

بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی

مجید یزدان دوست^۱، رضا ملایی^۲، حمیدرضا صبا^{۳*}

- ۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم
- ۲- پژوهشگر، اداره کل اموال و املاک، بنیاد مستضعفان انقلاب اسلامی، گیلان، ایران
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- M.yazdandoust@qom.ac.ir

۲- mollaiei.reza585@gmail.com

۳- hr.saba@tafreshu.ac.ir

* حمیدرضا صبا، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران
ایمیل: hr.saba@tafreshu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

چکیده

در این مطالعه، با استفاده از آزمایش‌های میزلرزه به بررسی اثر نحوه‌ی چیدمان و طول میخ بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی پرداخته شد. نتایج نشان داد که اگر چه افزایش طول میخ بطور همزمان در تمامی ردیف‌ها سبب بهبود قابل توجهی در رفتار لرزه‌ای سیستم می‌شود اما می‌توان همین اثر بهبود دهنده را تنها با افزایش طول میخ‌ها در نیمه‌ی بالایی و تحتانی دیوار به ترتیب برای میخ‌های افقی و مایل بدست آورد. همچنین مشخص شد که کاربرد میخ‌های مایل به جای میخ‌های افقی یک راهکار مناسب برای کاهش بزرگ‌نمایی شتاب و تغییرات بوجود آمده در محتوی فرکانس می‌باشد. میزان اثربخشی این راهکار هنگام استفاده از میخ‌های کوتاه در نیمه‌ی فوقانی دیوار کاهش یافت و نهایتاً با کاهش طول میخ‌ها در سراسر ارتفاع دیوار به حداقل رسید. از سوی دیگر، میخ‌های نصب شده در نیمه‌ی پایینی دیوار بعنوان مؤثرترین المان‌های تسلیح بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های افقی شناسایی شده درحالی‌که در هنگام نصب مایل میخ‌ها این امر کاملاً معکوس بود.

کلمات کلیدی

دیوار میخ‌کوبی، میخ مارپیچی، میزلرزه، مکانیزم گسیختگی، عملکرد لرزه‌ای.

Experimental investigation on the seismic behavior of helical-soil nailed walls

Abstract:

Helical nails are a new type of reinforcement elements that have been widely used during the last decade. This has caused that despite their widespread use, the seismic behavior of geotechnical structures reinforced by them is still unknown. Therefore, it was attempted in the present study to evaluate the effects of some structural parameters on the dynamic performance of helical soil-nailed walls (HSNWs) using shaking table tests. For this purpose, eight reduced-scale wall models were constructed with different inclinations, lengths, and arrangements of helical nails and then subjected to input excitations with different durations. The response of each model to base excitation was determined in the form of fundamental frequency, acceleration amplification, facing displacement, and failure mechanism. The results showed that although a uniform increase in the nail length along the wall height significantly improved the seismic performance of the HSNWs, this improvement could also be achieved to some extent by increasing the length of the nails locally in the lower and upper halves of the walls reinforced by horizontal and inclined nails, respectively. The use of inclined nails instead of horizontal ones was an efficient solution to reduce the lateral displacement, the acceleration amplification, and changes in the frequency content. The effectiveness of this solution reduced with the use of shorter nails in the upper half of the wall and eventually minimized by reducing the length of the nails across the wall height. The nails located in the lower half of the wall were identified as having the greatest effect on the seismic performance of HSNWs when horizontal nails were used. The opposite occurred when inclined nails were used. A parabolic failure surface with a specific inflection point was observed to be the potential failure surface of the HSNW. The dimensions of the potential failure surface increased with an increase in the length and inclination of nails. Also, a combination of overturning and base sliding was identified as the predominant deformation mode in HSNWs, although the base sliding mode faded with an increase in the nail inclination.

Keywords: Helical soil-nailed wall; Shaking table test, Failure mechanism, Seismic performance.

۱- مقدمه

میخ کوبی خاک^۲ یکی از روش‌های تسلیح برجای خاک است که برگرفته از سیستم مهار سنگ در روش تونل‌سازی جدید اتریشی^۳ می‌باشد [۱]. در این روش، که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ برای پایدارسازی موقت در شیب‌ها، ترانشه‌ها و عملیات حفاری معرفی گردید، المان‌های تسلیح بدون پیش‌تندگی در توده‌ی خاک نصب می‌گردد [۲]. رفتار مطلوب سیستم‌های میخ‌کوبی شده در درازمدت و همچنین عملکرد لرزه‌ای مناسب آنها در در دهه‌های اخیر موجب شده میخ‌کوبی بعنوان یک روش دائمی پایدارسازی خاک مطرح گردد [۳-۷].

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 افزایش یافته که این امر سبب بهبود پایداری و کنترل تغییرشکل‌ها می‌گردد. بنابراین اندرکنش میخ و خاک، که به روش نصب میخ‌ها بستگی دارد، اثرات مؤثری بر عملکرد سیستم میخ‌کوبی شده دارد [۸ و ۹]. دو روش اصلی نصب میخ‌ها شامل تزریق دوغاب سیمانی در سوراخ حفاری شده پیرامون یک آرماتور طولی و همچنین شلیک میخ‌ها به خاک با استفاده از تفنگ‌های بادی قدرتمند می‌باشد. رفتار میخ‌های تزریقی وابستگی زیادی به کیفیت دوغاب داشته و در شرایطی که امکان تزریق صحیح دوغاب وجود نداشته باشد (مثلاً در خاک با نفوذپذیری بالا، ناممکن بودن تامین فشار کافی دوغاب و سطح بالای آب زیرزمینی) و یا اگر زمان عمل‌آوری و گیرش سیمان طولانی‌تر از فرصت لازم برای پایدارسازی باشد، کارایی این روش کاهش خواهد یافت [۱۰-۱۴]. در چنین شرایطی، یک سری از المان‌های میخ جدید معرفی شده که نیاز به تزریق دوغاب نداشته و نوع اندرکنش خاک و میخ در آنها متفاوت است. این نوع میخ‌ها که به میخ‌های مارپیچی^۴ معروف هستند، عموماً از یک شفت (لوله) محوری با تعدادی صفحات مارپیچ متصل به آن تشکیل می‌شوند. برخلاف میخ‌های تزریقی، که براساس مکانیزم اصطکاک عمل می‌کند، در میخ‌های مارپیچی فشار مقاوم بسیج‌شده در جلوی صفحات مارپیچ است که

مقاومت بیرون‌کشیدگی را در این نوع میخ‌ها تأمین می‌کند. از آنجا که این نوع میخ با اعمال گشتاور در خاک فرو می‌رود، دیگر نیازی به حفاری سوراخ نصب نبوده و در نتیجه سرعت نصب و دست‌خوردگی خاک به حداقل می‌رسد. این نوع میخ‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ به منظور پایدارسازی یک دیوار با ارتفاع ۶/۷ متر به کار رفت [۱۵]. از آن زمان تاکنون کاربرد میخ‌های مارپیچی در پروژه‌های پایدارسازی به طور گسترده‌ای افزایش یافته است. علیرغم مصرف گسترده‌ی این نوع میخ در انواع سیستم‌های خاکی، بعلت کمبود مطالعات در این زمینه هنوز عملکرد سازه‌های مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی بطور کامل شناخته شده نیست. مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که بررسی رفتار سازه‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی انگشت‌شمار بوده و در سایر مطالعات نیز به تعیین مقاومت بیرون‌کشیدگی المان‌های میخ پرداخته شده است [۱۶-۱۸]. یکی از این مطالعات توسط دیردروف^۵ و همکاران [۱۹] بر روی دو دیوار میخ‌کوبی شده با میخ مارپیچی در مقیاس واقعی بوده است. آنها دریافتند که بسیج نیرو در میخ‌های مارپیچی در محدوده‌ی آیین‌نامه می‌باشد [۲۰]. پژوهش انجام شده توسط شارما^۶ و همکاران [۲۱] تنها مطالعه لرزه‌ای انجام شده بر روی رفتار سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی می‌باشد. آنها در این مطالعه عددی دریافتند که با افزایش زاویه‌ی نصب میخ‌ها و نسبت گام مارپیچ‌ها به قطر آن پایداری لرزه‌ای سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی کاهش می‌یابد. در یک مدل‌سازی عددی دیگر توسط زاهدی^۷ و همکاران [۲۲] مشخص گردید که میخ‌های مارپیچی نسبت به میخ‌های تزریقی تأثیر بیشتری بر کاهش جابجایی دیوار دارد، به ویژه در طی عملیات حفاری این اثرات مثبت نمایان‌تر است. محمودی مهریزی^۸ و همکاران [۲۳] در یک سری آزمایش مدل فیزیکی نشان دادند که چیدمان و تعداد صفحات مارپیچ نسبت به تعداد میخ‌ها اثر بیشتری بر افزایش ظرفیت باربری فونداسیون واقع شده به روی دیوارهای سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی دارد.

^۵ Deardorff

^۶ Sharma

^۷ Zahedi

^۸ Mahmoudi-Mehrizi

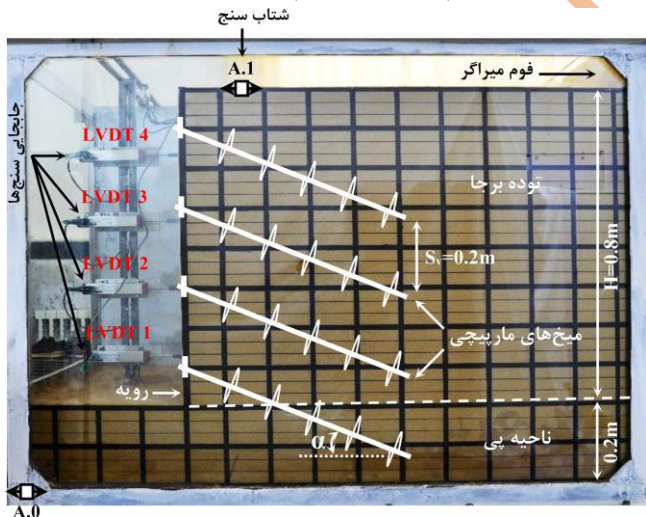
^۲ soil nailing

^۳ New Austrian Tunnelling Method

^۴ helical nails

تابعی از نوع خاک بوده و مقدار آن برای خاک‌های دانه‌ای ۰/۵ توصیه شده است [۲۵].

