

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون بهره‌وری از فضاهای زیرسطحی، نیاز بشر به پایدارسازی در زمان حفر و گودبرداری بیش از پیش قوت می‌گیرد. پایدارسازی و بررسی این روش در حالت دینامیکی به دلیل بهره‌مندی در سازه‌های دائمی نظیر پایداری شیب کناره راه از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های پایدارسازی دیواره‌های گود استفاده از روش میخ‌گذاری است. لذا در این مقاله رفتار پایدارسازی دیواره‌های میخ‌گذاری شده دائمی تحت بار دینامیکی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به کمک ابزارگذاری‌های صورت گرفته در گود هتل نرگس شماره ۲ و مدل‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار FLAC صحت این نرم‌افزار مورد تأیید قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن ۱۵ نگاهت و ساختگاه‌های نوع ۱، ۲ و ۳ بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، بارهای هارمونیک معادل محاسبه شده و تحلیل‌های دینامیکی برای چهار بار هارمونیک معادل، سه ساختگاه و سه ارتفاع مختلف ۳، ۶ و ۹ متر و در دو زاویه مختلف میخ‌گذاری انجام شد. برای این منظور با در نظر گرفتن تغییر شکل لبه بالایی دیواره به‌عنوان معیار مقایسه بین تحلیل‌ها، مقادیر تغییر مکان در ۷۲ حالت مختلف مشخص شد. بررسی نتایج تحلیل‌های فوق نشان داد که، با کاهش مشخصه‌های مقاومتی ساختگاه (از نوع ۱ به ۳) جابه‌جایی افقی لبه گود و پوسته نما افزایش یافته و با کاهش زاویه میخ‌ها جابه‌جایی افقی لبه گود و پوسته نما کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، رفتار دینامیکی، دیوار میخ‌گذاری شده، تحلیل تفاضل محدود.

تعیین عملکرد رفتار دینامیکی دیوارهای خاکی میخ‌گذاری شده تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای بر اساس تغییر مکان

ایرج رحمانی (نویسنده مسئول)

استادیار، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران، i.rahmani@bhrc.ac.ir

امیر نجاتی

کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران

۱- مقدمه

این پایدارسازی در برخی پروژه‌های عمرانی به قدری مهم و حیاتی می‌شود که ممکن است موجب کند شدن روند اجرای پروژه گردد. از میخ‌گذاری در عملیات ساخت سازه‌های دائمی نظیر پایداری شیب کناره راه بزرگراه‌ها، برداشت خاک از پی پل‌ها به هنگام تعریض زیرگذر، تعمیر، تحکیم و بازسازی سازه‌های نگهبان فرسوده، ورودی تونل‌ها و کناره کوله پل‌ها به شکل موفقیت‌آمیزی استفاده می‌شود. با توجه به ریسک بالای تخریب سازه‌های مذکور هنگام رخداد زلزله، ارزیابی رفتار لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها را دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. دیوارهای میخ‌گذاری شده به‌عنوان سازه نگهبان در مقایسه با دیگر سیستم‌های نگه‌دارنده گود دارای شکل‌پذیری

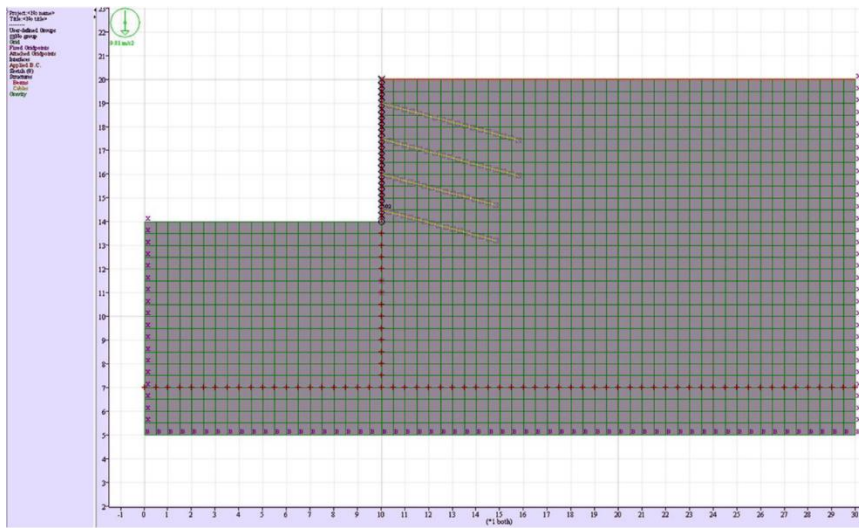
با افزایش تراکم در اراضی محدود و در نواحی پرتراکم شهری، بر تعداد طبقات زیرزمین و عمق گودبرداری افزوده شده است. گسترش روزافزون شهرها و نیاز به فضاهای کار و سکونت از یک طرف و افزایش شدید قیمت زمین در شهرها از سوی دیگر، ضرورت استفاده حداکثری از زمین و احداث ساختمان‌های مرتفع اداری، تجاری و مسکونی با طبقات متعدد در زیرزمین را منجر شده است. از این رو با افزایش عمق گودبرداری، خطرات ناپایداری و گسیختگی دیواره‌های گودبرداری به شدت افزایش می‌یابد. یکی از مسائل مهم و مطرح در مهندسی ژئوتکنیک روشی برای حفظ پایداری جداره‌های محل گودبرداری با توجه به شرایط محیطی است.

نوع بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰)، زاویه‌های قرارگیری میخ‌ها (۱۰ و ۱۵ درجه)، اثر نگاشت لرزه‌ای وارد بر توده خاک (چهار شتاب نگاشت بارگذاری هارمونیک با فرکانس‌های متفاوت) مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. نرم‌افزار مورد استفاده برای تحلیل در این مقاله برنامه تفاضل محدود FLAC می‌باشد [۲۱]. توانایی مدل‌سازی رفتارهای مختلف خاک (خطی و غیرخطی)، قابلیت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه، پاسخ قابل قبول لرزه‌ای از جمله قابلیت‌های این برنامه می‌باشد.

