کاهش در فرکانس تحریک ورودی مربوط مدل شماره ۶ می باشد که با چیدمانی یکنواخت از میخ های مایل با طول  $0.9H$  مسلح شده بود. این کاهش که حدود  $0.16^\circ$  بود، در مدل شماره ۲ با میخ های افقی به  $0.33^\circ$  رسید. این رشد  $0.51/5$  درصدی در مدلهایی با طول میخ  $0.5H$  در حدود  $0.10/8$  درصد تخمین زده شد. این اختلاف نشان دهنده ی آن است که در هنگام نصب میخ های مارپیچی بلند، تغییرات محتوای فرکانسی بیشتر به تغییرات زاویه ی نصب میخ بستگی دارد. عامل مؤثر دیگر بر تغییرات محتوای فرکانسی، چیدمان غیر یکنواخت میخ ها بود که در دیوارها با میخ افقی و مایل دو اثر کاملاً متفاوت داشت. مقایسه ی مدل های ۳ و ۴ با مدل ۱ نشان می دهد که افزایش طول میخ افقی در نیمه ی بالایی و پایینی دیوار به ترتیب منجر به کاهش  $0.06/5$  و  $0.23/9$  درصدی در فرکانس تحریک ورودی شده است، درحالی که در مدلهایی با میخ مایل (مدل های ۷ و ۸)، مقدار این کاهش به علت بلندتر شدن طول میخ ها در بالا و پایین دیوار به ترتیب حدود  $0.51/2$



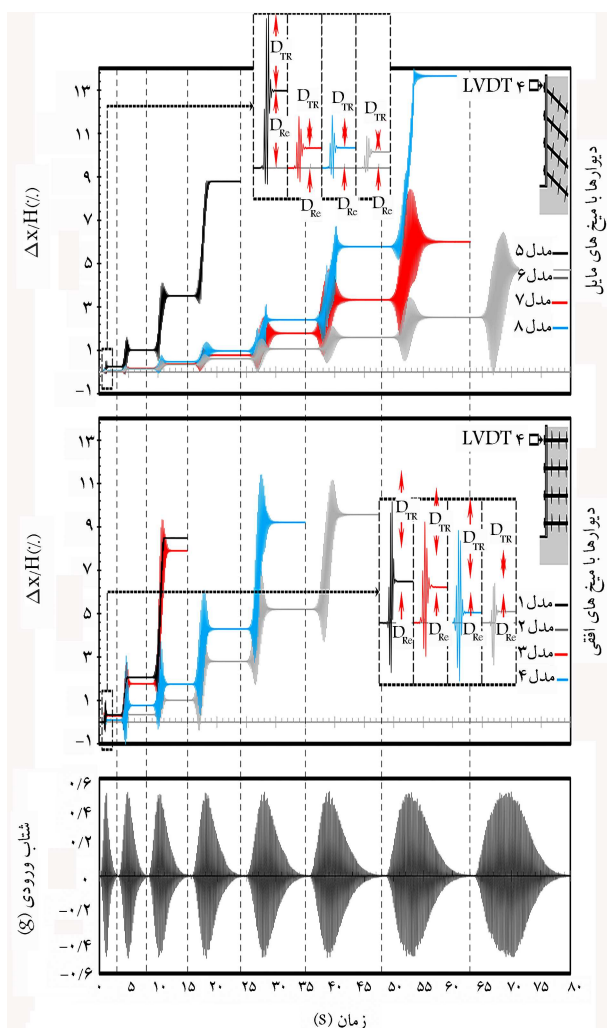
شکل ۷. پروفیل های جابه جایی افقی دیوار در مدلهایی با چیدمان مختلف میخ در پایان شبیه سازی خاکبرداری.

راه حل مناسب جهت کاهش جابه جایی های دیوار باشد. همانطور که در شکل ۷ به وضوح دیده می شود، این راه حل کاملاً وابسته به زاویه نصب میخ می باشد، به طوری که هنگام نصب میخ به صورت افقی، افزایش طول میخ های واقع شده در نیمه تحتانی به مراتب مؤثرتر از افزایش طول میخ های فوقانی می باشد درحالی که این موضوع هنگام نصب میخ به صورت مایل کاملاً برعکس می باشد. وقوع بیشترین جابه جایی در تاج دیوار در تمام مدل ها فارغ از نوع چیدمان، نکته دیگری است که در شکل ۷ مشاهده می شود. این پدیده که از ضعف اندرکنش میخ های فوقانی با خاک در اثر ناچیز بودن فشار همه جانبه در این بخش نشأت می گیرد، به طور چشمگیری با نصب مایل میخ ها جبران شد. این جبران به گونه ای بود که سبب تغییر مد تغییر شکل از دوران به سرخوردگی شد.

## ۲.۳. عملکرد لرزه ای دیوار

### ۱.۲.۳. تغییرات محتوای فرکانسی

واقع شدن سازه بر روی یک سیستم نگهدارنده خاک امری است که مهندسان بعضاً با آن مواجه می شوند. در این شرایط، سیستم نگهدارنده به عنوان یک ساختگاه برای

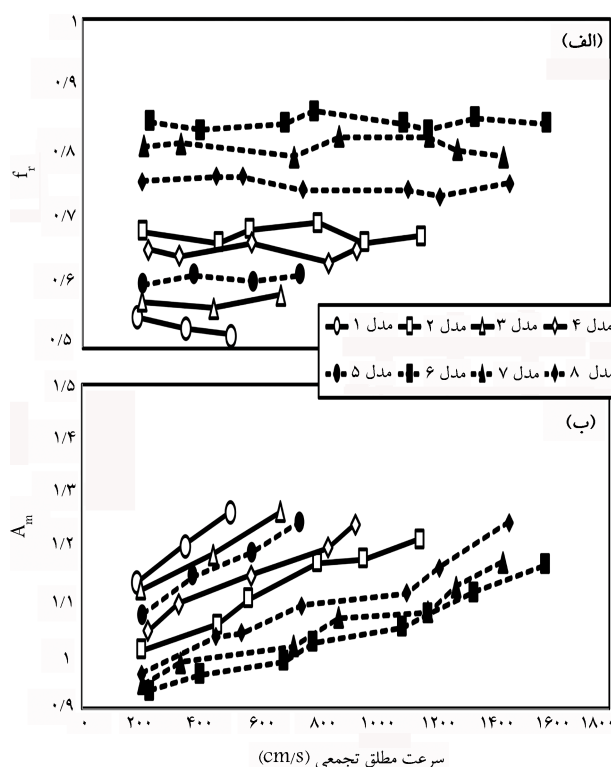


شکل ۹. تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی بدون بعد در تاج مدل‌ها در خلال مراحل اول تا هشتم بارگذاری.