در این مطالعه از یک مدل دیوار ۰/۸ متری با مقیاس ۱:۱۰ بگونه‌ای استفاده شد که نماینده یک دیوار واقعی به ارتفاع ۸ متر باشد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در زیر بدنه دیوار از یک پی به ضخامت ۰/۲ متر استفاده شد تا امکان نشست‌ها و لغزش‌های جانبی احتمالی برای مدل دیوار فراهم شود. همچنین، علاوه بر استفاده از یک فوم میراگر به ضخامت ۴ سانتیمتر در انتهای مدل جهت کاهش بازتاب امواج به داخل مدل حین بارگذاری لرزه‌ای، فاصله رویه‌ی دیوار تا انتهای جعبه آزمایش نیز به گونه‌ای انتخاب شد تا تداخلی بین صفحات گسیختگی و دیواره‌ی جعبه ایجاد نشود. این فاصله و ضخامت پی بر اساس یکسری آنالیز حساسیت انجام شده توسط نرم افزار ۲D FLAC تعیین شد.



شکل ۱: نمایی از مدل دیوار مسلح شده با میخ‌های مارپیچی

همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است، دو چیدمان برای نصب میخ‌ها در نظر گرفته شد. در چیدمان اول، میخ‌های افقی به طول یکسان در امتداد ارتفاع دیوار (یکنواخت) با دو نسبت L/H برابر با ۰/۵ و ۰/۹ انتخاب شدند (به ترتیب مدل‌های شماره ۱ و ۲). این نسبت‌ها به عنوان مقادیر حداقل و حداکثر در آیین نامه توصیه شده‌اند [۲۰]. در چیدمان دوم، از میخ‌های افقی با طول متفاوت در امتداد ارتفاع دیوار (غیریکنواخت) استفاده شد. طول میخ‌های نصب شده در نیمه‌ی بالایی و پایینی دیوار در مدل شماره ۳ به ترتیب برابر با ۰/۹H و ۰/۵H بوده و در مدل ۴ به ترتیب

بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم‌های مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی تنها محدود به مطالعات شارما^۹ و همکاران [۲۱] می‌شود و در نتیجه لازم است مطالعات بیشتری در این زمینه انجام گیرد تا درک صحیح و جامع‌تری از رفتار لرزه‌ای این سیستم‌ها حاصل گردد. از اینرو، در مطالعه حاضر به ارزیابی اثرات دو پارامتر سازه‌ای مهم بر رفتار لرزه‌ای سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی با استفاده از میز لرزه ۱g پرداخته شد. در این راستا، هشت مدل مختلف با مقیاس ۱:۱۰ متشکل از دو زاویه‌ی نصب میخ در دو طول متفاوت و دو نوع چیدمان میخ‌کوبی مختلف ساخته و تحت بارگذاری دینامیکی با زمان تداوم‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. پاسخ‌های جابجایی جانبی رویه، بزرگنمایی شتاب، و مکانیزم گسیختگی در هر مدل به تحریک‌های ورودی تعیین و با مقایسه‌ی آنها به بررسی اثرات زاویه‌ی نصب و چیدمان میخ‌ها پرداخته شد.

۲- آزمایش مدل‌های فیزیکی

آزمایش‌های انجام گرفته به روی مدل‌های فیزیکی با استفاده از میز لرزه‌ی موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه بناب انجام شد. دستگاه مذکور شامل یک جعبه‌ی آزمایش صلب به ابعاد ۱۸۲ × ۱۲۳ × ۸۰ سانتیمتر و یک جک سروو هیدرولیک با قابلیت ارتعاش مدل تا وزن ۵۰ کیلو نیوتن و فرکانس حداکثر ۱۰ هرتز بود. دیواره‌های این جعبه که توسط یک قاب فلزی مهار شده بودند، از ورق شفاف پلکسی‌گلاس بود تا امکان رؤیت تغییر شکل‌های مدل فراهم شود.

۱-۲- مشخصات و هندسه مدل

بدلیل آنکه رفتار مکانیکی خاک به سطح تنش وابسته است باید مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس براساس قوانین مقیاس در شرایط شتاب ثقل ۱g تعیین گردند. در این راستا، از قوانین مقیاسی که در ابتدا توسط ایایی^{۱۰} [۲۴] معرفی و بعدها توسط وود^{۱۱} [۲۵] توسعه یافت، استفاده گردید. در قوانین تشابه توسعه یافته، از یک پارامتر بی بعد (λ) استفاده می‌شود که

^۹ Sharma
^{۱۰} Iai
^{۱۱} Wood

سختی خاک ۳/۴ تا ۳/۸ برابر کوچکتر از سختی تعیین شده تحت تنش محصورکننده‌ی برابر با مدل واقعی بود. این نسبت در محدوده‌ی روابط مقیاس برای سختی خاک در آزمایشات ۱g با مقیاس ۱:۱۰ است $(E_{S(Prototype)} = (10)^{\alpha} \cdot E_{S(Model)})$. 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.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
چسبندگی (kPa)	۴	نسبت منافذ بیشینه	۰/۷۸۳
زاویه اصطکاک بیشینه (°)	۴۵-۴۱	نسبت منافذ کمینه	۰/۴۷۸
زاویه اصطکاک ماندگار (°)	۳۷-۳۵	اندازه متوسط (mm)	۰/۲۸۵
زاویه اتساع (°)	۷-۵	چگالی ذرات جامد	۰/۶۵۴
سختی سکانتی در $\epsilon=1$ (MPa)	۴/۸۹-۱/۰۳	نسبت سیلت (%)	۶

۲-۲-۲-المان های میخ

میخ‌های مارپیچ متداول معمولاً متشکل از یک شفت میانی به قطر ۳/۸ تا ۸/۹ سانتیمتر بوده که صفحات مارپیچ در فواصل یکسان به آن جوش شده اند. 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 بیرون کشیدگی^{۱۲} 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 ۲/۵ 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، یک سری آزمایش بیرون کشیدگی نیز به روی میخ‌های کوچک‌مقیاس با نسبت‌های مختلف گام به قطر صفحات مارپیچ (S_{hx}/D_h) انجام شد تا مشخصات هندسی مناسب صفحات مارپیچ تعیین گردد. نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی بر روی میخ‌های مارپیچ با مقیاس واقعی که توسط تخی^{۱۳} و همکاران [۲۷] گزارش شده بود نیز به عنوان مرجع اصلی جهت مقیاس کردن میخ‌ها استفاده گردید. با

^{۱۲} pull-out resistance

^{۱۳} Tokhi

۰,۹H و ۰,۵H بود. در مدل‌های ۵ تا ۸ از همان دو نوع چیدمان اما با زاویه‌ی نصب ۳۰ درجه استفاده شد $(\alpha = 30^\circ)$. با انتخاب این زاویه که برابر با حداکثر مقدار توصیه شده برای نصب میخ‌های مارپیچی می‌باشد، امکان بررسی تأثیر زاویه‌ی نصب میخ بر رفتار سیستم میخ‌کوبی شده با میخ‌های مارپیچی فراهم شد [۲۶]. در تمامی مدل‌ها، المان‌های میخ بر اساس یک الگوی مربعی و با فواصل افقی و قائم برابر با ۰/۱۵ و ۰/۲ متر نصب شدند. این فواصل در محدوده‌ی توصیه شده برای میخ‌های مارپیچی می‌باشد [۲۶].

جدول ۱: مشخصات مدل‌های دیوار

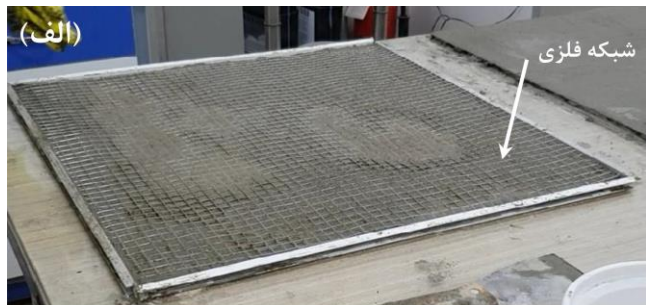
شماره مدل	وضعیت میخ‌ها در نیمه فوقانی دیوار		وضعیت میخ‌ها در نیمه تحتانی دیوار	
	طول	زاویه (°)	طول	زاویه (°)
۱	۰,۵H	۰	۰,۵H	۰
۲	۰,۹H	۰	۰,۹H	۰
۳	۰,۹H	۰	۰,۹H	۰
۴	۰,۵H	۰	۰,۹H	۰
۵	۰,۵H	۳۰	۰,۵H	۳۰
۶	۰,۹H	۳۰	۰,۹H	۳۰
۷	۰,۹H	۳۰	۰,۵H	۳۰
۸	۰,۵H	۳۰	۰,۹H	۳۰

۲-۲-۲-اجزای مدل دیوار خاک میخ‌کوبی شده

۲-۲-۱-خاک

از آنجا که اجرای میخ‌های مارپیچی در خاک‌های غیرچسبنده و خیلی سست و ماسه‌های خیلی متراکم مناسب نمی‌باشد، برای ساخت بدنه‌ی 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 سیلت دار با چگالی خشک حداکثر و حداقل به ترتیب برابر با ۱۶/۶ و ۱۴/۶ 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،

شد. تصویری از این رویه و فرآیند آزمایش‌های خمشی انجام شده در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات به ترتیب در اشکال (۴) و (۵) ارائه شده اند.