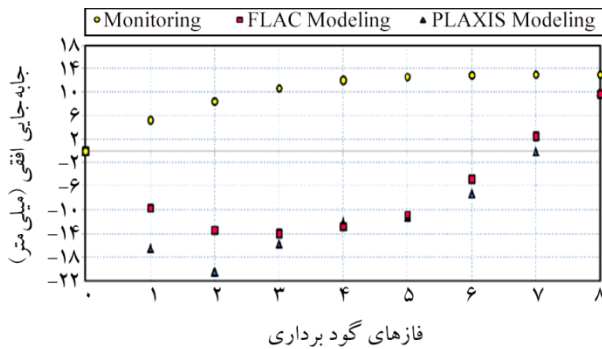
۲- نرم‌افزار مورد استفاده

در این مقاله سعی شده تا درک بهتری از رفتار لرزه‌ای سازه خاک مسلح میخ‌گذاری ارائه شود. بنابراین یک مدل دو بعدی در نظر گرفته شد که ساخت مرحله‌ای این نوع از سازه‌ها شامل خاک برداری و نصب میخ و سپس اجرای دیواره شاکریت شده می‌باشد. مش بندی مورد استفاده در شکل (۱) ارائه شده است. نرم‌افزار مورد استفاده در این تحلیل FLAC می‌باشد. این نرم‌افزار، با شبکه‌بندی محیط‌های خاکی و سنگی به صورت المان‌های چهاروجهی، مبادرت به انجام محاسبات در حالت دو بعدی با استفاده از روش تفاضل محدود صریح می‌نماید. از ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای اشاره نمود. از این قابلیت در شبیه‌سازی رفتار میخ‌های نصب شده در خاک بهره گرفته شده است. با توجه به شرایط مسئله از معادل‌سازی دو بعدی در شرایط کرنش سطح در مدل استفاده می‌شود. برای جلوگیری از انعکاس امواج به داخل محیط خاک، یک مرز جاذب در کف مدل قرار داده شده است. این مرز متشکل از میراگرهایی است که در جهت نرمال و مماس بر مرز قرار گرفته‌اند و نیروهای ویسکوز عمود و مماس بر مرز، به مدل وارد می‌نمایند. همچنین، برای کاهش انعکاس امواج از طریق مرزهای کناری، از شرایط مرزی محیط آزاد، که معادل محیط بی‌نهایت می‌باشد، استفاده شد. شرایط مرزی ذکر شده پس از آنکه مدل به حالت تعادل استاتیکی رسید، اعمال شد.

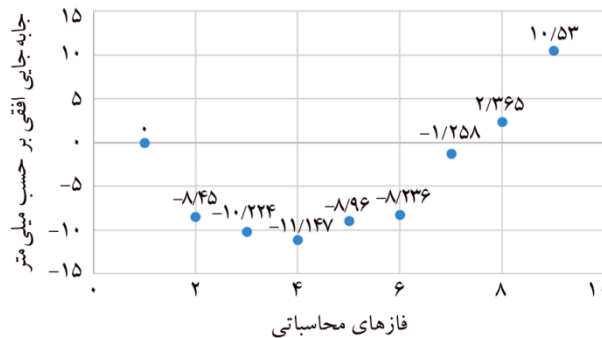
بیشتری می‌باشند. بنابراین سیستم سازه نگهبان میخ‌گذاری شده، در بارگذاری لرزه‌ای دارای امکان تحمل تغییر شکل بیشتری نسبت به سیستم معمول ثقلی را دارا می‌باشد. بعد از زلزله‌های لوماپریتا کالیفرنیا در ۱۹۸۹، کوبه ژاپن در ۱۹۹۵، و نیسکالی واشنگتون در ۲۰۰۱، مشاهدات نشان داده که در دیوارهای میخ‌گذاری شده نشانه‌هایی از خرابی و یا تغییر شکل دائمی، با وجود اعمال شتاب‌های بزرگ گزارش نشده است. مشاهدات میدانی پس از زلزله این نوع سیستم پاسخ لرزه‌ای رضایت‌بخشی از خود نشان داده‌اند. رفتار لرزه‌ای محافظه کارانه دیوارهای میخ‌گذاری شده می‌تواند به انعطاف‌پذیری ذاتی سیستم و یا محافظه کار بودن روند طراحی مربوط باشد [۱]. به عنوان یک نتیجه، این سیستم قطعاً می‌تواند انتخاب مناسبی برای بسیاری از اهداف مهندسی ژئوتکنیک در نظر گرفته شود. عموماً روش طراحی شبه استاتیکی تنش مجاز برای ارزیابی لرزه‌ای سیستم‌های دیوار خاک مسلح و همچنین دیوار میخ‌گذاری شده استفاده می‌شود. مونونوبه و ماتسو [۲] و اوکابه [۳] معادله‌ی کولمب را با در نظر گرفتن شتاب افقی و عمودی زمین و ارائه‌ی ضرایب لرزه‌ای برای فشار غیرفعال خاک و فشار محرک به منظور طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل اصلاح نمودند. در این روش امکان برآورد تغییر شکل‌ها وجود ندارد. برای در نظر گرفتن اثر تغییر شکل سازه‌های نگهبان میخ‌گذاری شده نیاز به بررسی رفتار این گونه سازه‌ها می‌باشد. لذا بدین منظور و درک بهتر رفتار استاتیکی و لرزه‌ای سازه‌های نگهبان میخ‌گذاری شده مطالعات گسترده آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ [۴-۸]، در مقیاس کوچک [۹-۱۵] و مطالعات عددی [۱۶-۲۰] توسط محققین مختلف انجام شده است. با توسعه برنامه‌های کامپیوتری دارای مدل‌های رفتاری مناسب، امکان مناسبی جهت مطالعه رفتار لرزه‌ای این گونه سازه‌ها و در نظر گرفتن اثرات متقابل سازه و خاک به وجود آمده است. به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف دیوار میخ‌گذاری شده، در این مطالعه، هفتاد و دو مدل تولید شده تا بتوان اثر متغیرهایی شامل ارتفاع دیوار (۳، ۶ و ۹ متر)، نوع خاک (سه



شکل (۱): مش بندی مدل عددی مینا- ارتفاع خاک برداری برابر با ۶ متر.



شکل (۲): تغییر مکان‌های افقی گود برگرفته برداشت سنسورها [۲۲].



شکل (۳): تغییر مکان‌های افقی گود برگرفته از مدل سازی در نرم افزار.

جدول (۱): مشخصات خاک مورد استفاده در مدل‌ها.

C (KN/m ²)	ϕ (درجه)	ν (درجه)	E (MPa)	γ_{sat} (KN/m ³)	γ (KN/m ³)	
۱۰	۳۶	۰/۳	۱۵۰	۱۹/۵	۱۹	خاک نوع ۱
۵	۳۳	۰/۳	۱۱۰	۱۸/۵	۱۸	خاک نوع ۲
۲	۳۰	۰/۳	۷۰	۱۷/۵	۱۷	خاک نوع ۳

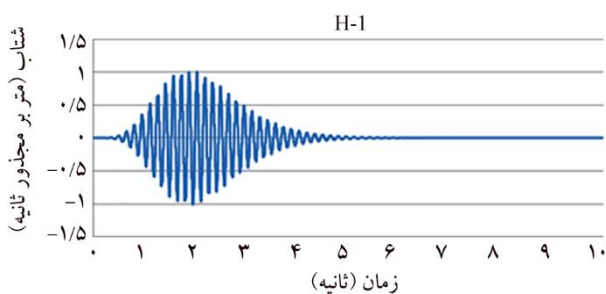
۳- صحت سنجی مدل

جهت صحت سنجی نرم افزار FLAC، مدل سازی گود هتل نرگس مشهد در تقاطع خیابان‌های امام خمینی و پاسداران شهر مشهد که به وسیله انکراژ پایدار شده است مورد نظر قرار گرفت [۲۲]. در طی اجرای این گود سنسورهایی جهت برداشت تغییر مکان‌ها نصب شد. در شکل (۲) مقادیر مدل سازی با دو نرم افزار و مقادیر برداشت‌های میدانی مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج مقایسه‌ای، شکل (۳) ارائه شده مشخص شد که نرم افزار FLAC توانایی مدل سازی دیواره‌های انکر شده را داراست و درصد خطایی در مراحل انتهایی بارگذاری برابر با ۵ درصد را ارائه کرده است.

