

تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر پایداری خاکریزهای مسلح شده با ژئوسل

سعید غفارپور جهرمی^{۱*} و مینا محسنی نژاد^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰)

چکیده

امروزه زلزله‌های متعددی در اغلب نقاط جهان روی می‌دهد که از نظر شدت، مدت، انرژی و دیگر مشخصات لرزه‌ای بسیار متفاوت هستند؛ لذا مقدار و میزان خسارات وارد شده بر سازه‌های مختلف نیز تحت تأثیر مشخصات زلزله قرار دارد. در این راستا، تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار و پاسخ دیوارهای خاک مسلح نیز اهمیت دارد. در پژوهش حاضر، با شبیه‌سازی عددی خاک مسلح شده با ژئوسل با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی در نرم‌افزار تفاضل محدود Flac-2D و تحلیل لرزه‌ای تاریخچه زمانی زلزله به روش دینامیکی غیرخطی، ضمن بررسی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار و پاسخ لرزه‌ای خاک مسلح، نقش عوامل مختلف مانند هندسه خاکریز و مشخصات مسلح‌کننده نیز مطالعه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع و وزن خاکریز، جابه‌جایی لرزه‌ای افزایش می‌یابد. مقدار این جابه‌جایی در زلزله‌های مختلف از نظر محتوای فرکانسی متفاوت است. همچنین با افزایش طول و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، جابه‌جایی لرزه‌ای کاهش می‌یابد که این بهبود رفتار در زلزله‌های مختلف به محتوای فرکانسی نیز وابسته است.

واژه‌های کلیدی: خاک مسلح، زلزله، ژئوسل، محتوای فرکانسی، پایداری، جابه‌جایی لرزه‌ای

۱ مقدمه

روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود است. مطالعات آزمایشگاهی به روش‌های مختلفی مانند آزمایش میز لرزان، آزمایش سانتریفیوژ و مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس‌های مختلف انجام شده است. پژوهش‌های اولیه در زمینه دیوارهای خاک مسلح را مانستر در سال ۱۹۲۵ در آمریکا انجام داد. او یک دیوار حائل خاک مسلح را با استفاده از مسلح‌کننده‌های چوبی و یک نمای سبک ساخت و نشست خاکریز را با استفاده از مسلح‌کننده‌ها کاهش داد. هنری ویدال، مهندس فرانسوی، توانست اختراع خود را با نام «خاک مسلح» در سال ۱۹۶۳ به ثبت برساند که در آن از تسمه‌های فلزی به‌عنوان مسلح‌کننده استفاده کرد. در ابتدا از اجزای فلزی برای مسلح‌سازی خاک استفاده می‌شد ولی به مرور زمان، ژئوستتیک‌های غیر فولادی با ظرفیت باربری و دوام مناسب به‌عنوان گزینه مناسب‌تر مطرح شدند (جونز، ۲۰۱۳).



شکل ۱. کاربرد ژئوسل در مهندسی ژئوتکنیک.

پژوهشگران تاکنون تحقیقات زیادی را در حوزه تحلیل دینامیکی خاکریزهای مسلح انجام داده‌اند. یوگندراکومار و همکاران (۱۹۹۱) با روش اجزای محدود و سگرتین و باستیک (۱۹۸۸) با روش اجزای محدود به ارزیابی لرزه‌ای خاک مسلح با استفاده از مسلح‌کننده‌های مختلف پرداختند. باترست و کای (۱۹۹۵) نیز با استفاده از

از چند دهه گذشته، استفاده از روش تسلیح خاک با مصالح فلزی و غیرفلزی مانند تسمه‌های فلزی و ژئوستتیک‌ها جهت افزایش باربری، کاهش نشست و بهبود رفتار سازه‌های خاکی بسیار رایج است. دیوارهای خاک مسلح نیز که یک سازه خاکی محسوب می‌شوند، از این روش سود می‌برند. استفاده از خاک مسلح به‌دلیل هزینه کمتر اجرا، سرعت زیاد اجرا و رفتار مکانیکی مناسب در مقایسه با دیوارهای وزنی و بتن مسلح، کاربرد فراوانی در مسائل مهندسی دارد. استفاده از مصالح غیرفلزی و پلیمری نظیر ژئوستتیک‌ها جهت تسلیح خاک مسلح به‌دلیل دوام زیاد، سهولت اجرا و درگیری بهتر با خاک بسیار متداول است. تحقیقات مختلف پژوهشگران، بیانگر بهبود رفتار لرزه‌ای خاک مسلح است. به‌دلیل وقوع زلزله‌های متعدد در بسیاری از نقاط جهان و به‌منظور کاهش خسارات ناشی از زلزله و امکان بهره‌برداری از سازه‌های با اهمیت زیاد جهت خدمت‌رسانی و امداد رسانی، مطالعات و تحقیقات برای بررسی رفتار و پاسخ لرزه‌ای خاک مسلح‌شده با ژئوستتیک در شرایط مختلف لرزه‌ای چه از نظر پایداری و چه از نظر مقدار و نحوه تغییر مکان و تغییر شکل حائز اهمیت است. رفتار و پاسخ لرزه‌ای نباید فراتر از مقادیر مجاز باشند تا شرایط بهره‌برداری مختل نشود. مسلح‌کننده ژئوسل که از نوارهای پلی‌اتیلن HDPE یا PE ساخته می‌شود، با جوش فراصوت در طول عرض خود سلول‌هایی سه‌بعدی تشکیل می‌دهد که با مصالح خاکی پُر می‌شوند. این سلول‌ها می‌توانند فشارهای همه‌جانبه زیادی بر خاک درون سلول اعمال کنند تا رفتار و مشخصات مکانیکی بهتری نسبت به دیگر مسلح‌کننده‌ها از خود نشان دهد (شکل ۱).

در سال‌های اخیر، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی درباره خاکریزهای مسلح در شرایط استاتیکی و دینامیکی انجام گرفته است. عمده مطالعات عددی شامل

ژئوگرید را بررسی کردند. مطالعات آنها با مدل سازی فیزیکی و همچنین مدل سازی سه بعدی با نرم افزار Abaqus انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش سربار در پله بالایی اثر بیشتری نسبت به پله پایینی دارد. پایداری خاک پشت دیوار متأثر از گسیختگی مسلح کننده ها است به طوری که با افزایش سربار، کرنش طولی مسلح کننده ها و تنش افقی در پشت بلوک های نما با افزایش عمق کاهش می یابد.

عبدلوهاب و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تحلیل تفاضل محدود در نرم افزار FLAC، تحلیل عددی یک دیوار خاک مسلح را با سه نوع مسلح کننده پلیمری و فلزی ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد مشخصات هندسی مسلح کننده و توزیع آنها در پایداری و تغییر مکان دیوار بیش از جنس آن مؤثر هستند. لچینسکی و لینگ (۲۰۱۳) با مدل سازی ژئوسل ها به صورت محفظه های مکعبی شکل، تأثیر آنها را زیر خطوط راه آهن به روش عددی بررسی کردند. مهدی پور و همکاران (۲۰۱۳) با مطالعات عددی تحلیل پارامترهای مختلف شیب های مسلح شده با ژئوسل به بررسی نحوه استفاده از مدل تیر جهت شبیه سازی رفتار ژئوسل ها پرداختند که نتایج نشان داد در این شبیه سازی، تنش های خمشی و برشی نیز علاوه بر تنش کششی در اجزاء وجود دارند. در آن تحقیق، مطالعات پارامتریک با تغییرات در عمق لایه ژئوسل، تعداد لایه، فاصله بین لایه ها، طول، ضخامت و سختی مسلح کننده ها نیز انجام شد. مسلح کننده ژئوسل توانست در افزایش ضریب اطمینان و کاهش تغییر مکان جانبی مؤثر باشد. ژئوسل مانند یک دال وسیع عمل می کند و نیروی وارد را در سطح وسیعی به خاک منتقل می کند. منجی و همکاران (۲۰۱۴) با انجام دادن مطالعات عددی و آزمایشگاهی، مقاومت مفاصل و تغییر شکل جزء متشکل از تک سلول ژئوسل و تحت بار تک محوره فشاری را بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد با افزایش زاویه

یک نرم افزار عددی، به مدل سازی اجزای محدود و تحلیل دینامیکی دیوار حائل مسلح شده با ژئوسنتتیک پرداختند. الیاس و همکاران (۱۹۹۷) با اعمال فشار قائم غیریکنواخت بر سطح خاک مسلح، تغییر مکان آبی قائم و افقی (کوتاه مدت) ناشی از سربار را اندازه گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با ثابت نگه داشتن بار در مدت زمان طولانی، تغییر مکان ناشی از خزش روی نشست قائم و افقی اثرگذار است. در ادامه، باترست (۱۹۹۷) در تحقیق دیگری روش تحلیل دینامیکی دیوارهای خاکی مسلح شده با ژئوسنتتیک را برای تقویت خاکریز و شیب های خاکی معرفی کرد.