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

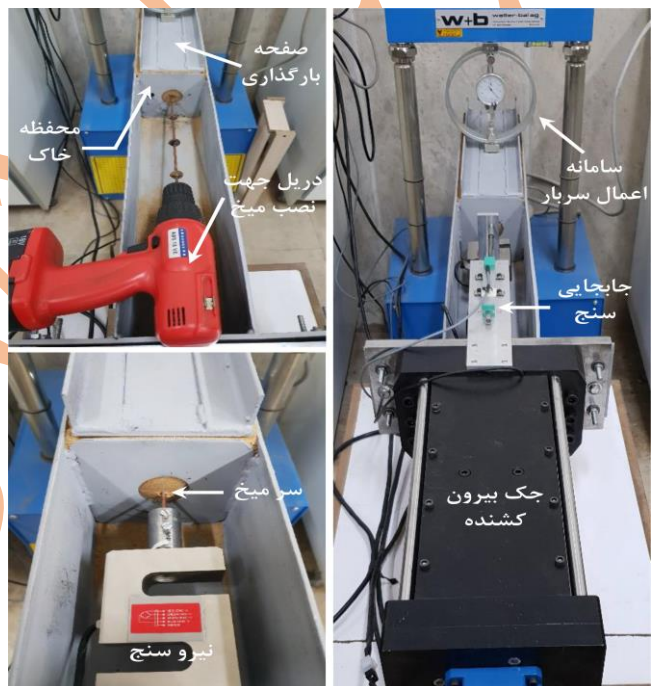
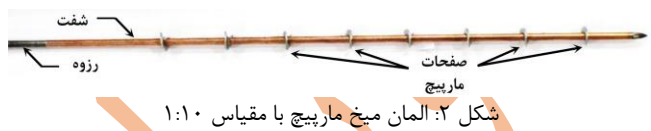


شکل ۵: تصویری از: الف) المان رویه کوچک مقیاس؛ ب) المان رویه واقعی

۳-۲-۳- روند ساخت مدل

جهت شبیه‌سازی روند ساخت واقعی دیوارهای میخ‌کوبی شده که از بالا به پایین اجرا می‌شود، ابتدا رویه‌ی دیوار توسط یک

توجه به قوانین مقیاس حاکم بر ظرفیت بیرون کشیدگی، در نهایت صفحات مارپیچ به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر انتخاب شدند تا با فواصل ۳۳ میلی‌متر به شفت متصل گردند. تصویری از میخ مارپیچ کوچک مقیاس و فرآیند آزمایش‌های بیرون کشیدگی انجام شده در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات به ترتیب در اشکال (۲) و (۳) ارائه شده اند.



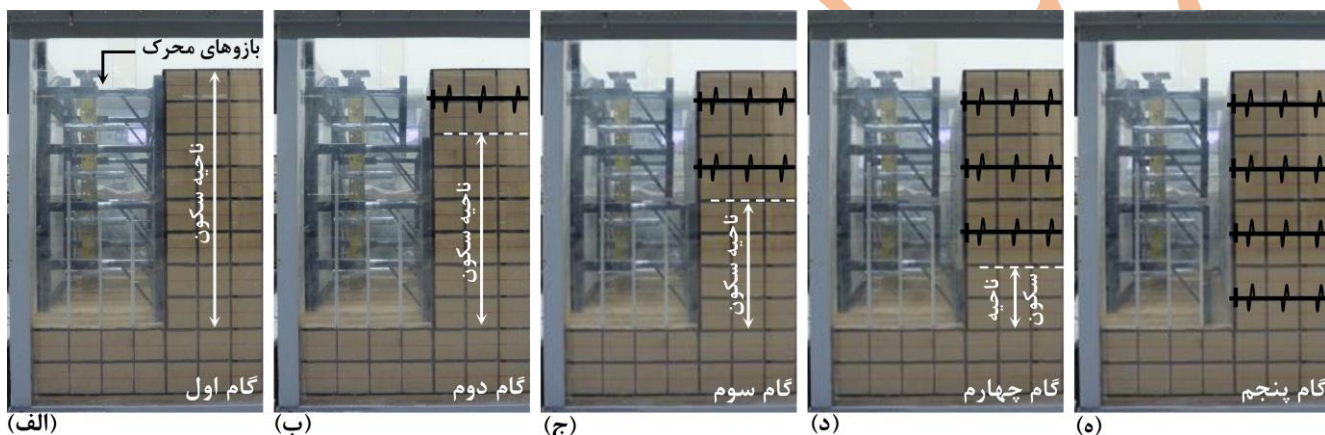
شکل ۳: فرآیند آزمایش بیرون کشیدگی بر روی میخ‌های کوچک مقیاس

۲-۲-۳- المان رویه

بدلیل آنکه رویه در پایداری دیوار میخ‌کوبی شده به عنوان یک المان خمشی رفتار می‌کند، در نتیجه مقاومت خمشی آن بعنوان معیار اصلی جهت انتخاب رویه‌ی کوچک مقیاس در نظر گرفته شد. از اینرو، با توجه به قوانین مقیاس حاکم بر مقاومت خمشی $(M_{prototype} = N^2 \cdot M_{model})$ و انجام یکسری 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

می‌شد. جهت ساخت ناحیه‌ی برجا، مصالح خاکی با رطوبت ۶ درصد در لایه‌های ۰/۰۵ متری به صورت سست داخل محفظه ریخته و با استفاده از یک کوبه متراکم می‌شد تا به ضخامت مورد نظر (۰/۳۳ متر) برسد. این تکنیک که به روش کوبش مرطوب با کنترل حجم معروف است، یک روش متداول جهت ساخت مدل-های فیزیکی بشمار می‌رود [۲۸-۳۲]. همچنین، در پشت دیواره‌ی شفاف محفظه، لایه‌های افقی و قائمی از ماسه‌ی سیاه‌رنگ ریخته شد تا رؤیت تغییرشکل‌ها و نحوه‌ی تشکیل ناحیه‌های برشی ساده‌تر شود.

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-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-ب) تا (۶-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



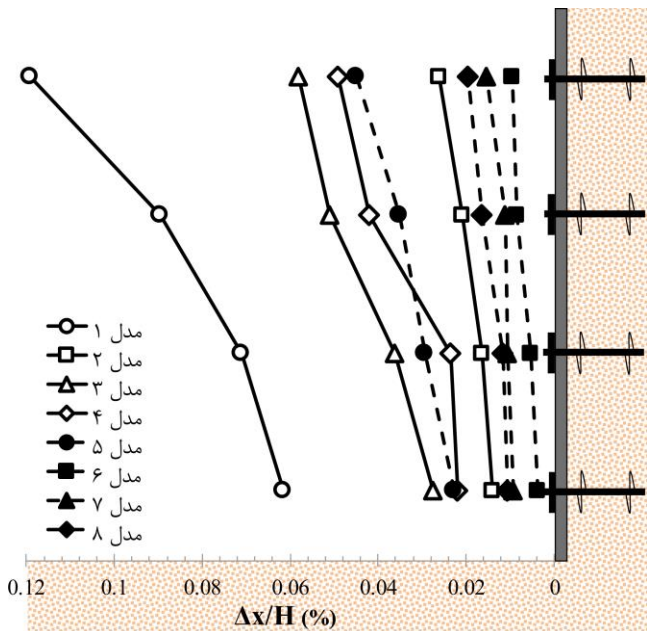
شکل ۶: شبیه‌سازی فرایند خاکبرداری با استفاده از سازه‌ی مهاری: (الف) گام اول: ساخت بدنه‌ی مدل؛ (ب) گام دوم: آزادسازی لایه‌ی اول و نصب میخ‌های ردیف اول؛ (ج) گام سوم: آزادسازی لایه‌ی دوم و نصب میخ‌های ردیف دوم؛ (د) گام چهارم: آزادسازی لایه‌ی سوم و نصب میخ‌های ردیف سوم؛ (ه) گام پنجم: آزادسازی لایه‌ی چهارم و نصب میخ‌های ردیف چهارم

۲-۴- ابزارگذاری و بارگذاری دینامیکی

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بمنظور اندازه‌گیری جابجایی افقی رویه از چهار سنسور جابجایی سطح (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. بمنظور تحریک مدل‌ها، از یک سری بار هارمونیک دوکی شکل متوالی با دامنه‌ی ثابت ۰.۵g 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

پس از اجرای خاک پشت دیوار، یک‌چهارم فوقانی دیوار آزاد و اولین ردیف میخ در فواصل افقی ۰/۱۵ 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 قرارداد شده تا زاویه کوبش میخ در حین نصب ثابت نگه‌داشته 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 ۲۵×۲۵×۵ میلی‌متر در انتهای میخ قراردادده 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.

اثر ناچیز بودن فشار همه جانبه در این بخش نشأت می‌گیرد، بطور چشمگیری با نصب مایل میخ‌ها جبران شد. این جبران بگونه‌ای بودن که سبب تغییر مد تغییر شکل از دوران به سرخوردگی شد.