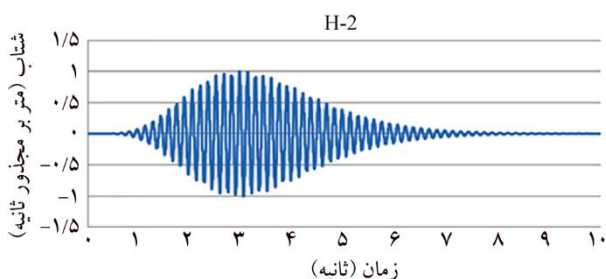
۴- مشخصات مصالح و مدل سازی

در این پژوهش از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر- کلمب در مدل سازی خاک استفاده شده است. پارامترهای خاک‌های مورد استفاده در مدل سازی در جدول (۱) برای سه نوع خاک با در نظر گرفتن حداقل مشخصات بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ آورده شده است. ابعاد هندسی مدل در راستای افقی برابر با ۳۰ متر و در راستای عمودی برابر با ۲۰ متر برای مدل گود ۹ متری و در راستای افقی برابر با ۳۰ متر و در راستای عمودی برابر با ۱۵ متر برای مدل گود ۶ و ۳ متری جهت کاهش زمان محاسبات در نظر گرفته شد.

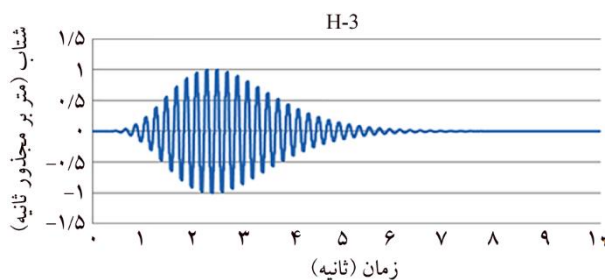
و مشخصات لرزه‌ای آنها بر اساس اطلاعات موجود خروجی‌های نگاهت‌های به دست آمده بر روی سطح زمین به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته می‌شوند. شکل‌های (۴) تا (۷) بارگذاری هارمونیک هستند که از مقایسه طیف پاسخ سازه برای میرایی ۵ درصد به دست آمده بر روی سطح زمین را برای سه نوع تیپ خاک و طیف پاسخ بار هارمونیک به دست آمده‌اند.



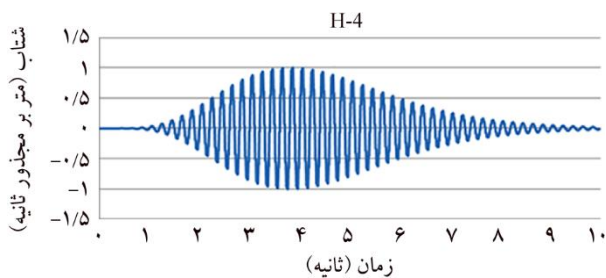
شکل (۴): بار هارمونیک ۱ (ساختمان نوع ۱).



شکل (۵): بار هارمونیک ۲ (ساختمان نوع ۱).



شکل (۶): بار هارمونیک ۳ (ساختمان نوع ۲).



شکل (۷): بار هارمونیک ۴ (ساختمان نوع ۳).

جهت در نظر گرفتن شرایط اولیه تنش‌ها، ابتدا زمین طبیعی جهت به دست آوردن تنش‌های برجا تحت نیروی ثقل مدل شد، سپس جابه‌جایی‌های مدل به صفر تغییر پیدا کرد. در ادامه گودبرداری به صورت مرحله‌ای مدل‌سازی شد و با هر گام گودبرداری (ارتفاع ۱/۵ متر) یک ردیف میخ جاگذاری و اجرای دیواره آن فعال شد. این کار تا رسیدن به انتهای گودبرداری انجام می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده، لازم است که مشخصات المان‌های سازه‌ای نظیر پوسته نما در مدل‌سازی نیز دو بعدی در حالت کرنش مسطح معادل‌سازی شود. رفتار پوسته در این مقاله الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. ضخامت پوسته ۱۵ سانتی‌متر و مقاومت نهایی بتن برابر ۲۱۰ کیلو نیوتن بر مترمربع و مدول الاستیسیته مساوی با $2/19 \times 10^7$ کیلو نیوتن بر مترمربع در تحلیل‌ها در نظر گرفته شد.

۵- مشخصات میل مهار

رفتار میل مهار الاستیک فرض شده است و روش محاسبه مشخصات میل مهار مشابه با روش به کار رفته در تعیین مشخصات المان سازه‌ای می‌باشد. با توجه به روند ذکر شده، مشخصات میل مهار از آرماتور ۳۲ با فواصل ۱/۵ متری در نظر گرفته شده است. میزان مدول الاستیسیته فولاد برابر با 2×10^8 کیلو نیوتن بر مترمربع و با در نظر گرفتن معادل‌سازی مقادیر و مشخصه‌ها در نرم‌افزار تعریف گردد.

۶- بارگذاری لرزه‌ای

بارگذاری لرزه‌ای باید به شکلی در نظر گرفته شود تا بتواند حداکثر خصوصیات زمین لرزه‌های رخ داده را مدل‌سازی نماید. پارامترهای مؤثر و با اهمیت نگاهت‌ها شامل بیشینه شتاب، سرعت، محتوای فرکانسی و مقدار انرژی و زمان مؤثر می‌باشند. با در نظر گرفتن ۱۵ نگاهت منتخب که از زمین لرزه‌های ثبت شده مانند زمین لرزه بم، رودبار و... بر اساس جدول (۲) و روش ارائه شده در مرجع [۲۳] پس از فیلتر کردن و هم‌پایه نمودن به شتاب سنگ بستر، به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شده و پس از تعریف لایه‌ها

جدول (۲): مشخصات نکاشت‌های منتخب.