در پژوهش الامام و باترست (۲۰۰۵) تأثیر پارامترهای هندسی دیوار شامل ارتفاع و نوع نما بر پاسخ دیوار خاک مسلح تحت بارگذاری استاتیکی با استفاده از شبیه سازی عددی و مدل سازی فیزیکی بررسی شده است. مدهوی و راجاگوپال (۲۰۰۷) با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ژئوفم (GEOFEM)، کارایی ژئوسل را در مسلح سازی لایه های خاک ضعیف با تحلیل پارامتریک بررسی کردند. در این تحقیق از مدل معادل برای بیان سختی و مقاومت خاک مسلح شده استفاده شد. سختی خاک مسلح شده با ژئوسل با یک رابطه تجربی متشکل از سختی ماسه و مدول کششی ژئوسل تعریف شد. فخاریان و عطار (۲۰۰۷) با استفاده از نرم افزار FLAC کوله یک پل از نوع خاکریز مسلح با ژئوسنتتیک را به صورت استاتیکی و دینامیکی مدل سازی کردند. نتایج تحلیل استاتیکی نشان داد بیشترین جابه جایی افقی در نمای کوله به سبب بار عرشه پل در تراز دوسوم ارتفاع کوله رخ می دهد. در تحلیل دینامیکی نیز مشخص شد جابه جایی افقی بسیار مهم تر از جابه جایی قائم خاک بوده و نیروی مسلح کننده ها در شرایط دینامیکی بیشتر از حالت استاتیکی است.

یو و کیم (۲۰۰۸) عملکرد خاک مسلح شده با دو لایه

ساخته شده و مقایسه با مدل سازی فیزیکی نشان داد می توان به جای استفاده از چند لایه ژئوسل، از یک لایه با ارتفاع زیاد استفاده کرد.

ون کاتسوارلو و هجد (۲۰۲۰) تأثیر نوع و مشخصات خاک پرکننده سلول ژئوسل را در عملکرد خاکریز مسلح بررسی کردند. آنها چهار نوع خاک مختلف شامل رس، رس لای دار، خاک سرباره و خاک دانه ای ماسه را بررسی و مقادیر جابه جایی و مدول برشی خاک را در حالت های مختلف محاسبه کردند. این نتایج نشان داد با افزایش اندازه ذرات خاک و اصطکاک داخلی، میزان جابه جایی، کاهش و مدول برشی، افزایش می یابد.

ویهوشا و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه ای مروری در حوزه کاربرد ژئوسل و مدل سازی عددی آن ارائه و کاربردهای مختلف این نوع مسلح کننده و نحوه مدل سازی آن را در چند دهه اخیر مقایسه کردند.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می دهد با وجود اینکه پژوهشگران همچنان درباره ارزیابی دینامیکی و لرزه ای خاکریزها با مسلح کننده های مختلف تحقیق می کنند، در شبیه سازی های عددی، ژئوسل به دلیل ساختار سه بعدی کم تر بررسی شده است. همچنین در روش های سنتی به منظور تحلیل لرزه ای سازه های ژئوتکنیکی و جهت ساده سازی، اثر زلزله طراحی اغلب فقط با شتاب بیشینه زلزله طرح یا در شرایط خاص با استفاده از طیف های پاسخ طرح در محاسبات لحاظ می شود، در حالی که تحقیقات مختلف بیانگر این واقعیت است که دیگر مشخصات و پارامترهای زلزله نیز بر رفتار لرزه ای و پاسخ سازه ها اثرگذار هستند. یکی از این پارامترها اثر محتوای فرکانسی زلزله است که کمتر ارزیابی شده است و در آیین نامه های رایج به صورت طیف پاسخ طرح مطرح می شود. این موضوع از آنجا اهمیت دارد که پاسخ یک سازه به دو زلزله با شتاب بیشینه یکسان می تواند بسیار متفاوت باشد؛ از این رو، در پژوهش حاضر شبیه سازی های

اصطکاک داخلی مصالح داخل ژئوسل، اندرکنش بیشتر و تغییر شکل کمتر می شود و به دنبال آن ظرفیت باربری افزایش می یابد. به دلیل ساختار و شکل لانه زنبوری، مدل سازی ژئوسل همواره چالشی در مدل سازی عددی است. هجدا و سیتام (۲۰۱۵) روش مدل سازی واقع گرایانه ای را برای شبیه سازی سه بعدی ژئوسل ها ارائه کردند. مدل سازی عددی با تشکیل شکل واقعی و سه بعدی لانه زنبوری ژئوسل با نرم افزار تفاضل محدود Flac سه بعدی انجام شد. این مدل سازی با اجرای آزمون های آزمایشگاهی مختلف صحت سنجی شد و تطابق پذیری نشان داد.

یو و همکاران (۲۰۱۵) ارتباط مدل سازی در نرم افزار Plaxis و Flac را با ارائه اطلاعاتی درباره انتخاب اجزاء سازه ای جهت شبیه سازی جزئیات برهم کنش خاک و مسلح کننده خاک در دیوارهای وزنی خاک مسلح معرفی کردند. راهمونی و همکاران (۲۰۱۶) مطالعات عددی خود را با استفاده از Flac سه بعدی برای بررسی تأثیر زاویه شیب دیوار خاک مسلح، چیدمان نما، زاویه اصطکاک خاک و همچنین زاویه شیب خاکریز پشت دیوار انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد در طراحی دیوارها با استفاده از آیین نامه AASHTO و FHWA، نادیده گرفتن شیب خاکریز پشتی و زاویه اصطکاک خاک و جزء نما در محاسبه طول مسلح کننده، به طراحی اقتصادی تر پروژه منجر خواهد شد.

سانگ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از آزمایش ساتریفیوژ، تعادل محدود خاکریز مسلح شده با ژئوسل را در مقیاس کوچک بررسی کردند. در این تحقیق توزیع تنش و کرنش در سلول و خاک درون سلول اندازه گیری شد. سپس آنها در تحقیق دیگری (سانگ و تیان، ۲۰۱۹) مدل سه بعدی خاکریز مسلح شده با ژئوسل را در شرایط مختلف بررسی و با نتایج آزمایش مدل سازی فیزیکی ساتریفیوژ مقایسه کردند. کرنش و جابه جایی در مدل

عددی به روش مدل سازی دوبعدی خاکریز مسلح شده با ژئوسل در نرم افزار Flac-2D و تحلیل لرزه ای خاکریز مسلح به روش تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از تاریخچه زمانی زلزله های مختلف ایران انجام می شود و با بررسی رفتار لرزه ای خاکریز مسلح، نقش عوامل مختلف چون هندسه دیوار، مشخصات مسلح کننده و همچنین تفاوت زلزله های مختلف مطالعه و بررسی می شود.

۲ روش تحقیق و اعتبارسنجی

یکی از روش های رایج در مدل سازی خاکریز مسلح و تحلیل استاتیکی و دینامیکی آن، روش تفاضل محدود است. این روش از مهم ترین و قدیمی ترین روش های عددی کاربردی در محیط های پیوسته است که در اغلب شبیه سازی های استاتیکی و دینامیکی سازه های مختلف استفاده می شود. فرمول بندی در روش عددی تفاضل محدود می تواند به صورت صریح (وابسته به زمان) یا غیر صریح (ماتریسی) بیان شود. نرم افزار Flac-2D، یک نرم افزار عددی تفاضل محدود است که از نوع صریح برای فرمول بندی استفاده می کند و با تشکیل شبکه هایی دوبعدی متشکل از مناطق چندضلعی، توانایی زیادی در شبیه سازی مسائل مکانیکی به ویژه سازه های ژئوتکنیکی سطحی، زیرزمینی و نیز مدل سازی اندرکنش سازه و خاک دارد. همچنین توانایی این نرم افزار در شبیه سازی استاتیکی و دینامیکی سازه های ژئوتکنیکی چشمگیر

است.

در این تحقیق، اعتبارسنجی مدل سازی عددی در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول، شبیه سازی و تطابق داده ها با نتایج آزمایش بارگذاری کششی روی مسلح کننده ژئوسل مستقر در خاک ماسه ای اجرا می شود. در مرحله دوم و شبیه سازی دینامیکی، نتایج نرم افزار با نتایج آزمایش میز لرزان روی دیوار خاک مسلح در شرایط دینامیکی تطابق داده می شود.

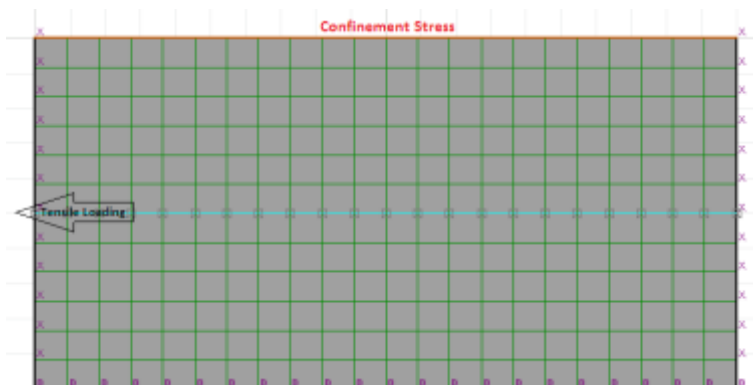
در اولین مرحله از اعتبارسنجی، از نتایج آزمایش کشش مسلح کننده ژئوسل (شوکلای، ۲۰۱۷) استفاده می شود. این آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی انجام می شود و مسلح کننده مستقر در یک نمونه خاک دانه ای، تحت بار کششی قرار می گیرد. لایه خاک، دو متر طول و یک متر ارتفاع و عرض دارد. برای شبیه سازی عددی در این مرحله، از مدل رفتاری سخت شونده استفاده می شود و سطح فوقانی نمونه تحت فشار قائم یکنواخت معادل ۸ کیلو پاسکال قرار می گیرد. به دلیل محدودیت نرم افزار در مدل سازی سه بعدی، مسلح کننده ژئوسل به صورت صفحه ای در وسط لایه خاک شبیه سازی می شود. در آزمایش بیرون کشش، با اعمال گام به گام جابه جایی افقی یکنواخت معادل ۵ میلیمتر بر مسلح کننده، باربری کششی به صورت مرحله ای و متناسب با جابه جایی اندازه گیری می شود. شکل ۲ مدل سازی کلی و هندسی آزمایش را با اعمال نیروی کششی نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات نمونه ماسه ای (شوکلای، ۲۰۱۷).

| γ | ν | ϕ (degree) | ψ (degree) | E_{50}^{ref} | E_{oed}^{ref} | E_{ur}^{ref} | m |
|------------------------|-------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----|
| ۱۵.۸ kN/m ³ | ۰.۳ | ۳۶ | ۶ | kPa۵۰ | kPa۵۰ | kPa۱۵۰ | ۰/۵ |

جدول ۲. مشخصات لایه مسلح کننده ژئوسنتتیک (شوکلای، ۲۰۱۷).