و نهایتاً با کاهش هم‌زمان طول میخ‌در تمامی ردیف‌ها، این اثر به حداقل رسید. طول میخ دومین عامل مؤثر بر توزیع بزرگ‌نمایی شتاب در سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی بود و افزایش آن به‌طور کلی موجب کاهش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب گردید. چیدمان میخ‌ها سومین عامل تأثیرگذار در کاهش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب بود که میزان اثرگذاری آن به زاویه‌ی نصب میخ‌ها وابسته بود. در مدل‌های دیوار با میخ‌های افقی، افزایش طول میخ در نیمه‌ی پایینی دیوار نسبت به افزایش طول میخ‌های نیمه‌ی فوقانی تأثیر بیشتری در کاهش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب داشت، درحالی‌که این موضوع در حالت نصب میخ‌های به‌طور مایل کاملاً برعکس بود.

### ۲.۲.۳. جابه‌جایی رویه

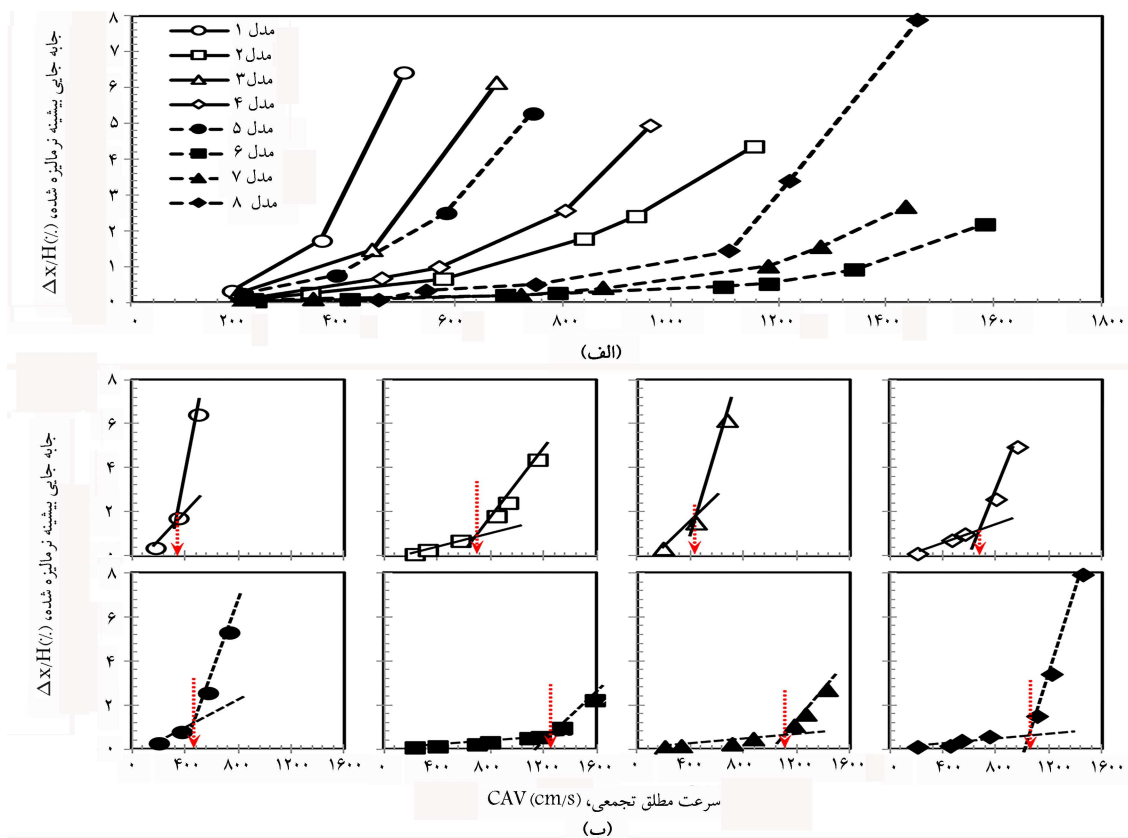
تاریخچه زمانی جاب‌جایی جانبی در تاج دیوار در گام‌های مختلف بارگذاری در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، پاسخ جابه‌جایی جانبی شامل دو بخش اصلی می‌شود: یک بخش پاسخ گذرا<sup>۶</sup> ( $DT$ ) و یک بخش پاسخ ماندگار<sup>۷</sup> ( $DR$ ). در گام اول بارگذاری، توزیع  $DR$  تقریباً با  $DT$  در تمامی مدل‌ها یکسان بود که نشان‌دهنده عدم ورود سیستم به فاز پلاستیک در این گام از بارگذاری است. در طی دومین گام بارگذاری، به خصوص در مدل‌هایی با میخ‌های کوتاه، افزایش سرعت مطلق تجمعی موجب افزایش قابل توجهی در مقدار  $DR$  شد و



شکل ۸. تغییرات (الف) نسبت فرکانس غالب شتاب نگاشت ثبت شده در سطح خاکریز به فرکانس شتاب ورودی و (ب) بزرگ‌نمایی شتاب در مقابل سرعت مطلق تجمعی.