ردیف	نام زمین لرزه	PGA(g)	بزرگا	PGV (cm/s)	SED (cm ² /s)	CAV (cm/s)	Max Dis. (cm)
۱	Kobe Japan	۰/۴۹	۷/۳	۲۷	۷۱۰	۱۱۵۹	۱/۹
۲	Bam	۰/۴۴	۶/۵	۱۷	۲۶۰	۹۷۶	۱/۷
۳	Tabas	۰/۴۵	۷/۴	۲۸	۶۵۰	۷۷۷	۱/۳۱
۴	Naghan	۰/۴۷	۶/۱	۲۱	۶۴۷	۹۰۱	۰/۸۱
۵	Naghan	۰/۴۸	۶/۱	۱۷	۲۶۴	۶۸۷	۰/۵۴
۶	Rodbar	۰/۴۶	۷/۴	۲۶	۵۴۰	۹۱۲	۱/۷۲
۷	Northridge	۰/۴۹	۶/۷	۱۲	۷۵	۹۷۴	۱/۲
۸	Northridge	۰/۵۰	۶/۷	۲۳	۳۲۲	۹۰۸	۱/۰۵
۹	Northridge	۰/۴۶	۶/۷	۳۱	۸۴۶	۷۸۲	۱/۳۸
۱۰	Turkey Duzce	۰/۴۷	۷/۱	۲۸	۲۶۴	۴۷۶	۰/۹۸
۱۱	Turkey Duzce	۰/۴۴	۷/۱	۱۳	۱۵۹	۱۰۱۴	۱/۷۲
۱۲	Baladeh	۰/۴۴	۶/۳	۲۶	۷۳۱	۱۰۶۴	۱/۴۹
۱۳	Baladeh	۰/۴۷	۶/۳	۳۳	۹۶۰	۱۱۴۳	۱/۹۸
۱۴	San Fernando	۰/۴۲	۶/۶	۱۳	۱۶۳	۳۱۵	۰/۳۶
۱۵	Palm Spring	۰/۴۱	۶/۰	۱۸	۱۶۸	۸۲۱	۱/۲

CAV دارند [۲۳]. پارامتر CAV غالباً رابطه مستقیمی با بزرگا داشته و به منظور برآورد میزان خسارت حاصله از زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt$$

۸- ارائه و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی پاسخ دینامیکی مدل با در نظر گرفتن مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی در پایان ثانیه دهم، زمانی که اثر بارگذاری به اتمام می‌رسد، در فرکانس‌های اعمالی مختلف پرداخته و نتایج به صورت نمودارهایی ارائه شده است.

۸-۱- بررسی پارامتری جنس خاک

در شکل (۸) نمودار تغییرات بیشینه جابه‌جایی افقی سه نوع خاک تحت بارهای دینامیکی هارمونیک برای زاویه میخ ۱۵ درجه و ارتفاع ۹ متر نشان داده شده است. با توجه به این نمودار میزان جابه‌جایی افقی بیشینه، با تغییر نوع خاک از ۱ الی ۳ در تمامی بارهای هارمونیک افزایش می‌یابد، که می‌تواند ناشی از نزدیکی پریرود طبیعی خاک و دیوار به پریرود غالب نکاشت و

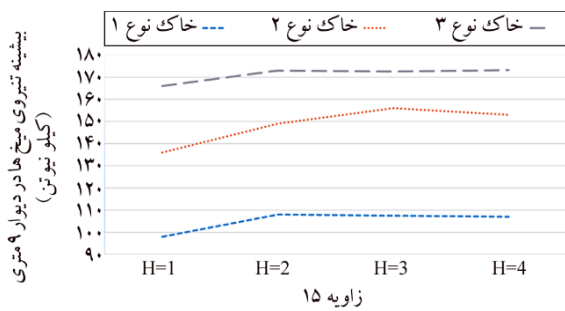
۷- محاسبات بار هارمونیک جهت اعمال در نرم‌افزار

جهت محاسبه بار هارمونیک معادل برای انجام تحلیل‌های دینامیکی و به دست آوردن پارامترهای لازم ضریب شتاب افقی که از نرم‌افزار Deepsoil استفاده شد [۲۴]. تغییر مکان‌های بیشینه تحت شتاب‌نگاشت‌های منتخب روی زمین به دست آمد. با توجه به اینکه ماهیت هر نکاشت از نقطه‌نظر محتوای فرکانسی، بزرگا، زمان مؤثر و ... متفاوت می‌باشد طبیعتاً تغییر مکان‌های بیشینه ایجاد شده در آن نیز یکسان نمی‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی برای ۱۵ نکاشت منتخب در جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول‌های پارامترهای PGV و SED به ترتیب بیشینه سرعت نکاشت و دانسیته انرژی نامیده می‌شود و غالباً در برآورد تغییر مکان به کار می‌روند که به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند.

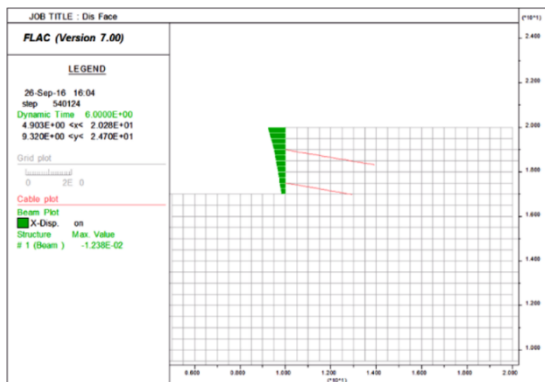
$$PGV = \text{Max}|v(t)|$$

$$SED = \int_0^t |v(t)|^2 dt$$

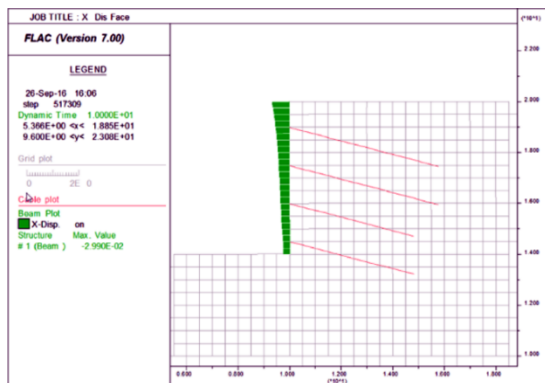
تغییر مکان‌های بیشینه ایجاد شده رابطه خوبی با پارامتر



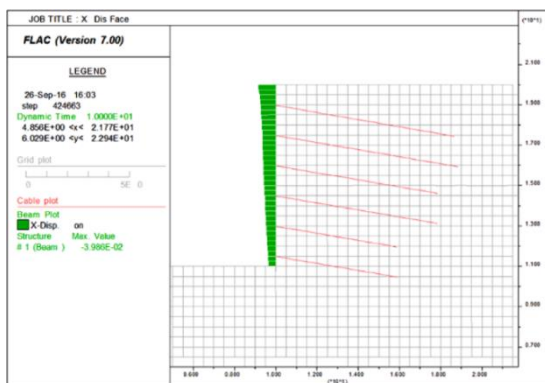
شکل (۹): نمودار بیشینه نیروی به وجود آمده در میخ‌ها- زاویه میخ ۱۵ درجه و ارتفاع دیوار ۹ متر.