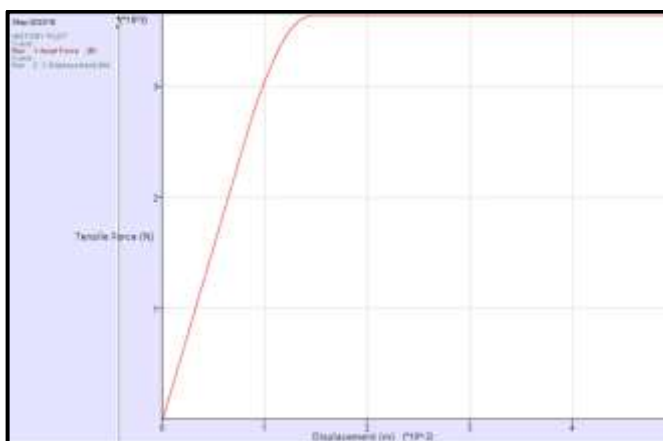
| E (kN/m ²) | F _{ty} (kN) |
|------------------------|----------------------|
| ۲۵۰۰ | ۱۰۰ |



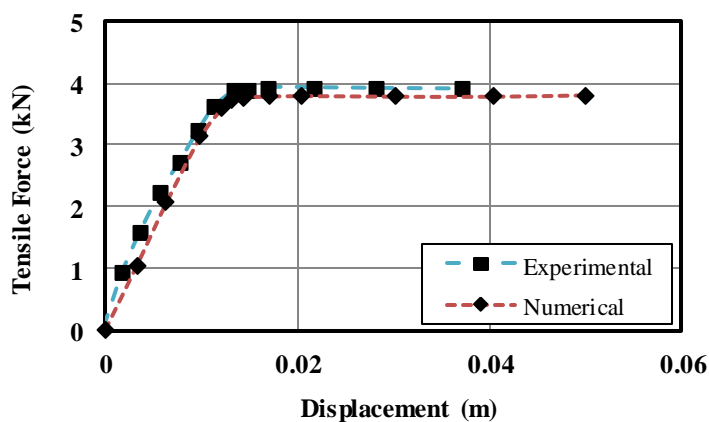
شکل ۲. مدل هندسی نمونه آزمایشگاهی.

نحوه توزیع جابه‌جایی مسلح‌کننده با اعمال گام‌به‌گام جابه‌جایی افقی نشان داده شده است محور افقی در این شکل، جابه‌جایی و محور قائم، ارتفاع دیوار بر حسب متر است.

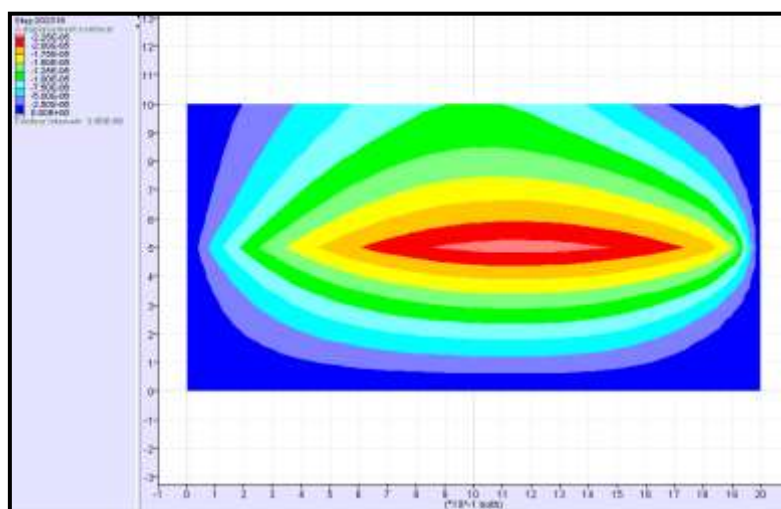
به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Flac-2D، باربری کششی مسلح‌کننده طی تحلیل غیرخطی استاتیکی ارزیابی و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده آزمایش مقایسه شده است (شکل‌های ۳ و ۴). در شکل ۵



شکل ۳. منحنی بار کششی - جابه‌جایی افقی مسلح‌کننده در آزمایش بیرون کشش طی تحلیل عددی.



شکل ۴. مقایسه نتایج بار کششی - جابه‌جایی افقی مسلح‌کننده در آزمایش مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی.



شکل ۵. توزیع مقادیر جابه‌جایی‌های افقی مسلح‌کننده.

جبهه دیوار طی تحلیل دینامیکی غیرخطی با کمک نرم‌افزار با جابه‌جایی‌های متناظر آزمایش تطابق داده شده است.

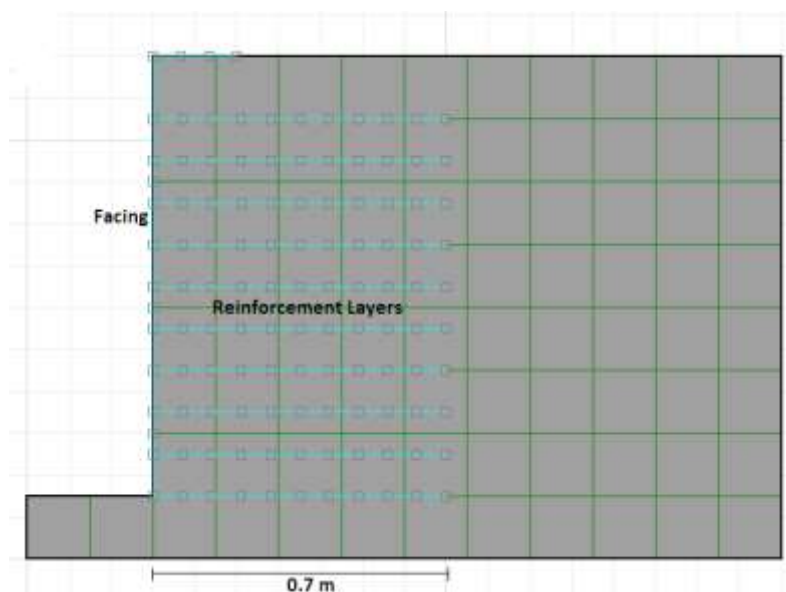
برای شبیه‌سازی عددی کف دیوار خاک مسلح، از یک توده دانه‌ای همگن و همسان با عرض ۱۷۵ و ضخامت ۱۵ سانتیمتر و جهت شبیه‌سازی خاکریز، از یک توده دانه‌ای همگن و همسان با عرض ۱۴۵ و ارتفاع ۱۰۰ سانتیمتر استفاده شده است. مشخصات خاکریز و خاک بستر در جدول ۳ آمده است. شبیه‌سازی پوسته دیوار با یک عضو سازه‌ای به شکل نوار با ارتفاع ۱۰۰ و ضخامت ۱ سانتیمتر انجام شده است و برای شبیه‌سازی مسلح‌کننده از عضو سازه‌ای نواری با طول ۷۰ و ضخامت ۱ سانتیمتر با فواصل عمودی ۱۰ سانتیمتر (شکل ۶) استفاده شده است. همچنین در این تحلیل، میرایی رایلی با فرکانس طبیعی ۵۰ هرتز و نسبت میرایی ۵ درصد لحاظ شد.

مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ بیانگر تطابق خوب بار-جابه‌جایی مسلح‌کننده طی اعمال گام به گام جابه‌جایی افقی به نمونه است. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد میزان محدوده توزیع جابه‌جایی‌های افقی ماسه در اطراف مسلح‌کننده به خصوص میانه بیشتر است.

در مرحله دیگری از اعتبارسنجی مدل، از نتایج شبیه‌سازی یک مدل فیزیکی خاک مسلح در آزمایش میز لرزان استفاده شد که صابرمهانی و همکاران (۲۰۰۹) آن را انجام داده‌اند. در این تحقیق ارتفاع دیوار خاک مسلح برابر ۱ متر و ضخامت خاک بستر کف برابر ۱۵ سانتیمتر است و خاکریز از نوع دانه‌ای است. خاکریز پشت دیوار از بخش غیرمسلح و بخش مسلح شامل ۱۰ لایه ژئوسنتتیک با طول ۷۰ سانتیمتر و فاصله ۱۰ سانتیمتر تشکیل شده است. مدل فیزیکی خاک مسلح روی میز لرزه تحت ارتعاش افقی در بستر قرار گرفته و بار ثقلی نیز به‌عنوان سربار قائم اعمال شده است. جابه‌جایی‌های جانبی

جدول ۳. مشخصات پی و خاکریز دانه‌ای دیوار (صابرمهانی و همکاران، ۲۰۰۹).