و ۳۹/۱ درصد تخمین زده شد. این بدان معنا است که چیدمان غیریکنواخت میخ‌های مایل منجر به رفتار صلب‌تر در سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی می‌شود. همچنین، برخلاف دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مایل، میخ‌های نصب شده به‌صورت افقی در نیمه‌ی پایینی دیوار نسبت به نیمه‌ی بالایی نقش مؤثرتری بر افزایش صلبیت سازه دارد. این امر که توسط یزدان دوست و همکاران<sup>[۲۶]</sup> برای سیستم مسلح با تسمه فلزی نیز گزارش شده است، نشان می‌دهد که هنگام انتخاب چیدمان میخ‌ها می‌بایستی زاویه‌ی نصب نیز در نظر گرفته شود.

برخلاف  $f_r$ ، در شکل ۸ مشاهده می‌شود که تغییرات ضریب بزرگ‌نمایی شتاب در مقابل سرعت مطلق تجمعی یک روند صعودی را تجربه می‌کند. این روند افزایشی، که در تمامی مدل‌ها تقریباً با یک نرخ یکسان دنبال می‌شود، نشان می‌دهد زمان تداوم بارگذاری نقش مهمی در افزایش بزرگ‌نمایی شتاب دارد. این در حالی است که در مطالعات پیشین روندی نزولی برای ضریب بزرگ‌نمایی شتاب هنگام افزایش شتاب پایه گزارش شده است.<sup>[۲۹-۳۷،۳۳]</sup> بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در زلزله‌هایی با زمان تدام بلندتر اثرات مخرب بیشتری نسبت به زلزله با شتاب بالاتر در سازه‌های ساخته شده به روی سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی مشاهده می‌شود. توزیع ضریب بزرگ‌نمایی شتاب در مدل‌ها نشان داد که زاویه‌ی نصب، طول و چیدمان میخ‌ها می‌تواند اثرات قابل توجهی بر کاهش آن داشته باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نصب میخ‌های مایل به‌جای میخ‌های افقی موجب شد که ضریب بزرگ‌نمایی شتاب کاهش یابد. میزان این کاهش به چیدمان میخ‌ها بستگی داشت و بیشترین کاهش در دیوارهایی مشاهده گردید که از میخ کوتاه‌تر در نیمه‌ی پایینی آن استفاده شده بود. در صورت استفاده از میخ‌های کوتاه‌تر در نیمه‌ی فوقانی دیوار، اثر زاویه‌ی میخ در کاهش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب کمتر نمایان شد



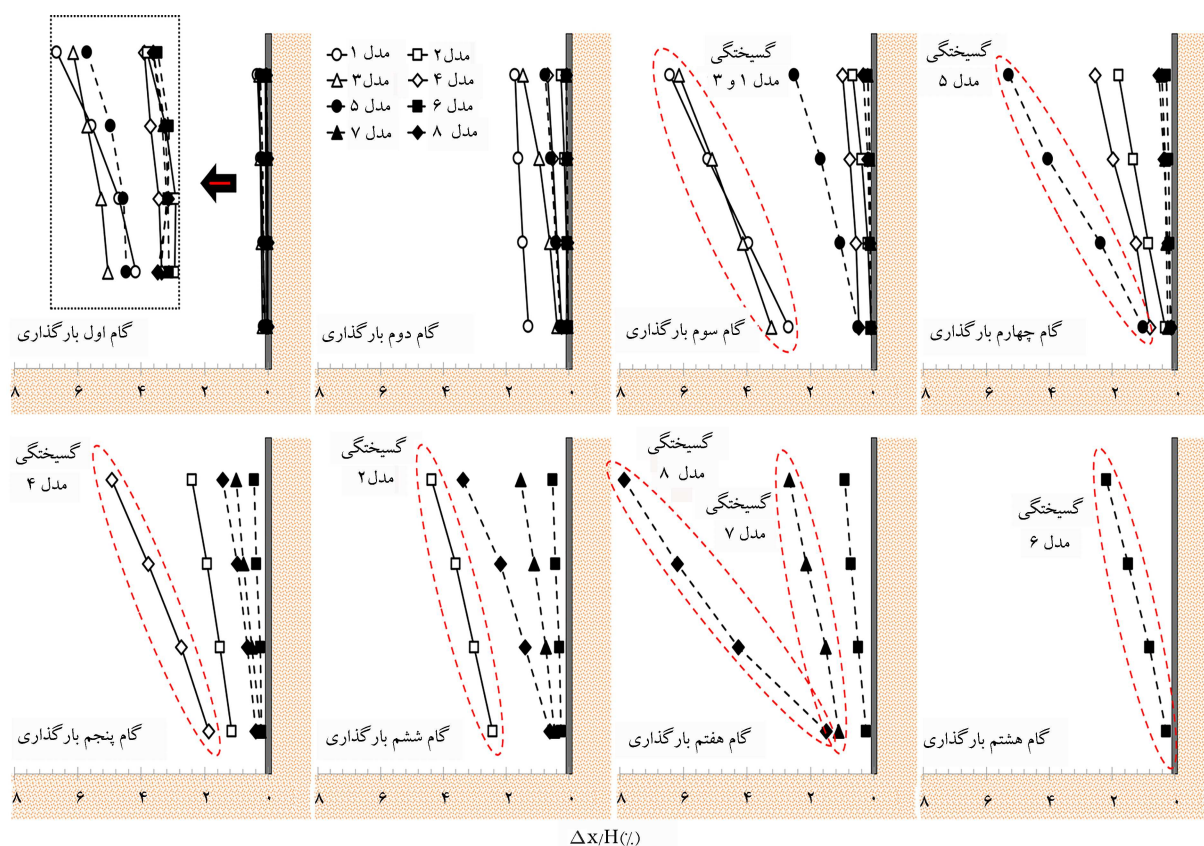
شکل ۱۰. الف) تغییرات جابه‌جایی افقی حداکثر در مقابل سرعت مطلق تجمعی و ب) مقادیر سرعت مطلق تجمعی متناظر با آستانه گسیختگی در هر مدل.