شکل ۷: پروفیل‌های جابجایی افقی دیوار در مدل‌هایی با چیدمان مختلف میخ در پایان شبیه‌سازی خاکبرداری

۳-۲- عملکرد لرزه‌ای دیوار

۳-۲-۱- تغییرات محتوای فرکانسی

واقع شدن سازه بر روی یک سیستم نگهدارنده خاک امری است که مهندسان بعضاً با آن مواجه می‌شوند. در این شرایط، سیستم نگهدارنده به عنوان یک ساختگاه برای سازه محسوب شده و می‌بایستی پارامترهای زلزله طرح جهت طراحی لرزه‌ای سازه بر اساس پاسخ لرزه‌ای سیستم نگهدارنده تعیین شود. برای این منظور لازم است که تغییرات بوجود آمده در محتوای فرکانسی شتاب ورودی (تغییر فرکانس و تغییر شتاب پایه) از طریق تحلیل پاسخ شتاب در سطح خاکریز تخمین زده شود. علیرغم پررنگتر بودن اهمیت این موضوع در سیستم‌های خاک مسلح بدلیل انعطاف‌پذیری بالای آنها، تاکنون توجه اندکی به آن در این سیستم‌ها بالاخص سازه‌های خاک میخکوبی شده است. بنابراین در این مطالعه با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج قرار گرفته در سطح خاکریز دیوارها، به بررسی تغییرات محتوای فرکانسی شتاب ورودی در سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی پرداخته شد. بر این

را بر رفتار لرزه‌ای مدل‌ها ممکن ساخت. همچنین، فرکانس ۵ هرتز برای تحریک‌های ورودی انتخاب شد تا به قدر کافی از فرکانس طبیعی بدست آمده برای مدل‌ها فاصله داشته 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. براساس قوانین تشابه ارائه شده برای فرکانس در خاک‌های غیرچسبنده $(f)_{prototype} = \sqrt{N}^{1-\lambda/2} (f)_{model}$ ، فرکانس انتخاب شده برای تحریک ورودی متناظر با فرکانس غالب یک تحریک واقعی برابر با ۱ هرتز بود.

۳- نتایج و بحث

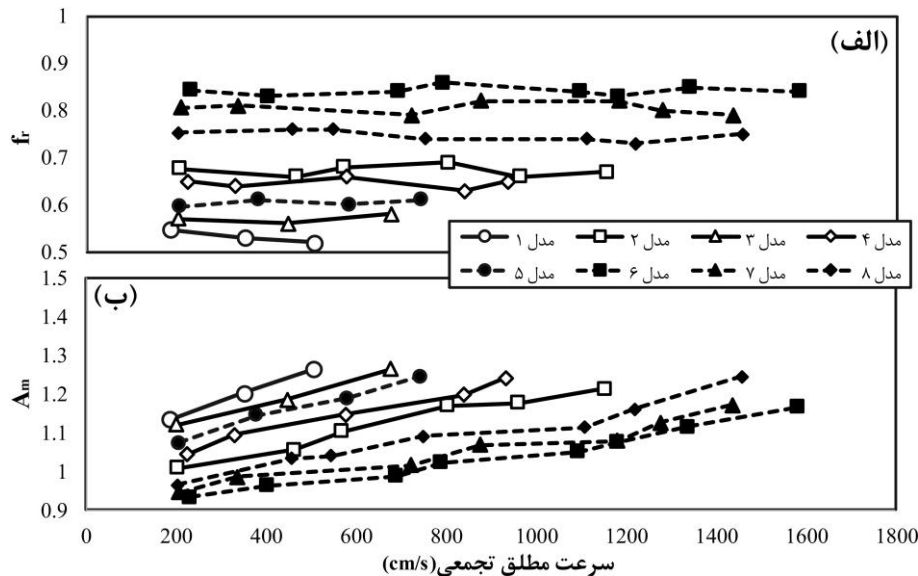
۳-۱- عملکرد استاتیکی دیوار

بمنظور 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 میخ در تمامی چیدمان‌ها موجب کاهش جابجایی 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 بصورت مایل هنگامی برجسته می‌شود که دیوار بواسطه نصب میخ‌های کوتاه بشدت 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 راه‌حل مناسب جهت کاهش جابجایی‌های دیوار باشد. همانطور که در شکل (۷) به وضوح دیده می‌شود، این راه حل کاملاً وابسته به زاویه نصب میخ می‌باشد بطوریکه هنگام نصب میخ بصورت افقی، افزایش طول میخ‌های واقع شده در نیمه تحتانی به مراتب موثرتر از افزایش طول میخ‌های فوقانی می‌باشد در حالیکه این موضوع هنگام نصب میخ بصورت مایل کاملاً برعکس می‌باشد. وقوع بیشترین جابجایی در تاج دیوار در تمام مدل‌ها فارغ از نوع چیدمان، نکته دیگری است که در شکل (۷) مشاهده می‌شود. این پدیده که از ضعف اندرکنش میخ‌های فوقانی با خاک در

^{۱۴} cumulative absolute velocity

شده در سطح خاکریز به فرکانس شتاب ورودی (f_r) در هر مرحله از بارگذاری، تغییرات ضریب بزرگنمایی شتاب و f_r در مقابل سرعت مطلق تجمعی تخمین و در شکل (۸) ارائه شده است.

اساس، با تعیین نسبت پاسخ شتاب حداکثر به بیشینه شتاب ورودی که ضریب بزرگنمایی شتاب (A_m) نامیده می‌شود [۳۳-۳۵] و همچنین تعیین نسبت فرکانس غالب شتاب نگاشت ثبت



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

۲۳/۹ درصدی در آفت در فرکانس تحریک ورودی شده است، درحالیکه در مدلهایی با میخ‌هایی (مدل‌های ۷ و ۸)، مقدار این کاهش به علت بلندتر شدن طول میخ‌ها در بالا و پایین دیوار به ترتیب حدود ۵۱/۲ و ۳۹/۱ درصد تخمین زده شد. این بدان معناست که چیدمان غیریکنواخت میخ‌های مایل منجر به رفتار صلب‌تر در سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی می‌شود. همچنین، برخلاف دیوارهای مسلح‌شده با میخ‌های مایل، میخ‌های نصب‌شده بصورت افقی در نیمه‌ی پایینی دیوار نسبت به نیمه‌ی بالایی نقش مؤثرتری بر افزایش صلبیت سازه دارد. این امر، که توسط یزدان‌دوست^{۱۵} و همکاران [۳۶] 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

مقایسه‌ی f_r مدل‌ها در شکل (۸) نشان می‌دهد که طول، چیدمان و زاویه‌ی نصب میخ‌ها بطور چشمگیری می‌تواند موجب تغییر فرکانس تحریک ورودی شود. بنابراین، با استفاده از این سه عامل می‌توان فرکانس تحریک ورودی به سازه را بر اساس شرایط مورد نیاز مدیریت نمود. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، کمترین کاهش در فرکانس تحریک ورودی مربوط مدل شماره ۶ می‌باشد که با چیدمانی یکنواخت از میخ‌های مایل با طول $0.9H$ مسلح شده بود. این کاهش که حدود 0.16 بود، در مدل شماره ۲ با میخ‌های افقی به 0.33 رسید. این رشد $0.51/5$ درصدی در مدل‌هایی با طول میخ $0.05H$ در حدود $10/8$ درصد تخمین زده شد. این اختلاف نشان‌دهنده‌ی آن است که در هنگام نصب میخ‌های مارپیچی بلند تغییرات محتوای فرکانسی بیشتر به تغییرات زاویه‌ی نصب میخ بستگی دارد. عامل مؤثر دیگر بر تغییرات محتوای فرکانسی چیدمان غیریکنواخت میخ‌ها بود که در دیوارها با میخ افقی و مایل دو اثر کاملاً متفاوت داشت. مقایسه‌ی مدل‌های ۳ و ۴ با مدل ۱ نشان می‌دهد که افزایش طول میخ افقی در نیمه‌ی بالایی و پایینی دیوار به ترتیب منجر به کاهش $6/5$ و

^{۱۵} Yazdandoust

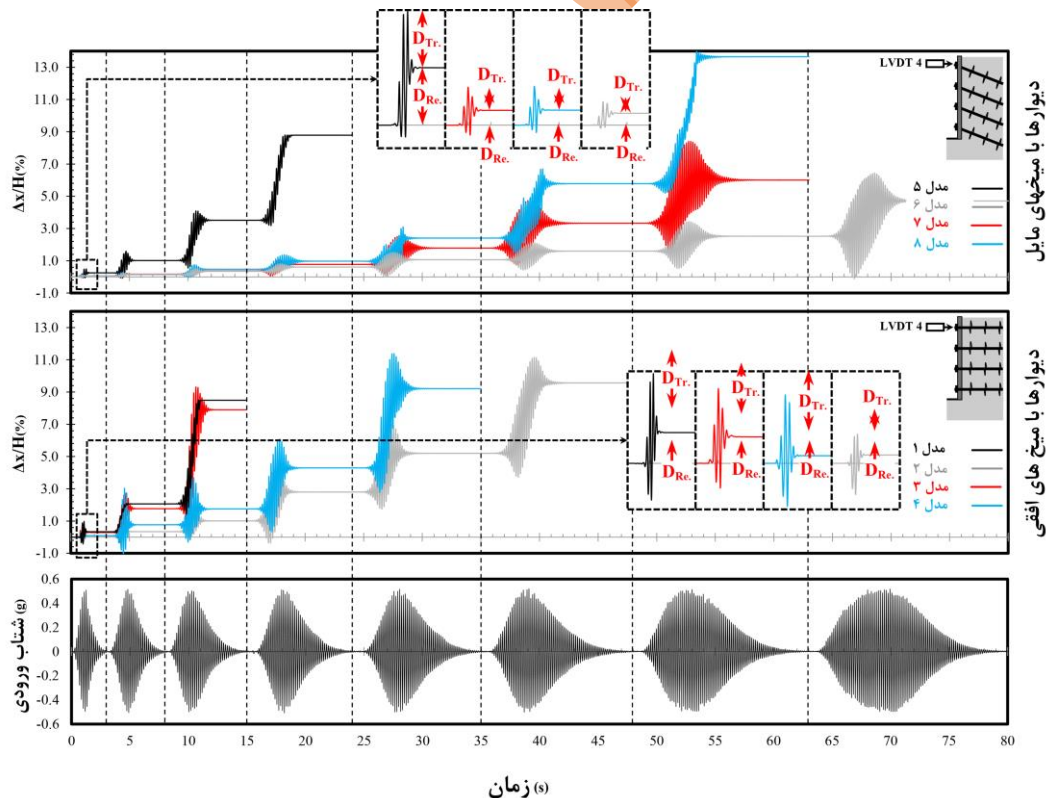
در کاهش ضریب بزرگنمایی شتاب کمتر نمایان شد و نهایتاً با کاهش همزمان طول میخ در تمامی ردیفها این اثر به حداقل رسید. طول میخ دومین عامل مؤثر بر توزیع بزرگنمایی شتاب در سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی بود و افزایش آن بطور کلی موجب کاهش ضریب بزرگنمایی شتاب گردید. چیدمان میخ‌ها سومین عامل تاثیرگذار 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 تاثیر بیشتری در کاهش ضریب بزرگنمایی شتاب داشت در حالیکه، این موضوع در حالت کاربرد میخ‌های مایل کاملاً برعکس بود.