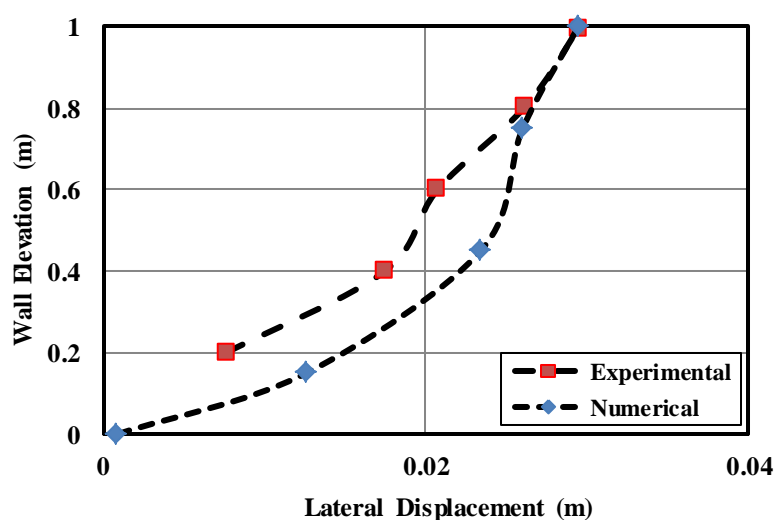
| | γ (kN/m ³) | E (kN/m ²) | ν | ϕ (degree) | ψ (degree) |
|--------------|-------------------------------|------------------------|-------|-----------------|-----------------|
| بستر کف (پی) | ۱۶/۳ | ۲۵ | ۰/۳ | ۳۸ | ۹ |
| خاکریز | ۱۵/۱ | ۱۲ | ۰/۳ | ۳۸ | ۹ |



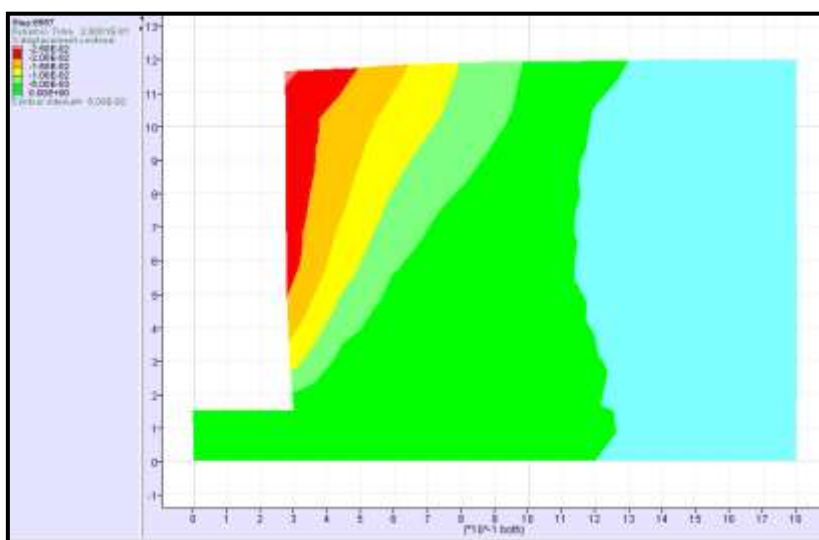
شکل ۶. ابعاد هندسی مدل سازی خاکریز و مسلح کننده.

روند و نحوه پاسخ هر دو روش مشابه و با اختلاف کمتر از ۲۰ درصد است و پذیرفتنی تشخیص داده می شود. همچنین با توجه به نتایج شکل های ۷ و ۸، مشاهده می شود میزان و محدوده جابه جایی لرزه ای در محدوده تاج دیوار مقدار بیشینه خواهد داشت. محور افقی در شکل ۸، جابه جایی و محور قائم، ارتفاع دیوار برحسب متر است.

جهت حصول اطمینان از صحت شبیه سازی های عددی در نرم افزار Flac2D، مقادیر جابه جایی های جانبی خاکریز در یک تحلیل دینامیکی و غیرخطی با مقادیر اندازه گیری شده از آزمایش میز لرزه مقایسه شدند (شکل ۷). شکل ۸ توزیع جابه جایی های جانبی خاکریز مسلح را پس از تحلیل نشان می دهد. شکل ۷ بیانگر انطباق به نسبت مناسب نتایج تحلیل و نتایج آزمایش میز لرزه است.



شکل ۷. مقایسه جابه جایی جانبی در ارتفاع خاکریز (میز لرزان و تحلیل عددی).



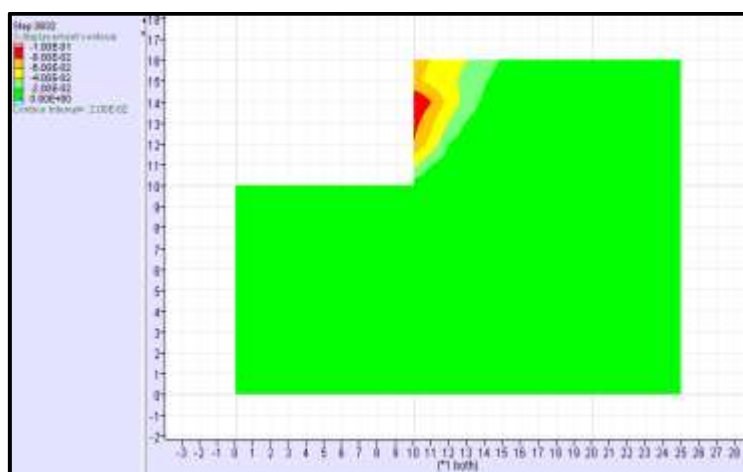
شکل ۸. نحوه توزیع جابه‌جایی‌های جانبی خاکریز پس از تحلیل عددی دینامیکی.

این تحلیل از نوع سخت‌شونده با پارامترهای جدول ۱ است.

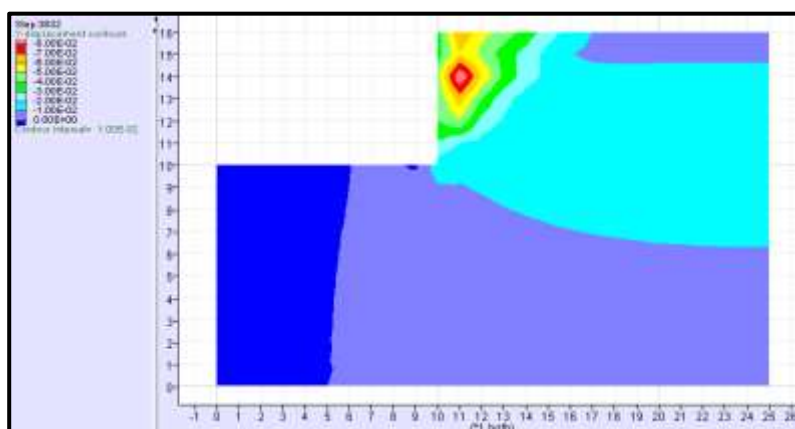
در اولین مرحله، تحلیل استاتیکی خاکریز انجام می‌شود تا تعادل در تنش‌ها ناشی از وزن و شتاب گرانشی ایجاد شود. در این مرحله، تغییرات و تاریخچه بیشینه نیروی نامتعادل کل در مقابل گام زمانی در هر مدل کنترل می‌شود. مشاهده شد بیشینه نیروی نامتعادل کل در تمامی مدل‌ها در انتهای حل استاتیکی و در گام‌های زمانی انتهایی به سمت صفر میل می‌کند. این موضوع بیانگر

۳ تحلیل استاتیکی و تعادل تنش‌ها

پس از مرحله اعتبارسنجی، با شبیه‌سازی و مدل‌سازی عددی دوبعدی خاکریز مسلح شده با ژئوسل در نرم‌افزار به روش دوبعدی، تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش تاریخچه زمانی با داده‌های زلزله انجام می‌شود تا تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار خاکریزهای مسلح شده با ژئوسل بررسی شود. در این بررسی اثر پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع خاکریز، طول مسلح‌کننده، هندسه مسلح‌کننده و آرایش آنها مطالعه می‌شود. مدل رفتاری استفاده شده در



شکل ۹. نحوه توزیع جابه‌جایی‌های جانبی استاتیکی خاکریز ($E=7500 \text{ kPa}$, $t=30 \text{ mm}$, $L=4 \text{ m}$, $H=6 \text{ m}$).



شکل ۱۰. نحوه توزیع جابه‌جایی قائم استاتیکی خاکریز ($E=2500 \text{ kPa}$, $t=30 \text{ mm}$, $L=4 \text{ m}$, $H=6 \text{ m}$).

غیرخطی با استفاده از تاریخچه زمانی هفت نگاشت زلزله مطابق جدول ۴ انجام و جابه‌جایی لرزه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله اول از تحلیل دینامیکی، مشخصات زلزله‌ها با نرم‌افزار پردازش شتاب‌نگاشت (SeismoSignal) اصلاح (فیلتر) و مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای سطح خطر زیاد، مقیاس و سپس در راستای افقی (محور x) به سطح مرز تحتانی خاکریز در مدل‌سازی اعمال می‌شود. شتاب‌نگاشت اصلاح و مقیاس‌شده برای سه نمونه زلزله در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است.

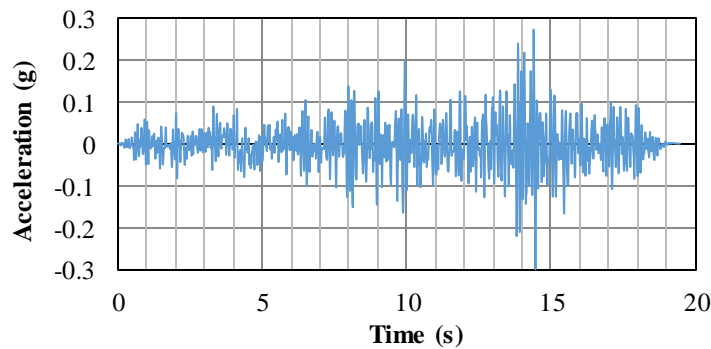
تبادل تمامی نقاط مدل تا ارتفاع مورد نظر از سطح زمین (بستر کف) است. نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد جابه‌جایی جانبی در مقایسه با جابه‌جایی قائم بسیار چشمگیر است و با نزدیک شدن به میانه ارتفاع دیوار به تدریج بر میزان جابه‌جایی جانبی و قائم نیز افزوده می‌شود. محور افقی در شکل‌های ۹ و ۱۰، جابه‌جایی و محور قائم، ارتفاع دیوار برحسب متر است.