در حالی است که در مدل ۳ مشاهده شد که افزایش طول میخ‌های افقی در نیمه‌ی بالایی دیوار اثربخشی چندانی نداشته است.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بهترین عملکرد لرزه‌ای در سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی زمانی حاصل می‌شود که طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها به‌طور همزمان در تمام ردیف‌ها افزایش یابد. با اینکه افزایش طول میخ در تمامی ردیف‌ها نقش مهمی بر بهبود عملکرد سیستم میخ‌کوبی شده با میخ‌های مارپیچی دارد، این امر می‌تواند منجر به یک طراحی غیراقتصادی شود. بنابراین، چیدمان غیریکنواخت میخ‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی باشد.<sup>[۲۰]</sup> پروفیل‌های جابه‌جایی‌های جانبی نشان می‌دهد که استفاده از میخ‌های بلندتر تنها در نیمه‌ی بالایی دیوار نیز می‌تواند راه‌حل مناسبی جهت کاهش طول مورد نیاز میخ‌ها باشد، در عین حال که عملکرد مطلوب دیوار را حفظ نماید. این نوع چیدمان که به عنوان چیدمان دوزنقه‌ای معروف است، تنها زمانی در سیستم مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی مؤثر خواهد بود که میخ‌ها به‌طور مایل نصب شده باشند. در حالت نصب افقی میخ‌ها، عکس این چیدمان به‌عنوان چیدمان بهینه مطرح است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت نصب میخ‌های افقی، نیمه‌ی تحتانی دیوار سیستم میخ‌کوبی شده با میخ‌های مارپیچی مهم‌ترین و مؤثرترین بخش بوده و باید با میخ‌های بلندتر تسلیح گردد، درحالی‌که این امر در حالت نصب میخ‌های مایل کاملاً معکوس است. این یافته‌ها که برای میخ‌کوبی تزریقی نیز به‌دست آمده است<sup>[۲۰]</sup>، به این معنا است که باید چیدمان میخ‌های مارپیچی بر اساس زاویه‌ی نصب انتخاب گردد تا عملکرد لرزه‌ای مطلوب حاصل شود. نکته‌ی مهم دیگری که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، این است که افزایش طول میخ‌ها به‌طور همزمان در تمامی ردیف‌ها علاوه بر آنکه کاهش جابه‌جایی پیش از گسیختگی را در پی دارد، موجب کنترل سطح جابه‌جایی‌ها در لحظه‌ی گسیختگی

موجب گردید تا بخش اعظمی از پاسخ جابه‌جایی شامل جابه‌جایی‌های ماندگار باشد. این پدیده در مراحل بعدی بارگذاری افزایش یافت و ورود به فاز پلاستیک و وقوع باندهای برشی<sup>۸</sup> در بدنه‌ی مدل‌ها مشاهده گردید. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نصب میخ‌های مایل علاوه بر کاهش جابه‌جایی گذرا سبب کمتر شدن جابه‌جایی ماندگار نیز شده است. با کاهش طول میخ‌ها، جابه‌جایی جانبی دیوار افزایش قابل توجهی یافت. این افزایش که در تاج دیوار مشهودتر بود، با نصب میخ‌های مایل کم‌رنگ‌تر شد. این موضوع که در (شکل ۱۰ قسمت الف) نیز به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد، بدان معنا است که اثر نامطلوب کاربرد میخ‌های کوتاه در عملکرد سیستم‌های مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی را می‌توان با نصب زاویه‌دار میخ‌ها جبران نمود.

پروفیل‌های جابه‌جایی جانبی دیوار در گام‌های مختلف بارگذاری در شکل ۱۱ ارائه شده است. با مقایسه‌ی مدل‌ها مشخص شد که استفاده از رویه با سختی خمشی کافی سبب می‌شود که توده‌ی خاک میخ‌کوبی شده به‌صورت یکپارچه رفتار نموده و همکاری مناسبی میان تمام ردیف‌های میخ شکل‌گیرد تا پایداری دیوار به نحوی مناسب تأمین گردد. این همکاری موجب شده که عملکرد ضعیف میخ‌ها در برخی از قسمت‌های مدل توسط سایر میخ‌ها جبران شود. این موضوع را می‌توان به وضوح در مدل ۴ مشاهده نمود که در آن اثرات نامطلوب کاربرد میخ‌های افقی کوتاه در نیمه‌ی فوقانی دیوار توسط میخ‌های نیمه‌ی پایینی جبران شده است. مقایسه‌ی مدل‌های ۴ و ۸ نشان می‌دهد که این امر با نصب میخ‌های مایل بیشتر قوت می‌گیرد. در مدل ۷ مشاهده می‌شود که تأثیر نصب میخ‌های مایل آنچنان زیاد است که علیرغم ظرفیت پایین بیرون‌کشیدگی میخ‌های فوقانی، این میخ‌ها نقش چشم‌گیری در جبران اثرات نامطلوب کاهش طول میخ‌ها در نیمه‌ی پایینی دیوار داشته‌اند. این



شکل ۱۱. پروفیل‌های جابه‌جایی افقی دیوار در مدل‌هایی با چیدمان مختلف میخ در گام‌های مختلف بارگذاری.