۳-۲-۲- جابجایی رویه

تاریخچه زمانی جابجایی جانبی در تاج دیوار در گام‌های مختلف بارگذاری در شکل (۹) نشان داده شده است.

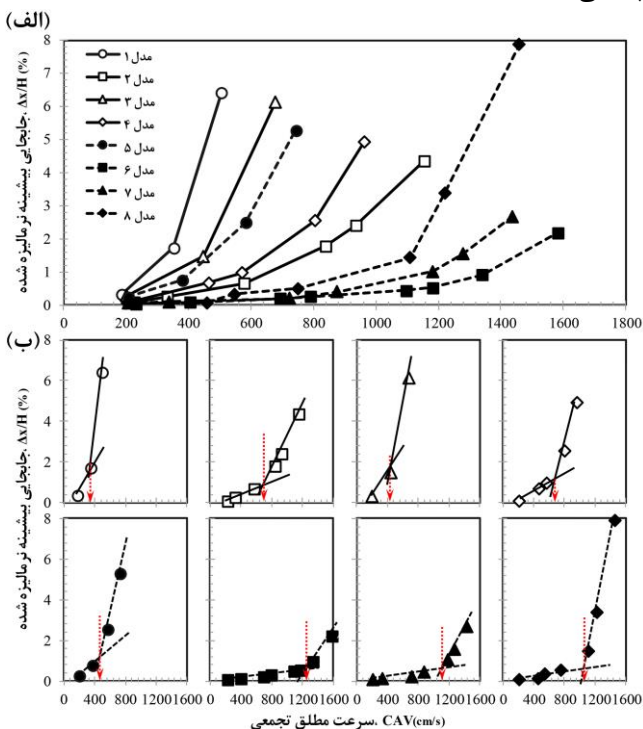
نقش مهمی در افزایش بزرگنمایی شتاب دارد. این در حالی است که در مطالعات پیشین روندی نزولی برای ضریب بزرگنمایی شتاب هنگام افزایش شتاب پایه گزارش شده است [۳۳ و ۳۹-۳۷]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در زلزله‌هایی با زمان تدام بلندتر اثرات مخرب بیشتری نسبت به زلزله با شتاب بالاتر در سازه‌های ساخته شده به 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 بجای 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



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

تأثیر نصب میخ‌های مایل به قدری زیاد است که علیرغم ظرفیت پایین بیرون کشیدگی میخ‌های فوقانی، این میخ‌ها نقش چشمگیری در جبران اثرات نامطلوب کاهش طول میخ‌ها در نیمه‌ی پایینی دیوار داشته‌اند. این در حالیست که در مدل ۳ مشاهده شد که افزایش طول میخ‌های افقی در نیمه‌ی بالایی دیوار اثربخشی چندانی نداشته‌است.



شکل ۱۰: (الف) تغییرات جابجایی افقی حداکثر در مقابل سرعت مطلق تجمعی؛ (ب) مقادیر سرعت مطلق تجمعی متناظر با آستانه گسیختگی در هر مدل

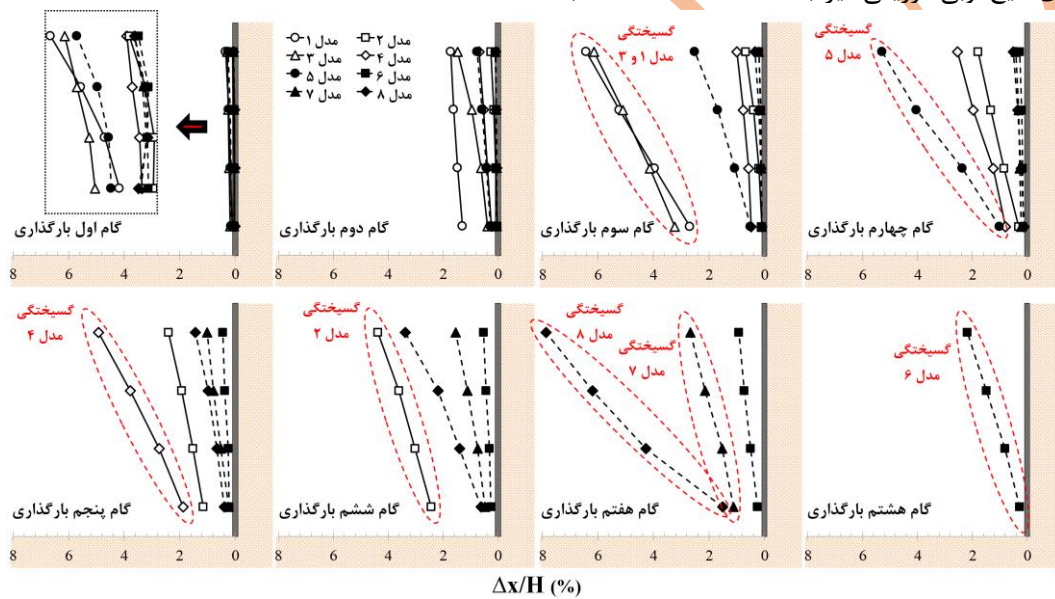
شکل (۱۱) نشان می‌دهد که بهترین عملکرد لرزه‌ای در سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی زمانی حاصل می‌شود که طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها بطور همزمان در تمام ردیف‌ها افزایش یابد. با اینکه افزایش طول میخ در تمامی ردیف‌ها نقش مهمی بر بهبود عملکرد سیستم میخ‌کوبی شده با میخ‌های مارپیچی دارد، این امر می‌تواند منجر به یک طراحی غیراقتصادی شود. بنابراین، چیدمان غیریکنواخت میخ‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی باشد [۲۰]. پروفیل‌های جابجایی‌های جانبی نشان می‌دهد که استفاده از میخ‌های بلندتر تنها در نیمه‌ی بالایی دیوار نیز می‌تواند راه حل مناسبی جهت کاهش طول مورد نیاز میخ‌ها باشد، درعین حال که عملکرد مطلوب دیوار را حفظ نماید. این نوع چیدمان، که

همانطور که دیده می‌شود، پاسخ جابجایی جانبی شامل دو بخش اصلی می‌شود: یک بخش پاسخ گذرا^{۱۶} (DT) و یک بخش پاسخ ماندگار^{۱۷} (DR). در گام اول بارگذاری، توزیع DR تقریباً با DT در تمامی مدل‌ها یکسان بود که نشان دهنده 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 موجب گردید تا بخش اعظمی از پاسخ جابجایی شامل جابجایی‌های ماندگار باشد. این پدیده در مراحل بعدی بارگذاری افزایش یافت و ورود به فاز پلاستیک و وقوع باندهای برشی^{۱۸} در بدنه‌ی مدل‌ها مشاهده گردید. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، نصب میخ‌های مایل علاوه بر کاهش جابجایی گذرا سبب کمتر شدن جابجایی ماندگار نیز شده‌است. با کاهش طول میخ‌ها، جابجایی 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-الف) نیز به وضوح قابل مشاهده می‌باشد، بدان معناست که اثر نامطلوب کاربرد میخ‌های کوتاه در عملکرد سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی را می‌توان با نصب زاویه‌دار میخ‌ها جبران نمود.

پروفیل‌های جابجایی جانبی دیوار در گام‌های مختلف بارگذاری در شکل (۱۱) ارائه شده‌است. با مقایسه‌ی مدل‌ها مشخص شد که استفاده از رویه با سختی خمشی کافی سبب می‌شود که توده‌ی خاک میخ‌کوبی شده بصورت یکپارچه رفتار نموده و همکاری مناسبی میان تمام ردیف‌های میخ شکل گیرد 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 شده‌است. مقایسه‌ی مدل‌های ۴ و ۸ نشان می‌دهد که این امر با نصب میخ‌های مایل بیشتر قوت می‌گیرد. در مدل ۷ مشاهده می‌شود که

¹⁶ transient
¹⁷ residual
¹⁸ shear bands

معنای این است که باید چیدمان میخ‌های مارپیچی براساس 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 میخ بطور همزمان در تمامی ردیفها علاوه بر آنکه کاهش جابجایی قبل از گسیختگی را در پی دارد موجب کنترل سطح جابجایی‌ها در لحظه‌ی گسیختگی 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- الف)).