۴ تحلیل دینامیکی و ارزیابی لرزه‌ای

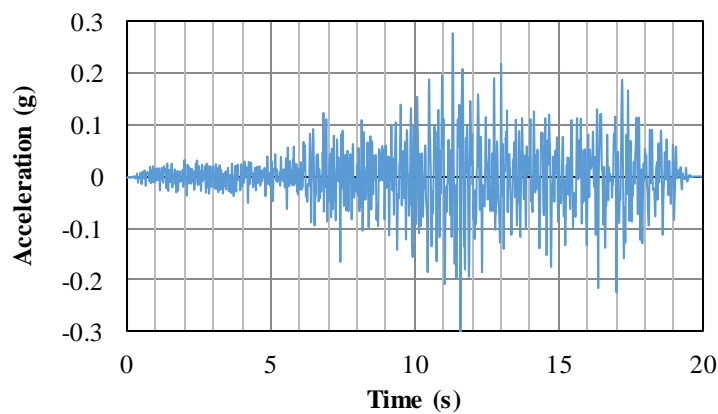
پس از تحلیل استاتیکی خاکریز و دستیابی به تعادل در تنش‌های ایجادشده، تحلیل لرزه‌ای به روش دینامیکی

جدول ۴. مشخصات نگاشت‌های زلزله استفاده‌شده در تحلیل لرزه‌ای دیوار حائل خاک مسلح.

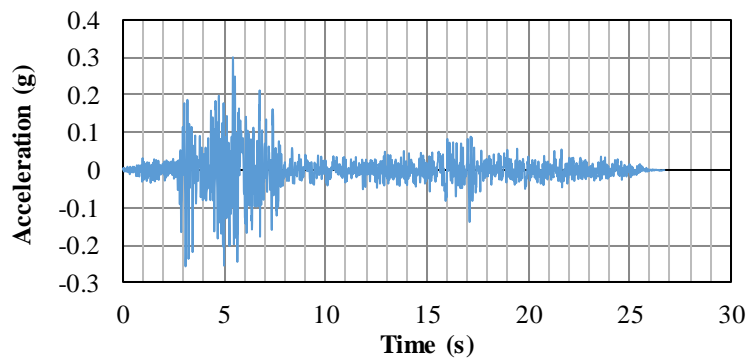
| زلزله - ایستگاه | سال | PGA (g) | PGV (m/s) | Δf (Hz) |
|-----------------|------|---------|-----------|-----------------|
| طیس - بچستان | ۱۳۵۷ | ۰/۲۹۹ | ۰/۱۲۲ | ۱۶ |
| طیس - فردوس | ۱۳۵۷ | ۰/۳ | ۰/۰۸۸ | ۱۷/۵ |
| منجیل - ابهر | ۱۳۶۹ | ۰/۳ | ۰/۱۲۴ | ۱۶/۵ |
| طیس - دیهوک | ۱۳۵۷ | ۰/۲۹۹ | ۰/۱۰۳ | ۱۹ |
| طیس - طیس | ۱۳۵۷ | ۰/۳۰۱ | ۰/۱۷۴ | ۲۴/۵ |
| طیس - سده | ۱۳۵۷ | ۰/۲۹۸ | ۰/۱۹۳ | ۲۸ |
| طیس - بشرویه | ۱۳۵۷ | ۰/۲۹۹ | ۰/۱۸۸ | ۳۰ |



شکل ۱۱. نگاهت شتاب-زمان اصلاح شده و مقیاس شده زلزله طبس ایستگاه بچستان.



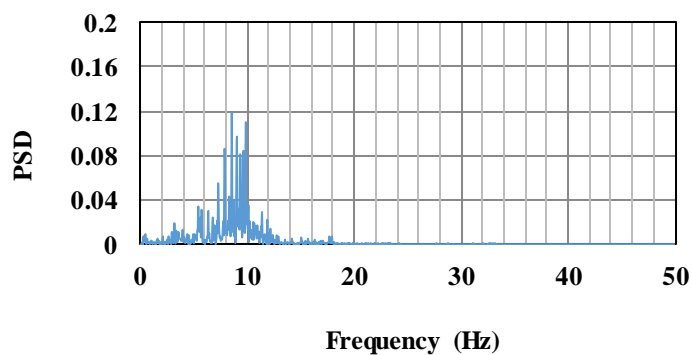
شکل ۱۲. نگاهت شتاب-زمان اصلاح شده و مقیاس شده زلزله طبس ایستگاه فردوس.



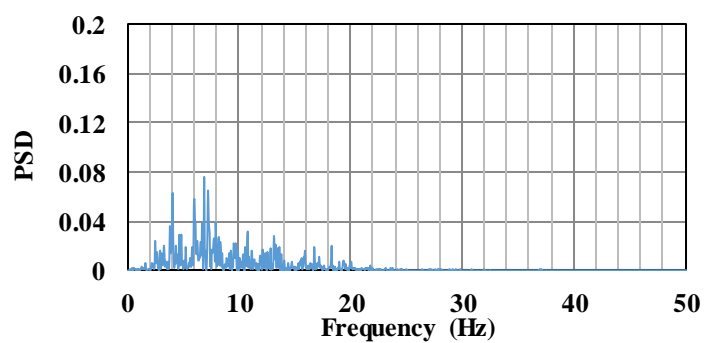
شکل ۱۳. نگاهت شتاب-زمان اصلاح شده و مقیاس شده زلزله منجیل ایستگاه ابهر.

شکل‌ها فرکانس‌های متناظر با PSD $0/1$ و PSD $0/9$ به ترتیب ابتدا و انتهای محدوده فرکانس زلزله است. شکل ۲۰ توزیع و شدت جابه‌جایی خاکریز را نشان می‌دهد. محور افقی در این شکل، جابه‌جایی و محور قائم، ارتفاع دیوار برحسب متر است.

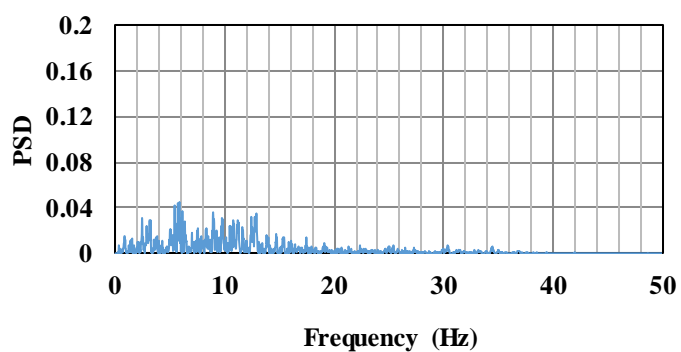
میزان گستره محتوای فرکانسی شتاب نگاهت زلزله‌های مقیاس شده در جدول ۴ با Δf نشان داده شده است. برای تعیین محدوده فرکانسی هر زلزله، ابتدا منحنی طیف چگالی توان زلزله (شکل‌های ۱۴ تا ۱۶) و سپس منحنی نرمال شده تجمعی طیف چگالی توان زلزله (Cumulative PSD) استخراج می‌شود (شکل‌های ۱۷ تا ۱۹). در این



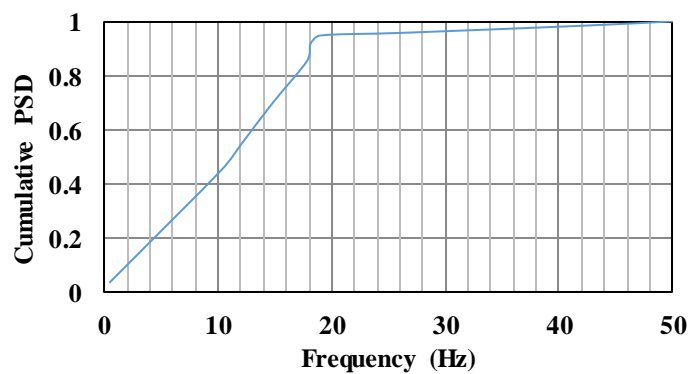
شکل ۱۴. منحنی طیف چگالی توان نگاشت زلزله طبس ایستگاه بجزستان.



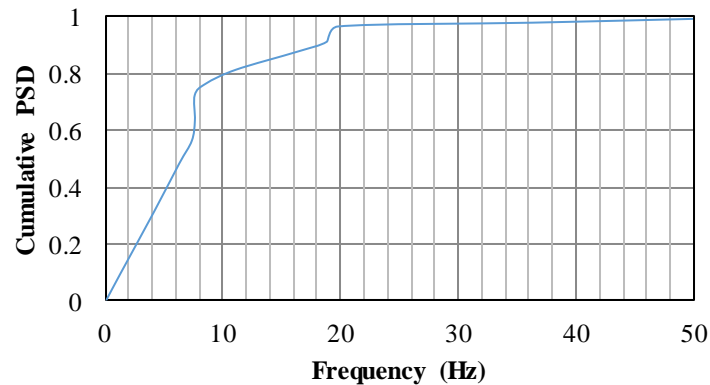
شکل ۱۵. منحنی طیف چگالی توان نگاشت زلزله طبس ایستگاه فردوس.