(الف) ارتفاع گود ۳ متری



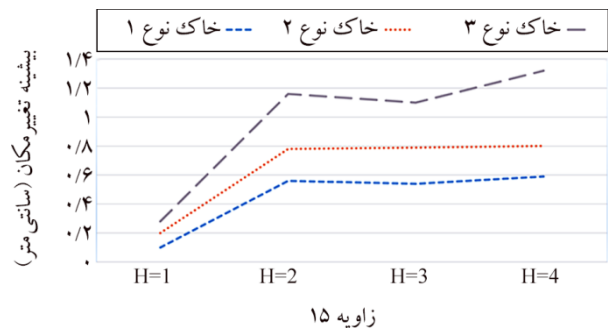
(ب) ارتفاع گود ۶ متری



(پ) ارتفاع گود ۹ متری

شکل (۱۰): پروفیل تغییر مکان افقی پوسته دیواره گود.

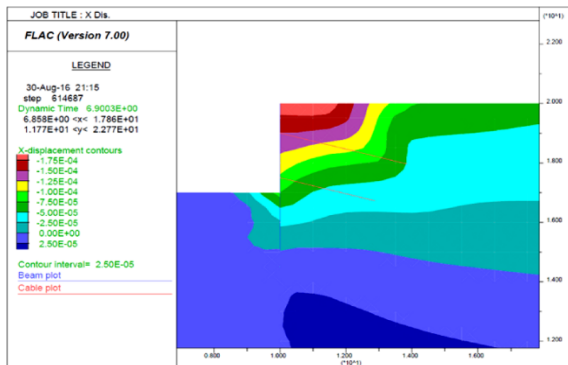
همچنین کاهش مشخصات تغییر شکلی خاک باشد. در بارگذاری لرزه‌ای شماره H1 کمترین تغییر مکان افقی مشاهده می‌شود. تأثیر تغییر نوع بارگذاری هارمونیک از H2 به H4 اثر زیادی بر تغییر مکان بیشینه لبه بالای گود در خاک‌های نوع ۱ و ۲ ندارد. اما در خاک نوع ۳ با تغییر بارگذاری از H2 تا H4 مقدار تغییر شکل لبه گود افزایش پیدا می‌کند.



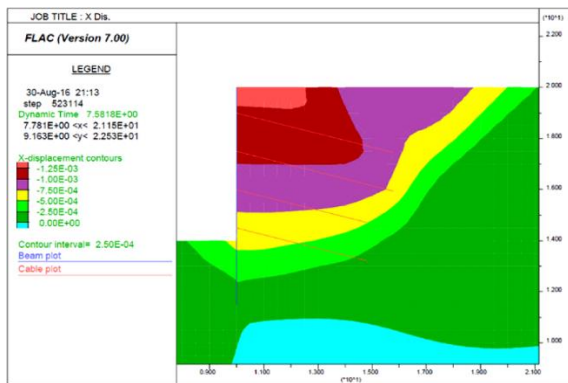
شکل (۸): نمودار بیشینه تغییر شکل افقی دیوار- زاویه میخ ۱۵ درجه و ارتفاع دیوار ۹ متر.

در شکل (۹) نمودار تغییرات بیشینه نیروی به وجود آمده در میخ‌ها با زاویه ۱۵ درجه و دیوار با ارتفاع ۹ متر برای سه نوع خاک تحت چهار بارگذاری هارمونیک H1 تا H4 نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش تقریبی ۳۷/۵ درصدی در نیروی میخ‌ها از خاک نوع ۱ به نوع ۳ مشاهده می‌شود. برای بارگذاری H2 تا H3 مقدار تغییر بیشینه نیرو تقریباً ثابت شده است.

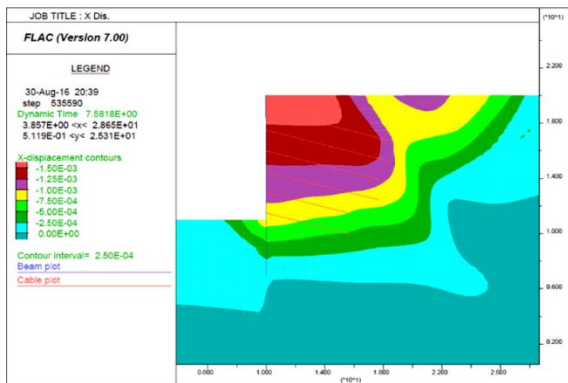
در شکل (۱۰) پروفیل تغییر مکان افقی پوسته دیواره گود (برحسب متر) برای هر سه مدل با ارتفاع ۳، ۶ و ۹ متری در خاک نوع ۳ و زاویه میخ ۱۵ درجه تحت بار هارمونیک H4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع دیوار مقدار بیشینه تغییر مکان افقی پوسته در لبه گود رخ داده است. با توجه به جابه‌جایی رخ داده می‌توان مشاهده کرد که مد غالب تغییر شکل دیواره گود تحت چهار بار هارمونیک اعمالی و برای تمامی ارتفاع‌ها دوران حول نقطه تقاطع دیوار و کف گود می‌باشد. افزایش تغییر شکل بالای گود می‌تواند ناشی از کاهش اثر سربار قائم و در نتیجه کاهش اندرکنش میخ و خاک باشد.



(الف) ارتفاع گود ۳ متری

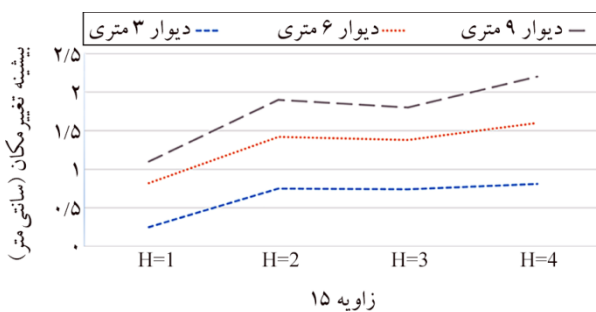


(ب) ارتفاع گود ۶ متری



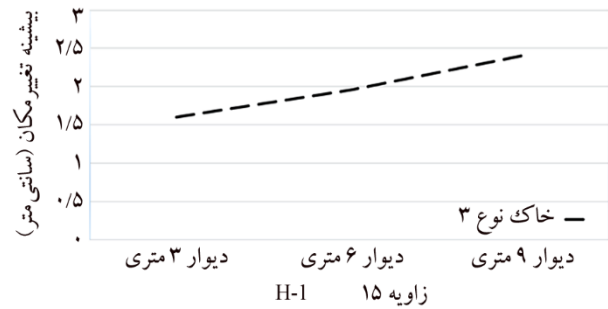
(پ) ارتفاع گود ۹ متری

شکل (۱۲): تغییر شکل افقی دیوار.