شکل ۱۱: پروفیل‌های جابجایی افقی دیوار در مدل‌هایی با چیدمان مختلف میخ در گام‌های مختلف بارگذاری

آزمایش‌های میزلرزه که توسط هانگ^{۱۹} و همکاران [۴۰] و یزدان‌دوست [۳۲] انجام گرفت مشخص شد که کاربرد میخ‌های تزریقی مایل و بلند سبب افزایش شتاب ورودی تسلیم می‌گردد. از آنجاکه زمان تداوم بارهای لرزه‌ای یک 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 جابجایی ماکزیمم (($\Delta x/H$)_{max}) در مقابل سرعت مطلق تجمعی (CAV) برای هر مدل بطور جداگانه ترسیم شد که در شکل (۱۰-ب) ارائه شده است. در

به عنوان چیدمان دوزنقه‌ای معروف است، تنها زمانی در سیستم مسلح‌شده با میخ‌های مارپیچی مؤثر خواهد بود که میخ‌ها بطور مایل نصب شده باشند. در حالت نصب افقی میخ‌های، عکس این چیدمان به عنوان 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 درحالی که این امر در حالت نصب میخ‌های مایل کاملاً معکوس است. این یافته‌ها، که برای میخ‌کوبی تزریقی نیز بدست آمد است [۴۰]، به

امروزه کاربرد وسیع طراحی سازه‌های خاکی براساس سطوح عملکرد سبب شده که روش‌های طراحی بر مبنای جابجایی اهمیت مضاعفی پیدا کنند. شتاب ورودی تسلیم (\hat{a}_y) یک پارامتر مهم در چنین روش‌هایی می‌باشد که تخمین دقیق آن می‌تواند در اعتباربخشی به نتایج بسیار مؤثر باشد. این پارامتر معمولاً با استفاده از نمودار جابجایی ماکزیمم (($\Delta x/H$)_{max}) برحسب شتاب بیشینه زمین (PGA) قابل تعیین است [۳۲، ۳۳، ۴۰]. در این روش، نقطه‌ی تغییر شیب منحنی جابجایی حداکثر در مقابل شتاب بیشینه زمین به عنوان شتاب ورودی تسلیم انتخاب می‌شود. مطالعات نشان داده که شتاب ورودی تسلیم به عواملی نظیر هندسه‌ی سازه و مشخصات خاک وابسته است. با استفاده از

^{۱۹} Hong

یکپارچه عمل نماید و همکاری مطلوبی میان تمامی ردیف‌های میخ اتفاق افتد تا پایداری دیوار تامین 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 الگوی توسط یزدان‌دوست [۳۲] و توفنگجیان و ووستیک^{۲۰} [۴۱] نیز برای دیوار با میخ‌های تزریقی به ترتیب تحت شرایط ۱g و Ng گزارش شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر سطوح خرابی، هندسه‌ی شماتیک این سطوح در شکل (۱۴) بطور ایده‌ال ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تمامی ردیف‌های میخ نقش موثری در شکل‌گیری الگوی خرابی مدل‌ها ایفا می‌کنند. در همه‌ی 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^{۲۱} عمل می‌کنند (ناحیه ۲). همانطور که در آخرین گام بارگذاری مشاهده شد، با ادامه‌ی بارگذاری و فرارسیدن حد ظرفیت بیرون‌کشیدگی این میخ‌ها، جابجایی 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 به روی خاکریز خود بصورت نیروی رو به بالا یا رو به پایین است. توفنگجیان و ووستیک [۴۱] نشان دادند که درحالت 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

همه‌ی مدل‌ها می‌توان یک رابطه‌ی دوخطی میان جابجایی ماکزیمم و سرعت مطلق تجمعی مشاهده نمود. بر اساس نمودارهای بدست آمده مشخص شد که مدل‌های تسلیح‌شده با میخ‌های مایل دارای CAV_y بزرگتری نسبت به مدل‌های مسلح با میخ‌های افقی می‌باشند. این امر نشان می‌دهد که کاربرد میخ‌های مارپیچی مایل یک راه‌حل مناسب برای افزایش مقادیر سرعت مطلق تجمعی آستانه‌ی گسیختگی و بهبود پایداری لرزه‌ای سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی می‌باشد. از طرف دیگر، با افزایش طول میخ‌ها، مقادیر CAV_y افزایش و جابجایی ماکزیمم کاهش یافت که نشان می‌دهد انتخاب چیدمان مناسب میخ‌ها در بهبود پایداری لرزه‌ای دیوارهای مسلح شده با میخ‌های مارپیچی اهمیت فراوانی دارد. شکل (۱۰-ب) نشان می‌دهد این بهبود پایداری لرزه‌ای نه تنها با افزایش طول میخ بطور همزمان در تمامی ردیف‌ها حاصل می‌شود بلکه با افزایش طول میخ‌ها بصورت موضعی در بعضی بخش‌های از دیوار مسلح شده با میخ‌های مارپیچی نیز بدست می‌آید. هرچند که افزایش طول میخ‌ها بصورت موضعی به هر صورتی که باشد نهایتاً پایداری دیوار را افزایش می‌دهد اما برای دیوارها با میخ افقی کاربرد میخ‌های بلندتر در نیمه‌ی 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

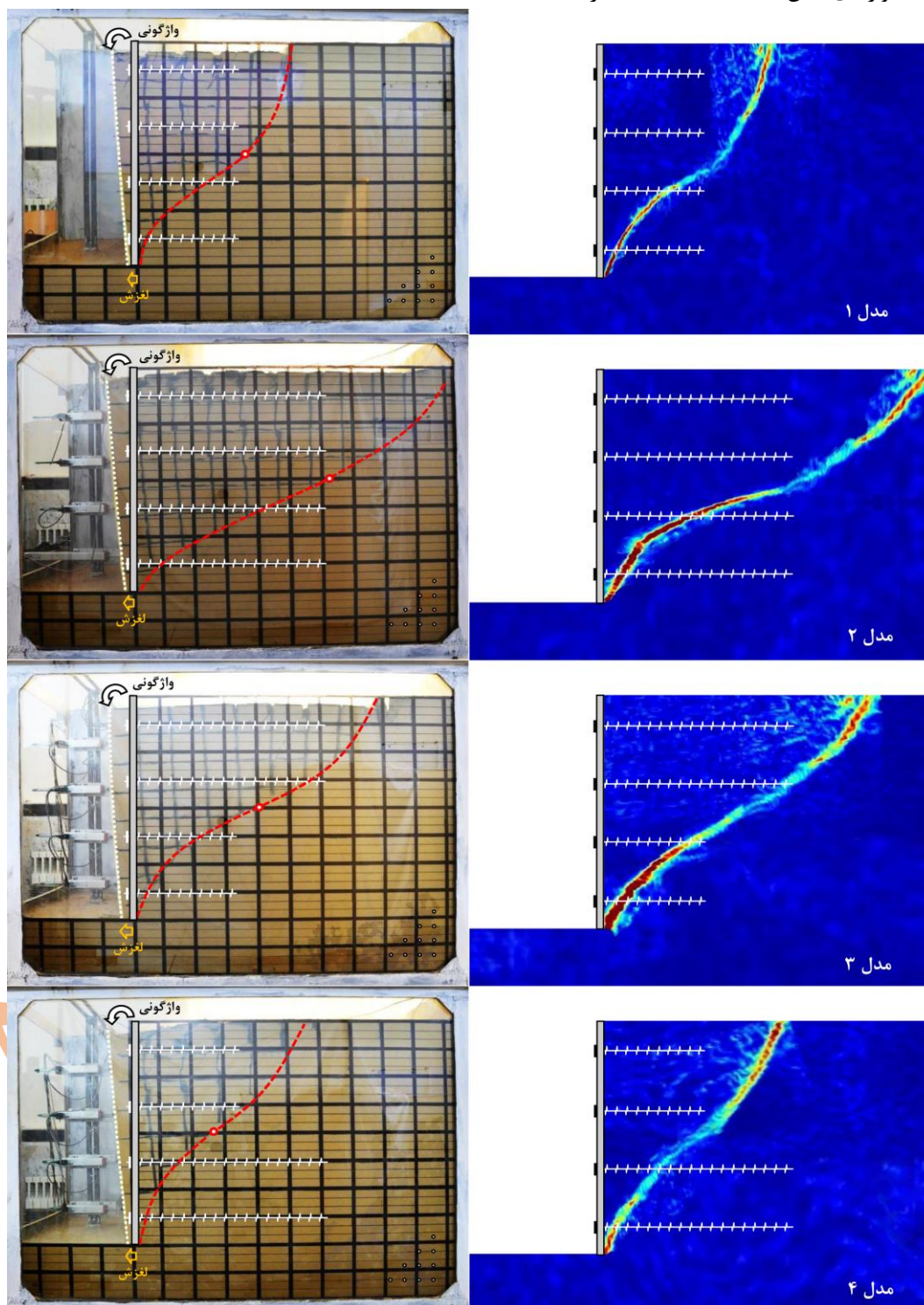
روش پردازش تصاویر یک روش اندازه‌گیری غیر مخرب است که در این تحقیق برای شناسایی سطوح گسیختگی در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، کرنش برشی ایجاد شده در توده خاک با دنبال کردن حرکت ذرات خاک در تصاویر متوالی اخذ شده از مدل در خلال بارگذاری توسط نرم‌افزار GeoPIV اندازه‌گیری و سپس نواحی گسیختگی مشخص می‌شود. نتایج پردازش تصاویر و تصاویر تهیه شده از خرابی مدل‌ها در طی آخرین مرحله از بارگذاری در اشکال (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 به روی دیوارهای خاک میخ‌کوبی شده مطابقت دارد [۴۱ و ۳۲ و ۳۰]. این امر می‌تواند به سختی خمشی کافی رویه نسبت داده شود که موجب شد توده‌ی خاک مسلح بطور