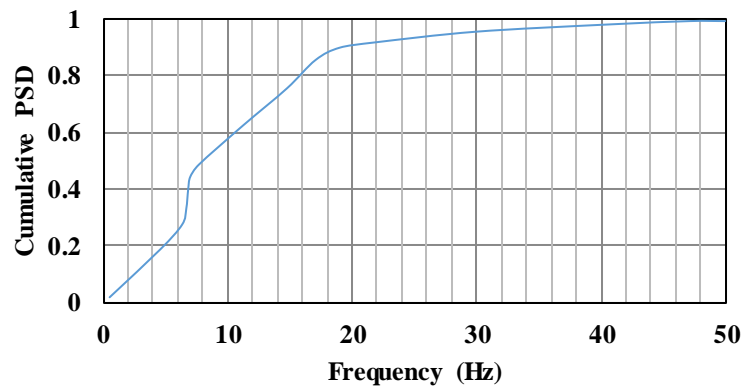
شکل ۱۶. منحنی طیف چگالی توان نگاشت زلزله منجیل ایستگاه ابهر



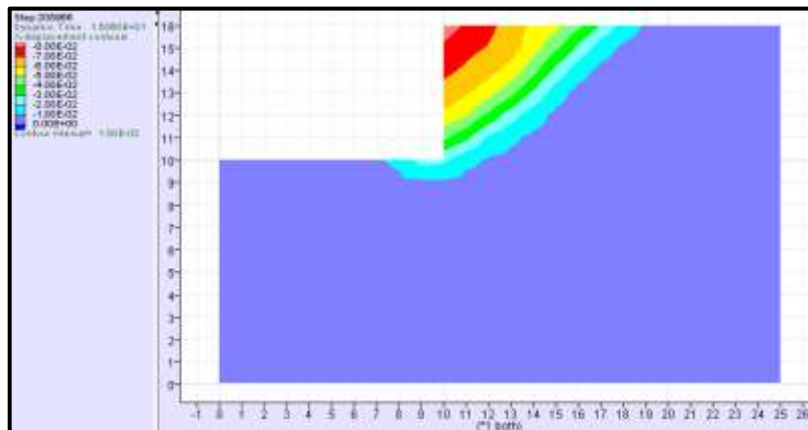
شکل ۱۷. منحنی نرمال شده تجمعی طیف چگالی توان نگاشت زلزله طبس ایستگاه بجزستان.



شکل ۱۸. منحنی نرمال شده تجمعی طیف چگالی توان نگاشت زلزله طبس ایستگاه فردوس.



شکل ۱۹. منحنی نرمال شده تجمعی طیف چگالی توان نگاشت زلزله منجیل ایستگاه اهر.



شکل ۲۰. نحوه توزیع جابه‌جایی لرزه‌ای ($t=30$ mm, $L=4$ m, $H=6$ m) زلزله طبس ایستگاه فردوس.

۵ ارزیابی نتایج و مطالعات پارامتریک

با ارزیابی رفتار و پاسخ خاکریز مسلح شده با ژئوسل در تحلیل لرزه‌ای، ضریب اطمینان پایداری، جابه‌جایی افقی، جبهه دیوار در تاج، وسط و کف استخراج می‌شود. نتایج،

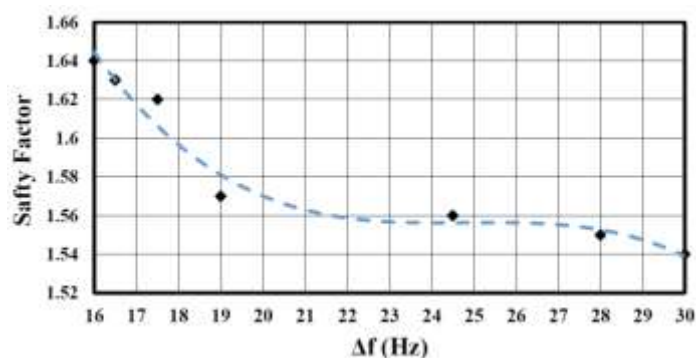
بیانگر جابه‌جایی جبهه دیوار در طول زلزله است. با ارزیابی ضریب اطمینان و جابه‌جایی دیوار ضمن بررسی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله (گستره فرکانس) بر رفتار لرزه‌ای خاکریز مسلح، نقش عوامل مختلف چون ارتفاع

فرکانس زلزله و به خصوص تا فرکانس ۱۷/۵ هرتز (کمتر از ۲۰ هرتز)، ضریب اطمینان پایداری خاکریز کاهش زیادی یافته و پس از آن به نسبت ثابت است و روند کاهش پایداری آرام می‌شود. با افزایش محدوده فرکانسی زلزله و در نتیجه با افزایش انرژی کرنشی، میزان نیروهای نامتعادل افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش عامل مقاوم و افزایش عامل محرک پایداری گوه لغزش خواهد بود. این نتایج اهمیت توجه به محتوای فرکانسی زلزله را علاوه بر توجه به شتاب زلزله در تحلیل و پایداری خاکریزهای مسلح نشان می‌دهد که در این حالت، توجه به فرکانس طبیعی سازه و نسبت یا اختلاف آن با فرکانس غالب زلزله نیز اهمیت دارد.

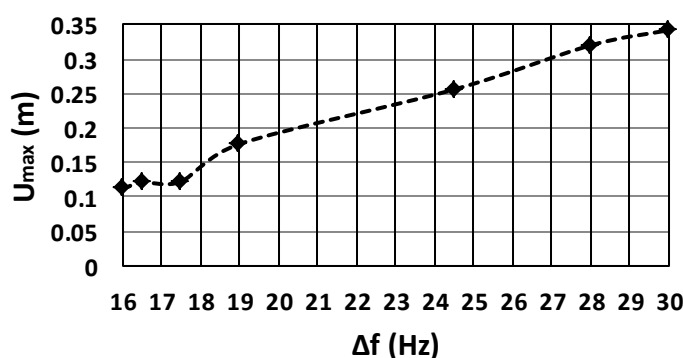
خاکریز، طول مسلح‌کننده، آرایش و هندسه نیز مطالعه می‌شود. مطالعات پارامتریک در این تحقیق برای هفت نگاشت زلزله مطابق جدول ۴ و با میزان گستره فرکانس‌های مختلف که در جدول مشخص شده است یعنی مقادیر ۱۶، ۱۷/۵، ۱۹، ۲۴/۵، ۲۸ و ۳۰ هرتز در طول مدت زمان زلزله انجام شده است.

۱-۵ تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر ضریب اطمینان و پایداری خاکریز

در این تحقیق تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر پایداری لرزه‌ای و ضریب اطمینان خاکریز ارزیابی شده است و نتایج آن به صورت موردی در شکل ۲۱ آمده است. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان گستره



شکل ۲۱. تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر ضریب اطمینان پایداری کلی خاکریز ($t=30$ mm, $L=4$ m, $H=6$ m).



شکل ۲۲. مقایسه میزان گستره فرکانس زلزله بر بیشینه جابه‌جایی لرزه‌ای تاج ($t=30$ mm, $L=4$ m, $H=6$ m).

شکل ۲۲ بیانگر جابه‌جایی افقی جبهه تاج دیوار تحت اثر فرکانس زلزله است. با افزایش میزان گستره فرکانس زلزله

۲-۵ تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر جابه‌جایی افقی جبهه خاکریز

زیاد، اثر زلزله به ویژه زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی گسترده‌تر سبب جابه‌جایی بزرگ ناشی از اجرای خاکریز می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۳ دیده می‌شود، اثر محتوای فرکانسی زلزله درخور توجه است.

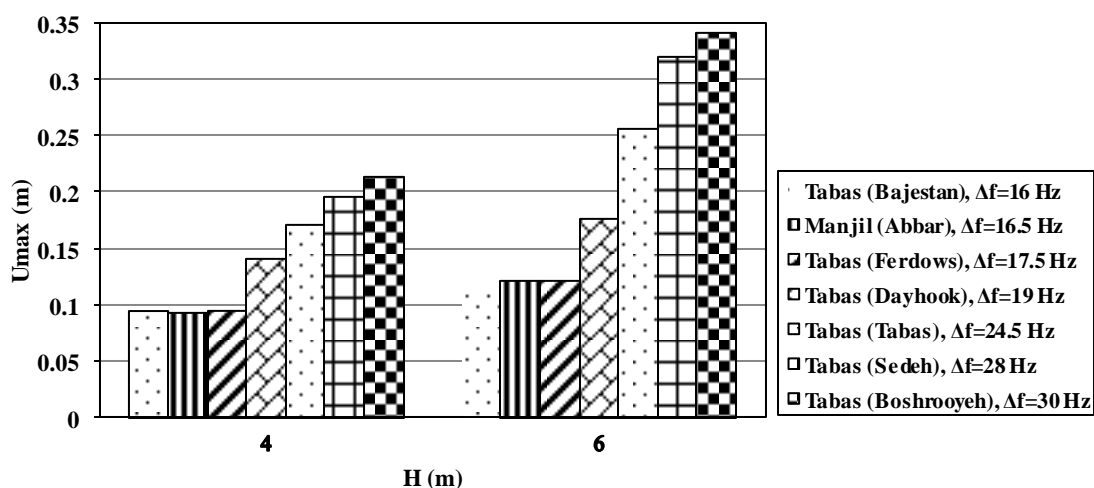
۴-۵ تأثیر محتوای فرکانسی زلزله و طول مسلح‌کننده بر جابه‌جایی افقی