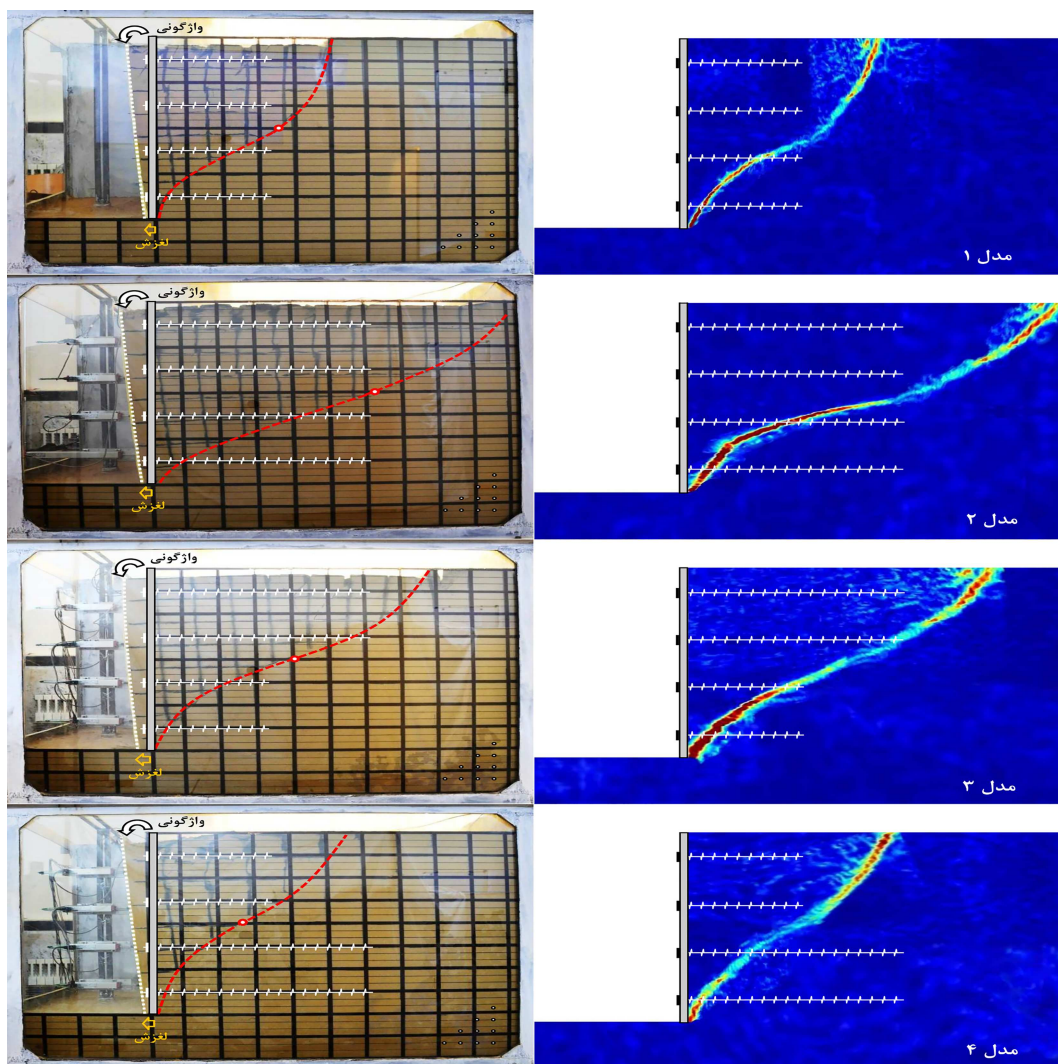
می‌دهد که کاربرد میخ‌های مارپیچی مایل یک راه‌حل مناسب برای افزایش مقادیر سرعت مطلق تجمعی آستانه گسیختگی و بهبود پایداری لرزه‌ای سیستم مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی می‌باشد. از طرفی دیگر، با افزایش طول میخ‌ها، مقادیر  $CAV_y$  افزایش یافته و جابه‌جایی ماکزیم کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده انتخاب چیدمان مناسب میخ‌ها در بهبود پایداری لرزه‌ای دیوارهای مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی است. شکل ۱۰ قسمت ب نشان می‌دهد این بهبود پایداری لرزه‌ای نه تنها با افزایش طول میخ به‌طور هم‌زمان در تمامی ردیف‌ها حاصل می‌شود، بلکه با افزایش طول میخ‌ها به‌صورت موضعی در برخی بخش‌های دیوار مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی نیز به‌دست می‌آید. اگرچه که افزایش طول میخ‌ها به‌صورت موضعی به هر صورتی که باشد نهایتاً پایداری دیوار را افزایش می‌دهد، اما برای دیوارها با میخ افقی، کاربرد میخ‌های بلندتر در نیمه پایینی دیوار بهترین گزینه بوده و در دیوارهایی با میخ مایل استفاده از میخ بلندتر در نیمه‌ی بالایی دیوار مؤثرتر است.

### ۳.۲.۳. سطوح گسیختگی

روش پردازش تصاویر یک روش اندازه‌گیری غیرمخرب است که در این تحقیق برای شناسایی سطوح گسیختگی در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، کرنش برشی ایجاد شده در توده خاک با دنبال کردن حرکت ذرات خاک در تصاویر متوالی اخذشده از مدل در خلال بارگذاری توسط نرم‌افزار GeoPIV اندازه‌گیری و سپس نواحی گسیختگی مشخص می‌شود. نتایج پردازش تصاویر و تصاویر تهیه‌شده از خرابی مدل‌ها در طی آخرین مرحله از بارگذاری در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌اند. همانطور که در تمامی مدل‌ها مشاهده می‌شود، سطوح گسیختگی در امتداد ارتفاع دیوار شکل می‌گیرد که با گزارش مطالعات گذشته بر روی دیوارهای خاک