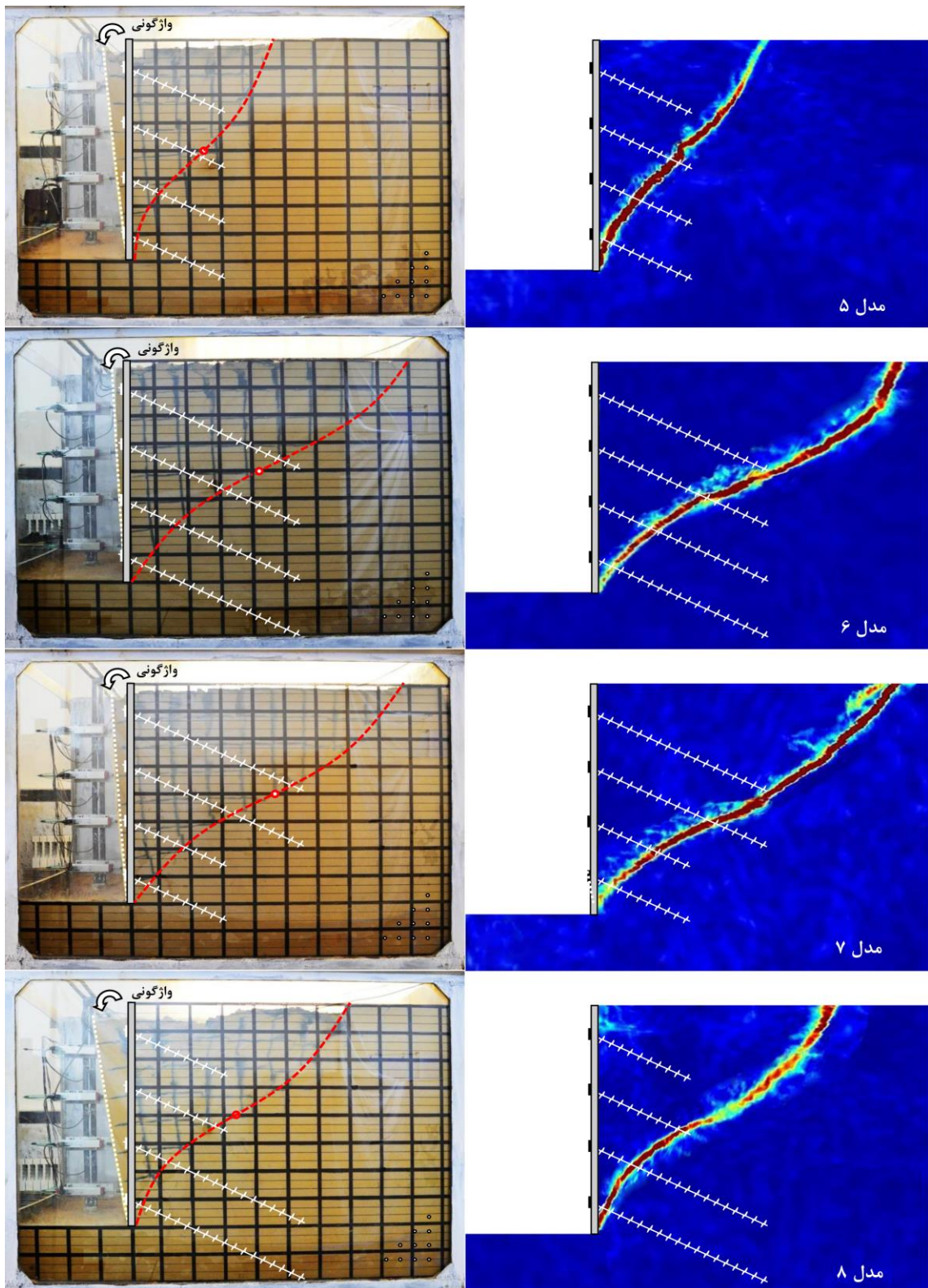
^{۲۰} Tufenkjian & Vucetic
^{۲۱} anchoring mechanism

شکل‌گیری یک سطح گسیختگی محدب در خاکریز گردد.

دیوار منفی ($-\delta$) شناخته می‌شود و می‌تواند مشابه با آنچه که در نیمه‌ی پایینی دیوارهای این مطالعه مشاهده گردید، سبب



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



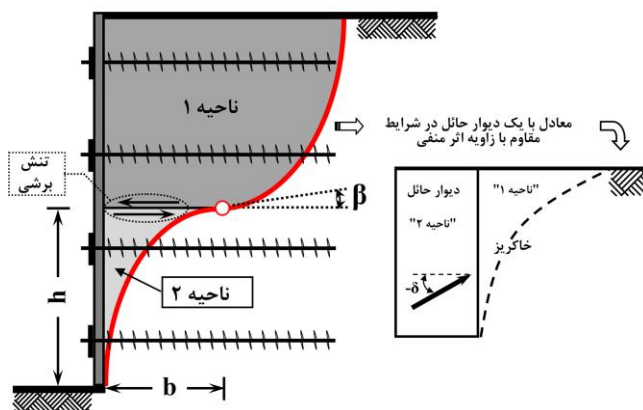
شکل ۱۳: مکانیزم گسیختگی و مدهای تغییر شکل برای مدل‌ها با میخ‌های مایل

مُد تغییرشکل همراه با اندکی لغزش در پاشنه بود. با افزایش زاویه میخ‌ها، لغزش پایه دیوار از بین رفته و تنها مُد تغییرشکل غالب همان واژگونی بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میخ‌های مارپیچی می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش جابجایی دیوار باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آزمایش‌های میز لرزه ۱g به روی مدل‌های دیوارهای مسلح شده با میخ مارپیچی انجام گردید تا اثرات زاویه‌ی نصب و چیدمان میخ‌ها بر عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های خاک مسلح شده با میخ‌های مارپیچی ارزیابی شود. هشت مدل با مقیاس ۱:۱۰ و چیدمان و زاویه‌ی نصب مختلف میخ‌های مارپیچی ساخته و تحت تحریک‌هایی با زمان‌های تداوم مختلف قرار گرفت. نتایج با یکدیگر مقایسه گردید تا یک سری یافته‌های کمی و کیفی حاصل گردد که در ادامه به برجسته‌ترین آن اشاره می‌شود.

- (۱) نتایج نشان داد که افزایش طول و زاویه نصب میخ موجب کم‌رنگتر شدن تغییرات محتوای فرکانسی می‌شود این در حالی است که در این میان نقش زاویه نصب مشهود تر است.
- (۲) کاهش زاویه‌ی نصب میخ‌ها موجب پُر رنگتر شدن افت فرکانس پاسخ گردید. با افزایش طول میخ‌ها از ۰٫۵H به ۰٫۹H، 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 مسلح شده با میخ‌های مایل، در دیوارها با میخ‌های افقی، میخ‌های نصب شده در نیمه‌ی تحتانی نسبت به میخ‌های نیمه‌ی فوقانی نقش برجسته تری در بهبود صلبیت سازه دارند.
- (۴) کاربرد میخ‌های مایل به جای میخ‌های افقی یک راهکار مؤثر در کاهش بزرگنمایی شتاب در سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی بود. در صورت استفاده از میخ‌های کوتاه در نیمه‌ی بالایی دیوار اثربخشی این روش کمتر شده و نهایتاً با کاهش طول میخ بطور 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 بیشینه



شکل ۱۴: فرم شماتیک سطوح گسیختگی و نواحی درگیر در مکانیزم خرابی اشکال (۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهند که هندسه مکانیزم گسیختگی در دیوار مسلح شده با میخ‌های مارپیچی (یعنی موقعیت نقطه‌ی عطف سطح گسیختگی (b, h) و زاویه‌ی نقطه‌ی عطف (β)) به چیدمان و زاویه‌ی نصب میخ‌ها وابسته است. همانطور که برای هر دو زاویه‌ی میخ‌ها مشاهده می‌شود، افزایش طول میخ بطور همزمان در تمامی ردیف‌ها منجر به افزایش فاصله‌ی نقطه عطف نسبت به رویه (b) و کاهش زاویه‌ی β می‌شود. هرچند که این تغییرات هندسی موجب گسترش بیشتر سطح گسیختگی گردید، اما افزایش طول میخ‌ها بصورت موضعی در برخی قسمت‌های مدل، نیز سبب گسترده‌تر شدن سطح گسیختگی شد که البته شدت این گسترش نسبت به حالت افزایش طول میخ در تمامی ردیف‌ها خیلی کمتر بود. جالب توجه است که در حالت افزایش زاویه‌ی نصب میخ‌ها، تغییرات هندسی کاملاً برعکس اتفاق افتاد یعنی استفاده از میخ‌های مایل موجب نزدیک‌تر شدن نقطه عطف به رویه و افزایش زاویه β گردید. یک نکته‌ی مهم دیگر عدم وابستگی ارتفاع نقطه‌ی عطف (h) به چیدمان و زاویه‌ی نصب میخ‌ها بود. بطوری که، در همه‌ی مدل‌ها این ارتفاع برابر با $h = H/2$ تعیین شد.

مقایسه‌ی تغییرشکل‌های ماندگار دیوار بعد از وقوع گسیختگی در اشکال (۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهد که چیدمان و زاویه‌ی نصب میخ‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای بر مُد تغییرشکل سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی تأثیرگذار است. همچنین، سختی خمشی رویه موجب شد مُد تغییرشکل غالب در تمام مدل‌ها به فرم واژگونی بدون هیچ‌گونه شکم‌دادگی باشد. در مدل‌های با میخ‌های افقی، این