با افزایش طول لایه‌های مسلح‌کننده تا حدی مشخص، جابه‌جایی خاکریز در طول زلزله کاهش می‌یابد که نتیجه آن بهبود رفتار لرزه‌ای خاکریز خواهد بود. این موضوع در زلزله‌های مختلف تحت تأثیر محتوای فرکانسی زلزله است و مطابق نتایج شکل ۲۴، در بازه بیش از ۱۷/۵ هرتز چشمگیر است. با افزایش طول مسلح‌کننده و تأثیر آن بر تنش‌های بسیج‌شده در فصل مشترک خاک و سطوح مسلح‌کننده، مقاومت و پایداری خاکریز افزایش می‌یابد و از میزان نیروهای نامتعادل ناشی از اجرای دیوار و در پی آن، تنش‌های ناشی از زلزله کاسته می‌شود. این موضوع با توجه به ساختار سه‌بعدی ژئوسل درخور توجه خواهد بود. با توجه به نتایج مذکور و نیز لزوم ارزیابی هزینه‌های ساخت، می‌توان برای خاکریز مسلح، طول بهینه ژئوسل را

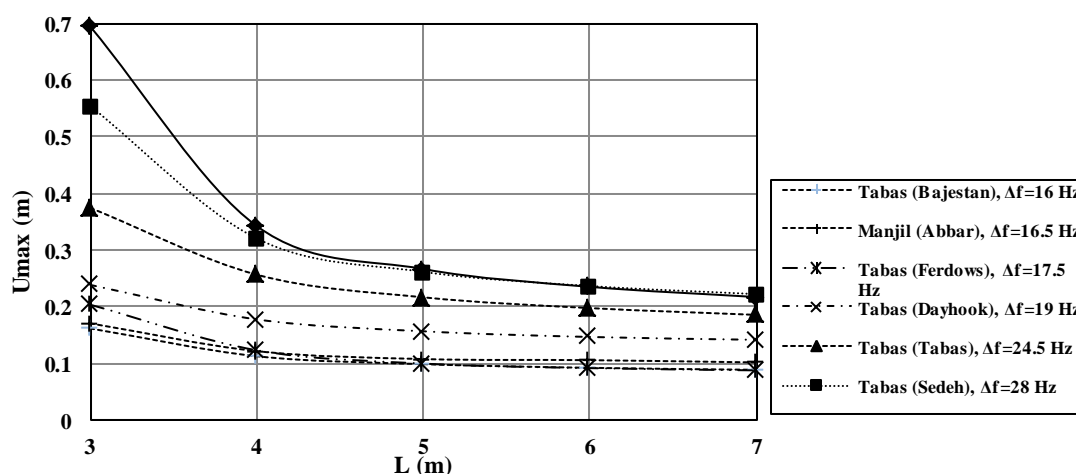
و به‌خصوص در فرکانس‌های بیش از ۱۷/۵ هرتز، انرژی کرنشی در خاکریز و جابه‌جایی خاکریز در طول زلزله افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش گستره محتوای زلزله و در نهایت، با افزایش انرژی کرنشی، میزان نیروهای نامتعادل ناشی از زلزله افزایش می‌یابد. گستردگی محتوای فرکانسی زلزله، ضمن ایجاد جابه‌جایی‌های بزرگ ناشی از وقوع کرنش‌های پلاستیک بزرگ در خاکریز در طول زلزله، به گسیختگی و در نهایت، به ناپایداری خاکریز منجر می‌شود.

۳-۵ تأثیر توأم محتوای فرکانسی زلزله و ارتفاع خاکریز بر جابه‌جایی افقی

با افزایش ارتفاع خاکریز به ویژه در ارتفاع بیش از ۴ متر، وزن خاکریز و به دنبال آن جابه‌جایی در طول زلزله افزایش می‌یابد که این افزایش، در زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی گسترده‌تر (به‌خصوص بیش از ۱۷/۵ هرتز) چشمگیر است. با افزایش وزن خاکریز بر میزان نیروهای نامتعادل درونی خاکریز افزوده می‌شود و تنش‌های ناشی از زلزله، به جابه‌جایی بیشتر، گسیختگی و در نهایت، ناپایداری خاکریز منجر می‌شود. در خاکریزهایی با ارتفاع



شکل ۲۳. تأثیر توأم محتوای فرکانسی زلزله و ارتفاع بر بیشینه جابه‌جایی تاج (L=4 m, t=30 mm).



شکل ۲۴. تأثیر متقابل محتوای فرکانسی زلزله و طول مسلح‌کننده بر بیشینه جابه‌جایی لرزه‌ای تاج ($t=30$ mm, $H=6$ m).

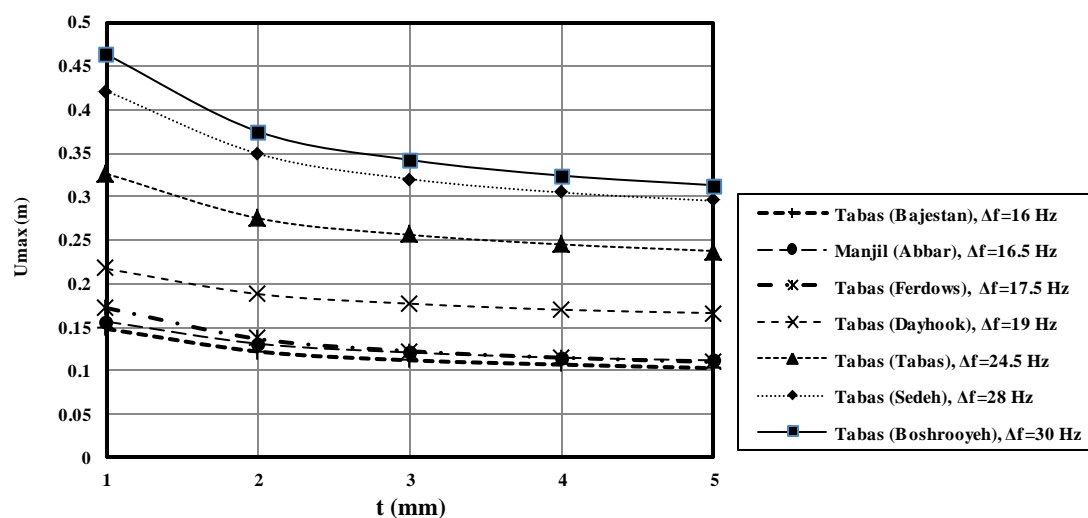
لرزه‌ای خاکریز در شکل ۲۵ نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع ژئوسل، حجم بیشتری از خاک در سلول در شرایط محدود شده متراکم خواهد شد که ظرفیت بیشتری برای تحمل تنش‌های بسیج شده در خاک در محدوده سلول مسلح‌کننده ایجاد می‌کند و سختی محوری و خمشی لایه‌های مسلح‌کننده نیز افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، ظرفیت خاکریز در تحمل تنش‌های استاتیکی و دینامیکی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع و ضخامت مسلح‌کننده ژئوسل (تا حدی مشخص) بر مقاومت و پایداری خاکریز افزوده و از مقدار نیروهای نامتعادل ناشی از اجرای خاکریز و همچنین زلزله کاسته می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج مذکور و لزوم صرفه‌جویی در هزینه‌ها، می‌توان برای خاکریز مسلح شده با ژئوسل، ضخامت بهینه برای طراحی لرزه‌ای برای زلزله‌هایی با گستره فرکانسی کوچک‌تر از $17/5$ هرتز پیشنهاد داد که حدود 20 میلی‌متر یعنی چهار برابر قطر متوسط ذرات خاک دانه‌ای ماسه‌ای خواهد بود. پیشنهاد می‌شود ضخامت ژئوسل برای طراحی لرزه‌ای زلزله‌هایی با گستره فرکانسی بیش از $17/5$ هرتز، بیشتر و حدود 30 میلی‌متر یعنی حدود شش برابر قطر متوسط ذرات خاک دانه‌ای ماسه‌ای باشد (به‌طور تقریبی).

در طراحی لرزه‌ای با محدوده فرکانسی کمتر از $17/5$ هرتز حدود 4 متر در نظر گرفت. طول بهینه ژئوسل برای زلزله‌های با محدوده فرکانسی بیشتر از $17/5$ هرتز را می‌توان بیشتر و حدود 5 متر در نظر گرفت. این موضوع اهمیت و تأثیر محتوای فرکانسی را بر طول مؤثر مسلح‌کننده نشان می‌دهد.

۵-۵ تأثیر محتوای فرکانسی زلزله و هندسه

ژئوسل بر جابه‌جایی افقی خاکریز

ژئوسل یک مسلح‌کننده با سلول‌های سه‌بعدی است که ابعاد و هندسه سلول بر رفتار خاکریز اثرگذار است. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد ارتفاع سلول (ضخامت مسلح‌کننده) تأثیر بسیار بیشتری بر رفتار خاکریز دارد (مدهوی و راجاگوپال، ۲۰۰۷). با افزایش ضخامت مسلح‌کننده (تا حدی مشخص)، سختی محوری و همچنین سختی خمشی افزایش می‌یابد و ظرفیت بیشتری در خاکریز ایجاد می‌شود و به دنبال آن جابه‌جایی در طول زلزله کاهش می‌یابد که نتیجه آن بهبود رفتار خاکریز خواهد بود. بررسی نتایج نشان می‌دهد (شکل ۲۲) این اثر در زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی گسترده‌تر از $17/5$ هرتز چشمگیرتر است. تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر ظرفیت



شکل ۲۵. تأثیر محتوای فرکانسی زلزله و ضخامت ژئوسل بر بیشینه جابه‌جایی لرزه‌ای تاج ($L=4$ m, $H=6$ m).