شکل (۱۳): تغییر شکل افقی دیوار با ارتفاع گود ۳، ۶ و ۹ متر، با زاویه میخ ۱۵ درجه، تحت بارگذاری هارمونیک مختلف.

در شکل (۱۱) نمایی از نمودار تغییرات بیشینه تغییر مکان افقی پوسته نما با تغییر ارتفاع گود برای زاویه میخ ۱۵ درجه، در خاک نوع ۳ و تحت بار هارمونیک H1 نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش ۱/۵ برابری تغییر مکان افقی پوسته برای تغییر ارتفاع گود از ۳ متر الی ۹ متر مشاهده می شود.



شکل (۱۱): نمودار بیشینه تغییر مکان افقی پوسته نما با ارتفاع گود- زاویه میخ ۱۵ درجه، بار هارمونیک H1 و خاک نوع ۳.

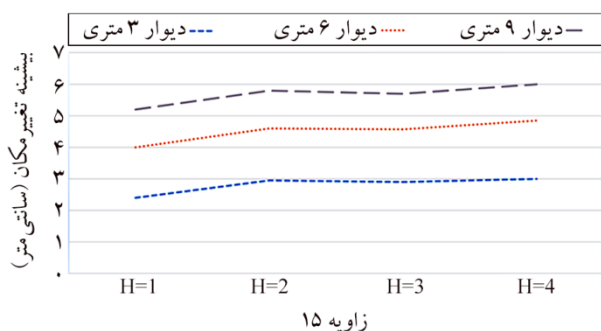
۸-۲- جابه‌جایی افقی دیوار

در شکل (۱۲) تغییرات جابه‌جایی افقی (برحسب متر) برای هر سه مدل با ارتفاع ۳، ۶ و ۹ متری ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می شود تغییرات میزان جابه‌جایی در خاک نوع دو با زاویه میخ ۱۵ درجه تحت بارگذاری H4 در ارتفاعات مختلف با تغییرات شدیدی مواجه شده است.

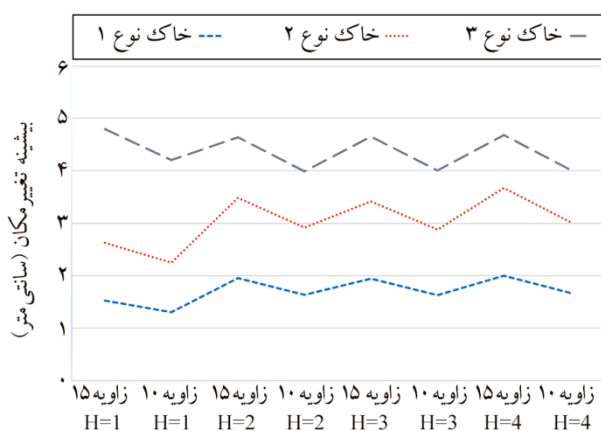
در شکل (۱۳) نمودار تغییرات بیشینه جابه‌جایی افقی برای ارتفاع مختلف گود تحت بارگذاری هارمونیک H1 الی H4 زاویه میخ ۱۵ درجه نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش تغییر مکان‌ها در ارتفاع ۹ متری در مقایسه با ارتفاع ۳ متری برای خاک نوع ۲ در تمام حالات بارگذاری لرزه‌ای مشاهده می شود.

۸-۳- نیرو در میخ‌ها

در شکل (۱۴) نمایی از نیروهای (برحسب کیلونیوتن) به وجود آمده در میخ‌ها برای هر سه مدل با ارتفاع ۳، ۶ و ۹ متری تحت بارگذاری H2 و زاویه میخ ۱۵ درجه و نوع خاک ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می شود در ارتفاعات پایین در شرایط لرزه‌ای بیشینه نیروی کششی در لایه اول رخ داده و با افزایش ارتفاع مقدار بیشینه نیرو به یک لایه مانده به آخر منتقل می گردد.



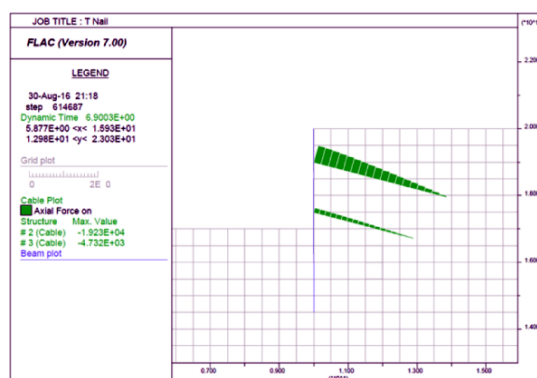
شکل (۱۵): نمودار بیشینه نیروی به وجود آمده در میخ‌ها تحت بارگذاری مختلف و ارتفاع گود- زاویه میخ ۱۵ درجه و خاک نوع ۳.



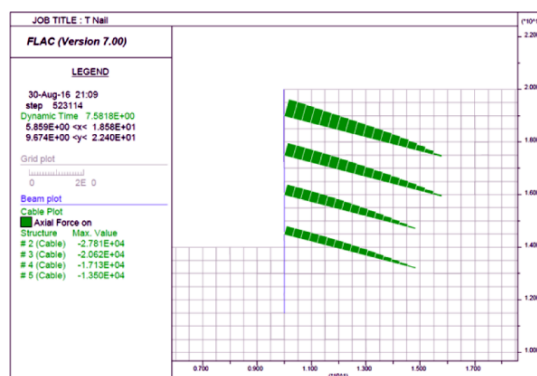
شکل (۱۶): نمودار بیشینه جابه‌جایی افقی در شرایط لرزه‌ای بر اساس نوع خاک و تجمع پارامترهای زاویه و نوع بار هارمونیک ارتفاع دیوار ۹ متر.

در شکل (۱۶) نمودار جابه‌جایی افقی بیشینه پوسته نما برای شرایط مختلف برای ارتفاع دیوار ۹ متری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش پارامترهای مقاومت برشی از خاک نوع ۱ به خاک نوع ۳ بر میزان تغییر مکان‌های افقی پوسته نما افزوده می‌شود. همچنین مقدار جابه‌جایی افقی در میخ با زاویه ۱۰ درجه از میخ با زاویه ۱۵ درجه کمتر می‌باشد.