- [۵] M. Ehrlich, R.C. Silva, Behavior of a ۳۱ m high excavation supported by anchoring and nailing in residual soil of gneiss, *Engineering Geology*, ۱۹۱ (۲۰۱۵) ۴۸-۶۰.
- [۶] J. Garzón-Roca, V.E. Capa-Guachon, F.J. Torrijo, Designing soil-nailed walls using the Amherst wall considering problematic issues during execution and service life, *International Journal of Geomechanics*, ۱۹(۷) (۲۰۱۹) ۱-۱۴.
- [۷] J.P. Turner, W.G. Jensen, Landslide stabilization using soil nail and mechanically stabilized earth walls: case study, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ۱۳۱(۲) (۲۰۰۵) ۱۴۱-۱۵۰.
- [۸] R. Bridle, Soil nailing-analysis and design, *Ground Engineering*, ۲۲(۶) (۱۹۸۹).
- [۹] F. Schlosser, Behaviour and design of soil nailing, in: *Proc. of Int. Symp., Held at Asia Institute of Technology*, ۱۹۸۲, pp. ۳۹۹-۴۱۹.
- [۱۰] L.-J. Su, T.C. Chan, J.-H. Yin, Y. Shiu, S. Chiu, Influence of overburden pressure on soil-nail pullout resistance in a compacted fill, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ۱۳۴(۹) (۲۰۰۸) ۱۳۳۹-۱۳۴۷.
- [۱۱] Q. Wang, X. Ye, S. Wang, S.W. Sloan, D. Sheng, Experimental investigation of compaction-grouted soil nails, *Canadian Geotechnical Journal*, ۵۴(۱۲) (۲۰۱۷) ۱۷۲۸-۱۷۳۸.
- [۱۲] X. Ye, S. Wang, Q. Li, S. Zhang, D. Sheng, Negative effect of installation on performance of a compaction-grouted soil nail in poorly graded stockton beach sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ۱۴۶(۸) (۲۰۲۰) ۰۴۰۲۰۰۶۱.
- [۱۳] J.-H. Yin, W.-H. Zhou, Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ۱۳۵(۹) (۲۰۰۹) ۱۱۹۸.
- [۱۴] Y. Zhou, C. Cheuk, L. Tham, Numerical modelling of soil nails in loose fill slope under surcharge loading, *Computers and Geotechnics*, ۳۶(۵) (۲۰۰۹) ۸۳۷-۸۵۰.
- [۱۵] D. Bobbitt, Chance soil screw retention wall system report, *Chance Civil Construction*, Centralia, Mo, (۱۹۹۶).
- [۱۶] P. Sharma, S. Rawat, A.K. Gupta, Laboratory investigation of pullout behavior of hollow and solid shaft helical nail in frictional soil, *Acta Geotechnica*, ۱۶(۴) (۲۰۲۱) ۱۲۰۵-۱۲۳۰.
- [۱۷] H. Tokhi, G. Ren, J. Li, Laboratory pullout resistance of a new screw soil nail in residual soil, *Canadian Geotechnical Journal*, ۵۵(۵) (۲۰۱۸) ۶۰۹-۶۱۹.
- [۱۸] X. Ye, S. Wang, S. Zhang, X. Xiao, F. Xu, The compaction effect on the performance of a

زمین نشان داد که زلزله‌های با زمان تداوم بیشتر نسبت به زلزله‌هایی با شتاب بزرگتر، می‌تواند اثرات مخرب بیشتری بر سازه‌های ساخته شده روی سیستم‌های مسلح شده با میخ‌های مارپیچی داشته باشد.

۶) هرچند که افزایش طول میخ بطور همزمان در تمامی ردیفها سبب کاهش قابل توجه در تغییرشکل جانبی گردید، اما با افزایش طول میخ‌ها بصورت موضعی در نیمه‌ی بالایی دیوار در حالت میخ‌های افقی و در نیمه‌ی پایینی دیوار در حالت میخ‌های مایل همان میزان کاهش در تغییرشکل‌ها مشاهده شد. ۷) افزایش طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها دو راهکار جهت افزایش پایداری سیستم مسلح شده با میخ‌های مارپیچی تحت زلزله‌هایی با مدت دوام طولانی بود که گزینه‌ی افزایش طول اثربخشی بیشتری داشت.

۸) صفحه‌ی گسیختگی در دیوار مسلح شده با میخ‌های مارپیچی بصورت یک سطح سهمی‌شکل با نقطه‌ی عطف مشخص مشاهده شد که ابعاد آن با افزایش طول و زاویه‌ی نصب میخ‌ها افزایش یافت. همچنین، مُد تغییرشکل غالب در این دیوارها ترکیبی از واژگونی و لغزش پایه بود که با افزایش زاویه‌ی میخ‌ها، پدیده‌ی لغزش پایه رفته رفته کمرنگ شد.

مراجع

- [۱] K. Kovári, History of the sprayed concrete lining method—part II: milestones up to the ۱۹۶۰s, *Tunnelling and underground space technology*, ۱۸(۱) (۲۰۰۳) ۷۱-۸۳.
- [۲] Rabejac S, Toudic P. 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* ۱۹۷۴;۹۳:۲۳۲-۷.
- [۳] G. Felio, M. Vucetic, M. Hudson, O. Barar, R. Chapman, Performance of soil nailed walls during the October ۱۷, ۱۹۸۹ Loma Prieta Earthquake, in: *Proceedings of the ۴۳rd Canadian geotechnical conference*, Quebec, Canada, ۱۹۹۰, pp. ۱۶۵-۱۷۳.
- [۴] F. Tatsuoka, Performance of reinforced soil structures during the ۱۹۹۵ Hyogo-ken Nambu Earthquake, *Special Lecture*, in: *Int. Symp. Earth Reinforcement*, IS Kyushu'۹۶, Balkema, ۱۹۹۷, pp. ۹۷۳-۱۰۰۸.

- [۳۲] M. Yazdandoust, Seismic performance of soil-nailed walls using a ۱ g shaking table, Canadian Geotechnical Journal, ۵۵(۱) (۲۰۱۸) ۱-۱۸.
- [۳۷] C.-C. Huang, Seismic responses of vertical-faced wrap-around reinforced soil walls, Geosynthetics International, ۲۶(۲) (۲۰۱۹) ۱۴۶-۱۶۳.
- [۳۸] P. Xu, K. Hatami, G. Jiang, Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads, Geosynthetics International, ۲۷(۴) (۲۰۲۰) ۳۶۴-۳۷۸.
- [۳۹] Y. Zheng, A.C. Sander, W. Rong, P.J. Fox, P.B. Shing, J.S. McCartney, Shaking table test of a half-scale geosynthetic-reinforced soil bridge abutment, Geotechnical Testing Journal, ۴۱(۱) (۲۰۱۸) ۲۰۱۶-۲۶۸-۲۰۱۶-۲۶۸.
- [۳۳] M. Yazdandoust, Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ۹۷ (۲۰۱۷) ۲۱۶-۲۳۲.
- [۴۰] Z. Eftekhari, A.K. Panah, ۱-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, ۱۴۷ (۲۰۲۱) ۱۰۶۷۵۸.
- [۴۱] M.M. El-Emam, R.J. Bathurst, Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls, Geotextiles and Geomembranes, ۲۵(۱) (۲۰۰۷) ۳۳-۴۹.
- [۴۲] E. Guler, O. Selek, Reduced-scale shaking table tests on geosynthetic-reinforced soil walls with modular facing, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ۱۴۰(۶) (۲۰۱۴) ۰۴۰۱۴۰۱۵.
- [۴۳] Y.-S. Hong, R.-H. Chen, C.-S. Wu, J.-R. Chen, Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes, Canadian Geotechnical Journal, ۴۲(۵) (۲۰۰۵) ۱۲۶۴-۱۲۷۹.
- [۴۴] M.R. Tufenkjian, M. Vucetic, Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ۱۲۶(۳) (۲۰۰۰) ۲۲۷-۲۳۵
- compaction-grouted soil nail in sand, Acta Geotechnica, ۱۵(۱۰) (۲۰۲۰) ۲۹۸۳-۲۹۹۵.
- [۱۹] D. Deardorff, M. Moeller, E. Walt, Results of an instrumented helical soil nail wall, in: Earth Retention Conference ۳, ۲۰۱۰, pp. ۲۶۲-۲۶۹.
- [۲۰] FHWA, Geotechnical Engineering Circular No. ۷: Soil Nail Walls - Reference Manual, FHWA-NHI-۱۴-۰۰۷, FHWA Washington, D.C., ۲۰۱۵.
- [۲۱] M. Sharma, D. Choudhury, M. Samanta, S. Sarkar, V.R. Annareddy, Analysis of helical soil-nailed walls under static and seismic conditions, Canadian Geotechnical Journal, ۵۷(۶) (۲۰۲۰) ۸۱۵-۸۲۷.
- [۲۲] P. Zahedi, A. Rezaei-Farei, H. Soltani-Jigheh, Performance Evaluation of the Screw Nailed Walls in Tabriz Marl, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, ۷(۱) (۲۰۲۱) ۱-۱۵.
- [۲۳] M.-E. Mahmoudi-Mehrizi, A. Ghanbari, M. Sabermahani, The study of configuration effect of helical anchor group on retaining wall displacement, Geomechanics and Geoengineering, ۱۷(۲) (۲۰۲۲) ۵۹۸-۶۱۲.
- [۲۴] S. Iai, Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in ۱g Gravitational Field, Soils and Foundations, ۲۹(۱) ۱۰۵-۱۱۸.
- [۲۵] D.M. Wood, Geotechnical modeling, Taylor & Francis Grou, London.
- [۲۶] FSI, Technical manual: helical piles and anchors, hydraulically driven push piers, polyurethane injection & supplemental support systems, ۲nd ed., Foundation Support Works Omaha, ۲۰۱۴.
- [۲۷] H. Tokhi, G. Ren, J. Li, Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand, Computers and Geotechnics, ۷۸ (۲۰۱۶) ۱۴۴-۱۵۴.
- [۲۸] M. Jahed Orang, R. Motamed, A. Prabhakaran, A. Elgamal, Large-scale shake table tests on a shallow foundation in liquefiable soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ۱۴۷(۱) (۲۰۲۱) ۰۴۰۲۰۱۵۲.
- [۲۹] A.M. Safaee, A. Mahboubi, A. Noorzad, 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, ۴۹(۱) (۲۰۲۱) ۱۳۰-۱۴۵.
- [۳۰] S. Sahoo, B. Manna, K. Sharma, Shaking table tests to evaluate the seismic performance of soil nailing stabilized embankments, International Journal of Geomechanics, ۲۱(۴) (۲۰۲۱) ۰۴۰۲۱۰۳۶.
- [۳۱] P. Xu, K. Hatami, G. Jiang, Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests, Geotextiles and Geomembranes, ۴۸(۱) (۲۰۲۰) ۸۲-۹۷.