نیز می‌گردد. این اثر مثبت همچنین در حالت نصب میخ‌های بلندتر افقی در پایین دیوار و میخ‌های بلندتر مایل در بالای دیوار نیز مشاهده شد (شکل ۱۰ قسمت الف). امروزه، کاربرد وسیع طراحی سازه‌های خاکی بر اساس سطوح عملکرد سبب شده است که روش‌های طراحی بر مبنای جابه‌جایی اهمیت مضاعفی پیدا کنند. شتاب ورودی تسلیم ( $a_y$ ) یک پارامتر مهم در این روش‌ها می‌باشد که تخمین دقیق آن می‌تواند در اعتباربخشی به نتایج بسیار مؤثر باشد. این پارامتر معمولاً با استفاده از نمودار جابه‌جایی ماکزیم ( $(\Delta x/H)_{max}$ ) برحسب شتاب پیشینه زمین (PGA) قابل تعیین است.<sup>[۴۰، ۴۱، ۴۲]</sup> در این روش، نقطه‌ی تغییر شیب منحنی جابه‌جایی حداکثر در مقابل شتاب پیشینه زمین به عنوان شتاب ورودی تسلیم انتخاب می‌شود. مطالعات نشان داده است که شتاب ورودی تسلیم به عواملی نظیر هندسه‌ی سازه و مشخصات خاک وابسته است. با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه که توسط هانگ و همکاران<sup>[۴۰]</sup> و یزدان‌دوست<sup>[۴۲]</sup> انجام گرفت، مشخص شد که کاربرد میخ‌های تزریقی مایل و بلند سبب افزایش شتاب ورودی تسلیم می‌گردد. از آنجا که زمان تداوم بارهای لرزه‌ای یکی از عوامل اصلی خرابی سازه‌ها است، در این مطالعه تلاش شد که مقدار سرعت مطلق تجمعی (CAV) متناظر با آستانه گسیختگی در هر مدل تعیین گردد. جهت تخمین مقادیر سرعت مطلق تجمعی در آستانه گسیختگی ( $CAV_y$ ) در مدل‌ها، منحنی‌های جابه‌جایی ماکزیم ( $(\Delta x/H)_{max}$ ) در مقابل سرعت مطلق تجمعی (CAV) برای هر مدل به‌طور جداگانه ترسیم شد که در شکل ۱۰ قسمت ب) ارائه شده است. در تمامی مدل‌ها می‌توان یک رابطه‌ی دوخطی میان جابه‌جایی ماکزیم و سرعت مطلق تجمعی مشاهده نمود. بر اساس نمودارهای به‌دست آمده مشخص شد که مدل‌های تسلیح‌شده با میخ‌های مایل،  $CAV_y$  بزرگتری نسبت به مدل‌های مسلح با میخ‌های افقی دارند. این امر نشان





شکل ۱۲. مکانیزم گسیختگی و مدهای تغییرشکل برای مدل‌ها با میخ‌های افقی.

جانبی قابل توجهی در توده‌ی مسلح‌شده رخ داده و سپس توده‌ی خاک روی سطح لغزش به سمت بیرون و پایین حرکت می‌کند. مطابق شکل ۱۴، در فصل مشترک ناحیه‌های ۱ و ۲، تنش برشی نسبتاً بزرگی در خلال حرکات جانبی رفت و برگشتی شکل می‌گیرد. این تنش برشی که به علت پایداری تأمین‌شده توسط مکانیزم مهار میخ‌های ردیف‌های پایینی ایجاد می‌شود، موجب می‌شود که ناحیه ۱ به روی ناحیه ۲ اثر کرده و یک سطح گسیختگی در پشت ناحیه ۲ تشکیل شود. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، این شرایط بارگذاری مشابه با اثر یک دیوار حائل بر روی خاکریز خود به صورت نیروی رو به بالا یا رو به پایین است. توفنگجیان و ووستیک<sup>[۴۱]</sup> نشان دادند که در حالت استفاده از المان‌های تسلیح با سختی قابل ملاحظه، نیروی ایجاد شده در خاکریز (ناحیه ۱) در جهت رو به بالا عمل می‌کند. این امر به عنوان حالت گسیختگی مقاوم با اصطکاک دیوار منفی (۵-د) شناخته می‌شود و می‌تواند مشابه با آنچه که در نیمه‌ی پایینی دیوارهای این مطالعه مشاهده گردید، سبب شکل‌گیری یک سطح گسیختگی محدب در خاکریز گردد.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که هندسه مکانیزم گسیختگی در دیوار مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی یعنی موقعیت نقطه‌ی عطف سطح گسیختگی

میخ‌کوبی شده مطابقت دارد.<sup>[۴۱،۳۲،۳۰]</sup> این امر می‌تواند به سختی خمشی کافی رویه نسبت داده شود که موجب شد توده‌ی خاک مسلح به طور یکپارچه عمل نماید و همکاری مطلوبی میان تمامی ردیف‌های میخ اتفاق افتد تا پایداری دیوار تأمین گردد. مقایسه‌ی مدل‌ها نشان داد که علیرغم چیدمان‌ها و زاویه‌ی نصب مختلف میخ‌ها، الگوی گسیختگی در تمام مدل‌ها یکسان است. این الگو متشکل از یک گوه گسیختگی می‌باشد که توسط یک سطح سهموی شکل با نقطه‌ی عطف مشخص از بخش پایدار دیوار جدا می‌گردد. چنین الگویی توسط یزدان‌دوست<sup>[۳۲]</sup> و توفنگجیان و ووستیک<sup>[۴۱]</sup> نیز برای دیوار با میخ‌های تزریقی به ترتیب تحت شرایط  $g$  و  $Ng$  گزارش شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر سطوح خرابی، هندسه‌ی شماتیک این سطوح در شکل ۱۴ به طور ایده‌آل ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تمامی ردیف‌های میخ نقش موثری در شکل‌گیری الگوی خرابی مدل‌ها ایفا می‌کنند. در تمامی مدل‌ها، ردیف‌های میخ در نیمه‌ی فوقانی سبب انسجام توده‌ی خاک و تشکیل یک ناحیه‌ی یکپارچه (ناحیه ۱) شده و ردیف‌های میخ در نیمه‌ی تحتانی با تکیه بر ظرفیت بیرون‌کشیدگی‌شان در قالب یک مکانیزم مهار<sup>۹</sup> عمل می‌کنند (ناحیه ۲). همانطور که در آخرین گام بارگذاری مشاهده شد، با ادامه‌ی بارگذاری و فرارسیدن حد ظرفیت بیرون‌کشیدگی این میخ‌ها، جابه‌جایی



۴. کاربرد میخ‌های مایل به جای میخ‌های افقی، یک راهکار مؤثر در کاهش بزرگ‌نمایی شتاب در سیستم مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی بود. در صورت استفاده از میخ‌های کوتاه در نیمه‌ی بالایی دیوار، اثر بخشی این روش کمتر شده و نهایتاً با کاهش طول میخ به‌طور هم‌زمان در تمامی ردیف‌ها این اثر به حداقل رسید.