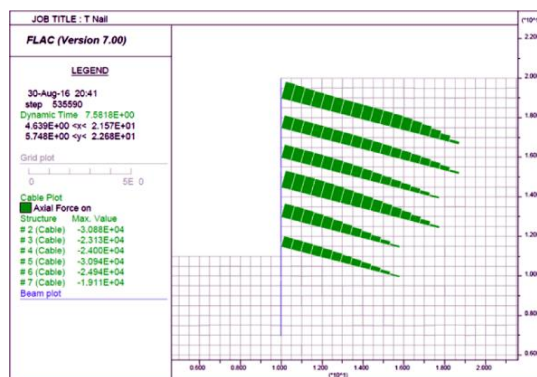
در شکل (۱۷) نمایی از تغییر شکل افقی بیشینه تمام حالات برای ارتفاع دیوار ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده نمود در بارگذاری هارمونیک ۱ با کاهش مشخصه‌های خاک، جابه‌جایی کل افزایش می‌یابد ولی در دیگر بارگذاری هارمونیک (۲-۳-۴) جابه‌جایی کل در نوع خاک دو بیشینه مقدار خود را داشته است که ناشی از نزدیکی پریرود طبیعی سازه و پریرود غالب زلزله می‌باشد. لذا عملکرد لرزه‌ای سازه‌های



(الف) ارتفاع گود ۳ متری



(ب) ارتفاع گود ۶ متری



(پ) ارتفاع گود ۹ متری

شکل (۱۴): نمایی از نیرو به وجود آمده در میخ‌ها، تحت بارگذاری H2 و زاویه میخ ۱۵ درجه و نوع خاک ۳.

در شکل (۱۵) نمایی از نمودار تغییرات بیشینه نیروی به وجود آمده در میخ‌ها با زاویه ۱۵ درجه و نوع خاک ۳ تحت تأثیر ارتفاع گود و برای حالات بارگذاری هارمونیک مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش دو برابری در مقدار نیروی بیشینه در تغییر ارتفاع گودبرداری از ۹ الی ۳ متری برای حالات مختلف بارگذاری لرزه‌ای مشاهده می‌شود.

گرفته و نتایج آنها برای شرایط مختلف مورد بحث قرار گرفت.
 ۱- با کاهش مشخصه‌ها و مقاومت برشی خاک (از نوع ۱ به ۳) تغییرات زیر به دست می‌آید:

- بر میزان نیروی میخ‌ها افزوده می‌شود.
 - جابه‌جایی افقی در لبه فوقانی گود و پوسته نما به شدت افزوده می‌شود.
 - میزان نشست‌ها افزایش می‌یابد و با کاهش پارامترهای خاک، بیشینه نشست از پشت‌نما به پشت منطقه تسلیح منتقل می‌شود.
- ۲- با کاهش زاویه میخ‌ها (از ۱۵ به ۱۰) تغییرات زیر به دست می‌آید:

- بر میزان نیروی میخ‌ها افزوده می‌شود.
- جابه‌جایی افقی لبه فوقانی گود و پوسته نما کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش را این‌طور می‌توان بیان نمود که در حالت مورد بررسی، هنگامی که زاویه میخ‌ها به ۱۰ درجه کاهش می‌یابد به صورت زاویه قائمه بیشتری پوش گسیختگی را قطع می‌نمایند.

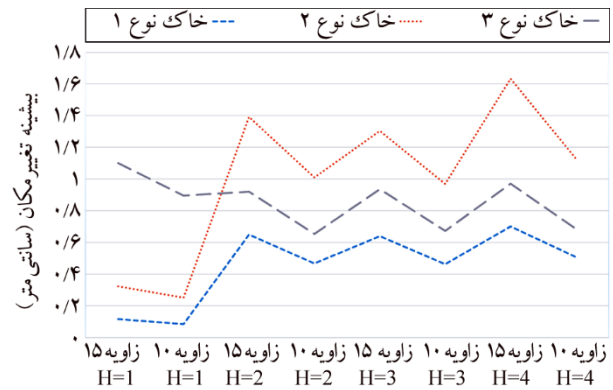
۳- با تغییر نوع بارگذاری هارمونیک از بار هارمونیک نوع ۱ به نوع ۴ موارد زیر بیان می‌گردد:

- نوع رفتار گود با تغییرات نوع خاک متغیر بوده که علت آن را می‌توان به اثر میرایی و جنس خاک در رفتار لرزه‌ای متفاوت سازه‌ها مرتبط دانست.
- با افزایش ارتفاع گود بر میزان جابه‌جایی‌ها افقی لبه بالای گود افزوده می‌شود.

۴- نتایج تحلیل‌های دینامیکی محاسبه شده از پراکنندگی داده‌ها تحت چهار بار هارمونیک مختلف را نشان می‌دهد. لذا عملکرد لرزه‌ای سازه‌های نگهبان میخ‌گذاری شده به پارامترهای نگاشت وابسته است و انتخاب پارامترهای اصلی نگاشت شامل پریود قالب، حداکثر شتاب و طول مدت‌زمان نگاشت بسیار مهم بوده و نیاز به دقت کافی دارد.

۵- مد غالب تغییر شکل دیواره گود تحت چهار بار هارمونیک اعمالی و برای تمامی ارتفاع‌های دوران حول نقطه تقاطع دیوار و کف گود می‌باشد. افزایش تغییر شکل بالای گود می‌تواند ناشی از کاهش اثر سربار قائم و در نتیجه کاهش اندرکنش میخ و خاک باشد.

نگهبان میخ‌گذاری شده به پارامترهای نگاشت وابسته است و انتخاب پارامترهای اصلی نگاشت شامل پریود قالب، حداکثر شتاب و طول مدت‌زمان نگاشت بسیار مهم بوده و نیاز به دقت کافی دارد. در ضمن مقدار جابه‌جایی افقی در میخ با زاویه ۱۰ درجه از میخ با زاویه ۱۵ درجه کمتر می‌باشد.



شکل (۱۷): نمودار بیشینه جابه‌جایی کل در شرایط لرزه‌ای بر اساس نوع خاک و تجمع پارامترهای زاویه و نوع بار هارمونیک برای ارتفاع ۶ متر.

۹- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه روش میخ‌گذاری عمدتاً در پایدارسازی‌های موقت استفاده می‌شود و کمتر در سازه‌های دائمی مورد بررسی قرار می‌گیرد سعی بر آن شد تا از نظر لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله بر روی تحلیل عددی به روش تفاضل محدود تمرکز شده است. ابتدا صحت‌سنجی نرم‌افزار FLAC در خصوص طراحی دیوارهای میخ‌گذاری شده دائمی بررسی گردید. با در نظر گرفتن ۱۵ نگاشت زلزله و بر روی ساختگاه‌های نوع ۱، ۲ و ۳ بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، بارهای هارمونیک معادل محاسبه شده و تحلیل‌های دینامیکی برای چهار بار هارمونیک معادل و سه ساختگاه انجام شد. در ضمن از محدودیت‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که مصالح خاک به صورت همگن در نظر گرفته شده و سطح آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته نشده است. بر این اساس تأثیر نوع و جنس خاک، ارتفاع گودبرداری، زاویه میخ‌ها و نوع بارهای مختلف لرزه‌ای از لحاظ پارامتری مورد بررسی قرار