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- با افزایش ارتفاع و به دنبال آن افزایش ابعاد هندسی خاکریز، وزن توده نیز افزایش می‌یابد و تنش‌های لرزه‌ای به جابه‌جایی‌های بزرگ و ماندگار در طول زلزله منجر خواهد شد که این افزایش در زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی گسترده‌تر (در محدوده فرکانس طبیعی خاکریز) درخور توجه است. این نتایج نشان می‌دهند در طراحی باید نسبت و مقدار فرکانس طبیعی سازه با محتوای فرکانسی زلزله مدنظر مهندسان و محققان قرار گیرد.
- با افزایش طول مسلح‌کننده (تا حدی مشخص)، جابه‌جایی‌های خاکریز در طول زلزله به دلیل افزایش ظرفیت داخلی کاهش می‌یابد که این بهبود رفتار در زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی گسترده ملموس است. کمترین طول مسلح‌کننده معادل ارتفاع خاکریز توصیه می‌شود.
- با افزایش ارتفاع ژئوسل و ضخامت مسلح‌کننده، سختی محوری و خمشی افزایش و متناسب با آن جابه‌جایی خاکریز در طول زلزله کاهش می‌یابد که این بهبود رفتار، متناسب با محتوای فرکانسی زلزله است. ارتفاع و ضخامت پیشنهادی ژئوسل با ابعاد متوسط ذرات خاک تناسب دارد.

- در این تحقیق تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر طراحی لرزه‌ای خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسل ارزیابی شده است که مهم‌ترین نتایج را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:
- در شرایط لرزه‌ای، جابه‌جایی جانبی در مقایسه با جابه‌جایی قائم درخور توجه است و با نزدیک شدن به تاج، میزان جابه‌جایی بیشترین مقدار را دارد.
- با افزایش محدوده گستره فرکانس زلزله و به‌خصوص در محدوده فرکانس طبیعی خاکریز مسلح، انرژی کرنشی در خاکریز زیاد می‌شود و به دنبال آن، ضریب اطمینان پایداری کاهش می‌یابد. میزان کاهش، ابتدا شدید است ولی بعد از حد مشخصی، تأثیر آن کاهش می‌یابد.
- با افزایش محدوده فرکانسی زلزله و در نتیجه با افزایش انرژی کرنشی، بر میزان نیروهای نامتعادل درونی خاکریز افزوده می‌شود که ضمن ایجاد کرنش پلاستیک تجمعی، تغییر شکل و جابه‌جایی‌های بزرگی در طول زلزله ایجاد می‌شود و می‌تواند به گسیختگی و در نهایت، ناپایداری خاکریز مسلح منجر شود.

- seismic numerical modeling of geosynthetic-reinforced soil segmental bridge abutments: *Geosynthetics International*, **14**(4), 228-243.
- Hegde, A., and Sitharam, T. G., 2015, Joint strength and wall deformation characteristics of a single-cell geocell subjected to uniaxial compression: *International Journal of Geomechanics*, **15**(5), 04014080.
- Jones, C. J., 2013, *Earth reinforcement and soil structures*: Elsevier.
- Leshchinsky, B., and Ling, H. I., 2013, Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement: *Geotextiles and Geomembranes*, **36**, 33-43.
- Madhavi Latha, G., & Rajagopal, K., 2007, Parametric finite element analyses of geocell-supported embankments: *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(8), 917-927.
- Mehdipour, I., Ghazavi, M., and Moayed, R. Z., 2013, Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect: *Geotextiles and Geomembranes*, **37**, 23-34.
- Munjy, H., Tehrani, F. M., Xiao, M., and Zoghi, M., 2014, A numerical simulation on the dynamic response of MSE wall with LWA backfill: *Proceeding Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, **1**, 1147-1152.
- Rahmouni, O., Mabrouki, A., Benmeddour, D., and Mellas, M., 2016, A numerical investigation into the behavior of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls: *International Journal of Geotechnical Engineering*, **10**(5), 435-444.
- Sabermahani, M., Ghalandarzadeh, A., and Fakher, A., 2009, Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls: *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), 121-136.
- Segrestin, P., and Bastick, M. J., 1988, Seismic design of reinforced earth retaining walls-the contribution of finite elements analysis: *International geotechnical symposium on theory and practice of earth reinforcement*, 577-582.
- Shukla, S. K., 2017, *An Introduction to Geosynthetic Engineering*: CRC Press.
- Song, F., Liu, H., Hu, H., and Xie, Y., 2018, Centrifuge tests of geocell-reinforced retaining walls at limit equilibrium: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **144**(3), 04018005.
- Song, F., and Tian, Y., 2019, Three-dimensional numerical modelling of geocell reinforced soils and its practical application: • تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار خاکریز به فرکانس طبیعی خاکریز وابسته است. میزان تأثیر تابع عوامل مختلفی مانند هندسه خاکریز، آرایش و هندسه مسلح کننده و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز است و به راحتی محاسبه نمی شود.
- این تحقیق با مدل سازی دوبعدی تحلیل شده است و با توجه به ساختار سه بعدی سلول ژئوسل، مدل سازی سه بعدی خاکریز مسلح شده با ژئوسل با دیگر نرم افزارها توصیه می شود.
- در این پژوهش تحلیل حساسیت به منظور مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی انجام شده است. تحلیل حساسیت در طراحی سازه ها در بسیاری از مسائل مهندسی جهت بهینه سازی، شناسایی پارامتری، پایش سلامت، اطمینان پذیری و تشخیص خرابی از اهمیت زیادی برخوردار است.
- ### منابع
- Abdelouhab, A., Dias, D., and Freitag, N., 2011, Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips: *Geotextiles and Geomembranes*, **29**(2), 116-129.
- Bathurst, R. J., and Cai, Z., 1995, Pseudo-static seismic analysis of geosynthetic-reinforced segmental retaining walls: *Geosynthetics international*, **2**(5), 787-830.
- Bathurst, R. J., 1997, Review of seismic design, analysis and performance of geosynthetic reinforced walls, slopes and embankments: *Earth reinforcement*, 887-918.
- El-Emam, M. M., and Bathurst, R. J., 2005, Facing contribution to seismic response of reduced-scale reinforced soil walls: *Geosynthetics International*, **12**(5), 215-238.
- Elias, V., Christopher, R., and Barry, P. E., 1997, *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*: FHWA Demonstration Project 82, Reinforced Soil Structures WSEW [ie MSEW] and RSS, Federal Highway Administration.
- Fakharian, K., and Attar, I. H., 2007, Static and

- Geomechanics and Engineering, **17**(1), 1-9.
- Venkateswarlu, H., and Hegde, A., 2020, Effect of influencing parameters on the vibration isolation efficacy of geocell reinforced soil beds: International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, **6**, 1-17.
- Vibhoosha, M. P., Bhasi, A., and Nayak, S., 2021, A review on the design, applications and numerical modeling of geocell reinforced soil: Geotechnical and Geological Engineering, 1-23.
- Yogendrakumar, M., Bathurst, R. J., and Finn, W. L., 1991, Response of reinforced soil slopes to earthquake loadings: Proceedings of the 6th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 445-452.
- Yoo, C., and Kim, S. B., 2008, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis: Geotextiles and Geomembranes, **26**(6), 460-472.
- Yu, Y., Damians, I. P., and Bathurst, R. J., 2015, Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions: Computers and Geotechnics, **65**, 164-174.

The Effect of Earthquake Frequency Content on the Stability of Geocell - Reinforced Soils

Saeed Ghaffarpour Jahromi ^{1*} and Mina Mohseni Nejad ²

¹ Associate Professor, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

² Graduated of Geotechnical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

(Received: 30 July 2021, Accepted: 21 December 2021)

Summary

Today, many earthquakes occur in most parts of the world that are very different in terms of intensity, duration, energy and other seismic characteristics, so the amount and extent of damage to different structures are also affected by the characteristics of the earthquake. In this regard, the study of the effects of earthquake frequency content on the behavior and response of reinforced soil walls is also important.

In this research, using numerical simulation with two-dimensional modeling of geocell-reinforced soil in Flac-2D finite difference software and seismic analysis with nonlinear dynamic time history of earthquake, the effect of earthquake frequency content on the behavior and seismic response of reinforced soil and also the role of various factors such as embankment geometry and reinforcement characteristics were investigated. The most important results can be summarized as follows:

- In seismic conditions, lateral displacement is significant compared to vertical displacement and its maximum value is above the wall.
- By increasing the frequency range of the earthquake around the natural frequency range of the structure, the strain energy in the embankment increases and the reliability and stability decrease consequently.
- By increasing the frequency range and strain energy, the amount of unbalanced internal forces of the embankment is increased. It creates a large deformation and displacement during the earthquake by creating a cumulative plastic strain and will lead to rupture and instability of the embankment.
- With increasing altitude and subsequent geometric dimensions of the embankment, the weight of the mass increases and the seismic acceleration leads to large and permanent displacement during the earthquake, which is a significant increase in earthquakes with wide frequency content (around the natural frequency range of the structure).
- As the length of the reinforcement increases, the displacement of the embankment during the earthquake decreases due to the increase in internal capacity. It is a tangible improvement in earthquake behavior with wide frequency content. The minimum length of the reinforcement in proportion to the height of the embankment and the frequency range of the earthquake is recommended.
- As the geocell height and reinforcement thickness increase, the axial and flexural stiffness increase and the embankment displacement during the earthquake decreases in proportion to this. It improves the behavior in proportion to the frequency content of the earthquake. The proposed height and thickness of the geocell is proportional to the frequency content of the earthquake and to the average dimension of soil particles (D_{50}).
- The effect of earthquake frequency content on embankment behavior depends on the natural frequency of the embankment, in which various factors such as embankment geometry, arrangement and reinforcement geometry, as well as the physical and mechanical characteristics of the embankment are involved and cannot be easily calculated.

Keywords: Reinforced soil, earthquake, geocell, frequency content, stability, seismic displacement

*Corresponding author:

Saeed_ghf@sru.ac.ir