۵. روند افزایشی ضریب بزرگ‌نمایی شتاب ( $A_m$ ) در مقابل سرعت مطلق تجمعی (CAV) و کاهش آن در مقابل شتاب پیشینه زمین نشان داد که زلزله‌هایی با زمان تداوم بیشتر نسبت به زلزله‌هایی با شتاب بزرگتر می‌تواند اثرات مخرب بیشتری بر سازه‌های ساخته‌شده روی سیستم‌های مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی داشته باشد.

۶. هرچند که افزایش طول میخ به‌طور هم‌زمان در تمامی ردیف‌ها سبب کاهش قابل توجه در تغییر شکل جانبی گردید، اما با افزایش طول میخ به‌صورت موضعی در نیمه‌ی بالایی دیوار در حالت میخ‌های افقی و در نیمه‌ی پایینی دیوار در حالت میخ‌های مایل، همان میزان کاهش در تغییر شکل‌ها مشاهده شد.

۷. افزایش طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها دو راهکار جهت افزایش پایداری سیستم مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی تحت زلزله‌هایی با مدت دوام طولانی بود که گزینه‌ی افزایش طول، اثر بخشی بیشتری داشت.

۸. صفحه‌ی گسیختگی در دیوار مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی به صورت یک سطح سهمی‌شکل با نقطه‌ی عطف مشخص مشاهده شد که ابعاد آن با افزایش طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها افزایش یافت. همچنین، مد تغییر شکل غالب در این دیوارها ترکیبی از واژگونی و لغزش پایه بود که با افزایش زاویه‌ی میخ‌ها، پدیده‌ی لغزش پایه رفته رفته کم‌رنگ شد.

استفاده از میخ‌های مارپیچی می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش جابه‌جایی دیوار باشد.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آزمایش‌های میز لرزه  $1g$  بر روی مدل‌های دیوارهای مسلح‌شده با میخ مارپیچی صورت گرفت تا اثرات زاویه‌ی نصب و چیدمان میخ‌ها بر عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های خاک مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی ارزیابی شود. هشت مدل با مقیاس  $10:1$  و چیدمان و زاویه‌ی نصب مختلف میخ‌های مارپیچی ساخته شد و تحت تحریک‌هایی با زمان‌های تداوم مختلف قرار گرفت. نتایج با یکدیگر مقایسه گردید تا یافته‌های کمی و کیفی حاصل گردد که در ادامه به برجسته‌ترین آن‌ها اشاره شده است:

۱. نتایج نشان داد که افزایش طول و زاویه‌ی نصب میخ موجب کم‌رنگ‌تر شدن تغییرات محتوای فرکانسی می‌شود. این در حالی است که در این میان، نقش زاویه‌ی نصب مشهودتر است.

۲. کاهش زاویه‌ی نصب میخ‌ها موجب پررنگ‌تر شدن افت فرکانس پاسخ گردید. با افزایش طول میخ‌ها از  $0.5H$  به  $0.9H$ ، این کاهش تقریباً دو برابر شد. این اختلاف نشان می‌دهد که در حالت استفاده از میخ‌های مارپیچی بلندتر، فرکانس طبیعی بیشتر به تغییرات زاویه‌ی نصب میخ‌ها وابسته است.

۳. مشخص شد که برخلاف دیوارهای مسلح‌شده با میخ‌های مایل، در دیوارها با میخ‌های افقی، میخ‌های نصب‌شده در نیمه‌ی تحتانی نسبت به میخ‌های نیمه‌ی فوقانی نقش برجسته‌تری در بهبود صلبیت سازه دارند.

## پانویس‌ها

1. Soil Nailing
2. New Austrian Tunneling Method
3. Helical Nails
4. Pull-out Resistance
5. Cumulative Absolute Velocity (CAV)
6. Transient
7. Residual
8. Shear Bands
9. Anchoring Mechanism

## منابع (References)

1. Kovari, K., 2003. History of the sprayed concrete lining method-part II: milestones up to the 1960s. *Tunneling and underground space technology*, 18(1), pp. 71-83. doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00006-3.
2. Rabecq, S. and Toudic, P., 1974. Construction d'un mur de soutènement entre Versailles-Chantiers et Versailles-Matelots. Trans: construction of a retaining wall between Versailles-Chantiers and Versailles-Matelots. *Rev Gen Chemins Fer*, 93, pp. 232-7.

3. Felio, G., Vucetic, M., Hudson, M., Barar, O. and Chapman, R., 1990. Performance of soil nailed walls during the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake. In: *Proceedings of the 43rd Canadian Geotechnical Conference*, Quebec, Canada, pp. 165-173.
4. Tatsuoka, F., 1997. Performance of reinforced soil structures during the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake, Special Lecture. In: *Int. Symp. Earth Reinforcement*, IS Kyushu'96, Balkema, pp. 973-1008.
5. Ehrlich, M. and Silva, R.C., 2015. Behavior of a 31 m high excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss. *Engineering Geology*, 191, pp. 48-60. DOI.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.028.
6. Garzon-Roca, J., Capa-Guachon, V.E. and Torrijos, F.J., 2019. Designing soil-nailed walls using the Amherst wall considering problematic issues during execution and service life. *International Journal of Geomechanics*, 19(7), pp. 1-14. DOI.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001453
7. Turner, J.P. and Jensen, W.G., 2005. Landslide stabilization using soil nail and mechanically stabilized earth walls: case study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), pp. 141-150. DOI.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(141).