مراجع

11. Mark, R.T. and Mladen, V. (2000) Dynamic failure mechanism of soil-nailed excavation models in centrifuge. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(3), 227-235.
12. Zhang, J.P., Zhang, J., Qui, T. (2001) Model test by centrifuge of soil nail reinforcements. *Journal of Testing and Evaluation*, **29**(4), 315-328.
13. Zhang, G., Cao, J., and Wang, L. (2013) Centrifuge model tests of deformation and failure of nailing reinforced slope under vertical surface loading conditions. *Soils and Foundations*, **53**(1), 117-129.
14. Rotte, V.M. and Viswanadham, B.V.S. (2013) Centrifuge Model Studies on the Performance of Slopes with and without Nails Subjected to Seepage. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Roorkee, 1-8.
15. Zhang, G., Cao, J., and Wang, L. (2014) Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions. *Soils and Foundations*, **54**(6), 1175-1187.
16. Sivakumar Babu, G.L. and Murthy B.R.S. (2002) Analysis of construction factors influencing the behavior of soil nailed earth retaining walls. *Ground Improvement*, **6**(3), 137-143.
17. Cheuk, C.Y., Ng, C.W.W., and Sun, H.W. (2005) Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects. *Computers and Geotechnics*, **32**(4), 290-303.
18. Sheikhabaei, A.M., Halabian, A.M., and Hashemolhosseini, S.H. (2010) Analysis of soil nailed walls under harmonic dynamic excitations using finite difference method. *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California.
19. Wu, J.C. and Shi, R. (2012) seismic analysis of soil nailed wall using finite element method. *Advanced Materials Research*, **535-537**, 2027-2031.
20. Jaya, V. and Annie, J. (2013) An Investigation on the Dynamic Behavior of Soil Nail Walls. *Journal of Civil Engineering and Science*, **2**(4), 241-249.
21. Itasca (1995) *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3, User Manual*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
1. Lazarte, C.A., Elias, V., Espinoza, R.D., and Sabatini, P.J. (2003) *Geotechnical Engineering Circular No. 7, Soil Nail Walls*. Federal Highway Administration (FHWA), Report No. FHWA0-IF-03-017. Washington, DC., USA.
2. Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929) On the determination of earth pressure during earthquakes. *Proceedings, World Eng. Conference*, **9**, 176.
3. Okabe, S. (1926) General theory of earth pressure. *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers*, Tokyo, Japan, **12**(1).
4. Pedley, M.J. (1992) Ground modification on soil and rock anchorage, rock bolting, soil nailing and dowelling. *Soil Nailing Lecture Notes on Ground Modification Seminar*, University of Technology, Sydney, 51-89.
5. Davis, M.C.R., Jacob, C.D., and Bridle, R.J. (1993) *An Experimental Investigation of Soil Nailing Retaining Structures*. Thomas Telford, London.
6. 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), 141-150.
7. Li, J., Tham, L.G., Junaideen, S.M., Yue, Z.Q., and Lee, C.F. (2008) Loose fill slope stabilization with soil nails: full-scale test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **134**(3), 277-288.
8. 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**, 48-60.
9. Gutierrez, V. and Tatsuoka, A.F. (1988) Role of facing in reinforcing cohesion less soil slopes by means of metal strips. *Proceedings of the International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan, 289-294.
10. Vucetic, M., Tufenkjian, M., and Doroudian, M. (1993) Dynamic Centrifuge Testing of Soil-Nailed Excavations. *Geotechnical Testing Journal*, **16**(2), 172-187.

22. Soheil, G. and Saidi, M. (2011) An investigation on the behavior of retaining structure of excavation wall using obtained result from numerical modeling and monitoring approach (a case study of international "Narges Razavi 2 hotel", Mashhad). *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*.
23. Komakpanah, A. and Yazdandoust, M. (2015) Investigation into the effect of earthquake index parameters on seismic performance of reinforced soil walls to select an appropriate design earthquake, **3.12**(1.1), 17-26.
24. Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2016) *DEEPSOIL 6.1, User Manual*.

Determination of the Dynamic Behavior of Soil Nailed Walls Based on Displacement

Iraj Rahmani^{1*} and Amir Nejati²

1. Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: i.rahmani@bhrc.ac.ir
2. M.Sc. Graduate of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran

Demand for high-rise buildings and shopping malls has increased in recent years. For this reason, these buildings have a variety of basements. Due to insufficient land, some parts of these structures are being built underground. Stabilizing vertical cuts by emerging methods provides a new way for the construction industry. In addition, the demand for stabilizing vertical cuts on highways and railways against dynamic forces has been raised. There are various methods for stabilizing underground cuts. Soil nailing is one of the most common methods for stabilizing cut slopes in building industry. In this method, the soil is strengthened by placing the steel rods into the drilled holes on the wall and the ground. It is worth mentioning that, this method could be used for underground construction. Whereas soil nailing wall system needs less space in comparison with other retaining wall systems, in urban areas especially where walls cuts are surrounded by structures is more applicable. Observations of the performance of soil nails walls in recent earthquakes indicate that their destruction by deep excavations rarely occurs. Literature review on the soil nail walls shows that the mechanism of reinforcement and design of the soil nail walls is without considering of seismic loading. However, few studies have been performed on the seismic behavior of these walls. In this paper, the dynamic behavior of the steel soil nail walls has been investigated numerically. In order to validate two-dimensional, nonlinear finite difference model created by FLAC software, obtained results from the instrumental excavation wall (Hotel Narges No.2) were used. In this study, a numerical parametric study was performed to investigate the factors affecting the behavior of the soil nail wall system. This parametric study has the effect of wall height (3, 6 and 9 m), nail angle (10 and 15 degrees), soil properties (type 1 to 3 based on Iranian code of practice for seismic resistant design of building (2800)) and seismic loading characteristics such as magnitude, frequency of the maximum acceleration of the earth's surface were examined. In addition, four equivalent harmonic loads instead of 15 time history are used. After analyzing 72 different models, it was concluded that by decreasing the soil shear strength (types 1 to 3), the displacement of the upper edge of the wall would increase sharply, with the decrease of the nail angle (from 15 to 10) horizontal displacement of the upper edge wall reduced. By decreasing the angle of the nails (from 15 to 10), the force of the nails is increased. Increasing the height of the wall increases the horizontal displacement of the upper edge of the wall. Also by changing the type of harmonic loading type 1 to type 4, the behavior of the soil nail wall varies with soil type changes, which can be attributed to the effect of soil damping and soil type on the different seismic behavior of the nailed structures. The calculated dynamic analysis results show that the data are scattered under four different harmonic loads. Therefore, the seismic performance of the soil nail structures depends on the geometry parameters and the selection of the main mapping parameters including mold period, acceleration, and mapping duration is very important and requires sufficient accuracy. The dominant mode of deformation of the soil nail wall for four harmonic loads, and for all heights is around the intersection point of the wall and cavity.

Keywords: Soil Nail Wall, Reinforced Soil Structure, Dynamic Behavior, Finite Difference Analysis.