8. Bridle, R., 1989. Soil nailing-analysis and design. *Ground Engineering*, 22(6).
9. Schlosser, F., 1982. Behaviour and design of soil nailing. In: *Proc. of Int. Symp., Held at Asia Institute of Technology*, pp. 399-419.
10. Su, L.-J., Chan, T.C., Yin, J.-H., Shiu, Y. and Chiu, S., 2008. Influence of overburden pressure on soil-nail pullout resistance in a compacted fill. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(9), pp. 1339-1347. DOI.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:9(1339).
11. Wang, Q., Ye, X., Wang, S., Sloan, S.W. and Sheng, D., 2017. Experimental investigation of compaction-grouted soil nails. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(12), pp. 1728-1738. DOI.org/10.1139/cgj-2017-0063.
12. Ye, X., Wang, S., Li, Q., Zhang, S. and Sheng, D., 2020. Negative effect of installation on performance of a compaction-grouted soil nail in poorly graded stockton beach sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(8), pp. 04020061. DOI.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002301.
13. Yin, J.-H. and Zhou, W.-H., 2009. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(9), pp. 1198. DOI.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000045.
14. Zhou, Y., Cheuk, C. and Tham, L., 2009. Numerical modelling of soil nails in loose fill slope under surcharge loading. *Computers and Geotechnics*, 36(5), pp. 837-850. DOI.org/10.1016/j.compgeo.2009.01.010.
15. Bobbitt, D., 1996. Chance soil screw retention wall system report. Chance Civil Construction, Centralia, Mo.
16. Sharma, P., Rawat, S. and Gupta, A.K., 2021. Laboratory investigation of pullout behavior of hollow and solid shaft helical nail in frictional soil. *Acta Geotechnica*, 16(4), pp. 1205-1230. DOI.org/10.1061/9780784412787.171.
17. Tokhi, H., Ren, G. and Li, J., 2018. Laboratory pullout resistance of a new screw soil nail in residual soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(5), 609-619. DOI.org/10.1139/cgj-2017-0048.
18. Ye, X., Wang, S., Zhang, S., Xiao, X. and Xu, F., 2020. The compaction effect on the performance of a compaction-grouted soil nail in sand. *Acta Geotechnica*, 15(10), pp. 2983-2995. DOI.org/10.1007/s11440-020-01017-4.
19. Deardorff, D., Moeller, M. and Walt, E., 2010. Results of an instrumented helical soil nail wall. In: *Earth Retention Conference 3*, pp. 262-269.
20. FHWA, 2015. Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls - Reference Manual, FHWA-NHI-14-007, FHWA Washington, D.C.
21. Sharma, M., Choudhury, D., Samanta, M., Sarkar, S. and Annapareddy, V.R., 2020. Analysis of helical soil-nailed walls under static and seismic conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(6), pp. 815-827. DOI.org/10.1139/cgj-2019-0240.
22. Zahedi, P., Rezaei-Farei, A. and Soltani-Jigheh, H., 2021. Performance Evaluation of the Screw Nailed Walls in Tabriz Marl. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(1), pp. 1-15. DOI.org/10.1007/s40891-020-00247-6.
23. Mahmoudi-Mehrizi, M.-E., Ghanbari, A. and Sabermahani, M., 2022. The study of configuration effect of helical anchor group on retaining wall displacement. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(2), pp. 598-612. DOI.org/10.1080/17486025.2020.1827166.
24. Iai, S., 1989. Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field. *Soils and Foundations*, 29(1), pp. 105-118. DOI.org/10.3208/sandf1972.29.105.
25. Wood, D.M., 2004. Geotechnical modeling. Taylor & Francis Group, London.
26. FSI, 2014. Technical manual: helical piles and anchors, hydraulically driven push piers, polyurethane injection & supplemental support systems, 2nd ed. Foundation Support Works Omaha.
27. Tokhi, H., Ren, G. and Li, J., 2016. Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand. *Computers and Geotechnics*, 78, pp. 144-154. DOI.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.009.
28. Jahed Orang, M., Motamed, R., Prabhakaran, A. and Elgamal, A., 2021. Large-scale shake table tests on a shallow foundation in liquefiable soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(1), pp. 04020152. DOI.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002427.
29. Safaei, A.M., Mahboubi, A. and Noorzad, A., 2021. Experimental investigation on the performance of multi-tiered geogrid mechanically stabilized earth (MSE) walls with wrap-around facing subjected to earthquake loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1), pp. 130-145. DOI.org/10.1016/j.geotextmem.2020.08.008.
30. Sahoo, S., Manna, B. and Sharma, K., 2021. Shaking table tests to evaluate the seismic performance of soil nailing stabilized embankments. *International Journal of Geomechanics*, 21(4), pp. 04021036. DOI.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001981.
31. Xu, P., Hatami, K. and Jiang, G., 2020. Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), pp. 82-97. DOI.org/10.1016/j.geotextmem.2019.103507.
32. Yazdandoust, M., 2018. Seismic performance of soil-nailed walls using a 1 g shaking table. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(1), pp. 1-18. DOI.org/10.1139/cgj-2016-0358.
33. Huang, C.-C., 2019. Seismic responses of vertical-faced wrap-around reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 26(2), 146-163. DOI.org/10.1680/jgein.18.00044.
34. Xu, P., Hatami, K. and Jiang, G., 2020. Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads. *Geosynthetics International*, 27(4), pp. 364-378. DOI.org/10.1680/jgein.20.00001.



35. Zheng, Y., Sander, A.C., Rong, W., Fox, P.J., Shing, P.B. and McCartney, J.S., 2018. Shaking table test of a half-scale geosynthetic-reinforced soil bridge abutment, *Geotechnical Testing Journal*, 41(1), pp. 20160268-20160268. DOI.org/10.1520/GTJ20160268.
36. Yazdandoust, M., 2017. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, pp. 216-232. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.011.
37. Eftekhari, Z. and Panah, A.K., 2021. 1-g shaking table investigation on seismic performance of polymeric-strip reinforced-soil retaining walls built on rock slopes with limited reinforced zone. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, pp. 106758. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2021.106758.
38. El-Emam, M.M. and Bathurst, R.J., 2007. Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), pp. 33-49. DOI.org/10.1016/j.geotexmem.2006.09.001.
39. Guler, E. and Selek, O., 2014. Reduced-scale shaking table tests on geosynthetic-reinforced soil walls with modular facing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(6), pp. 04014015. DOI.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001102.
40. Hong, Y.-S., Chen, R.-H., Wu, C.-S. and Chen, J.-R., 2005. Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), pp. 1264-1279. DOI.org/10.1139/t05-055.
41. Tufenkjian, M.R. and Vucetic, M., 2000. Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), pp. 227-235. DOI.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(227).