

تحلیل استاتیکی و دینامیکی دیوار خاک مسلح با تسمه‌های فلزی: مطالعه عددی

حسین معتقدی^۱، محمد جواد شعبانی^۲، مقدار اتقایی^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، قائمشهر.

^۲ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، مدرس موسسه آموزش عالی طبری، بابل.

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، موسسه آموزش عالی طبری، بابل.

نام نویسنده مسئول:

مقدار اتقایی

چکیده

از تکنیک تسلیخ خاک با مصالح فلزی و پلیمری نظیر تسمه‌های فلزی و لایه‌های ژئوستنتیک برای افزایش مقاومت کششی سازه‌های خاکی استفاده شده است. دیوارهای خاکی مسلح، از جمله سازه‌های خاکی بوده که از این تکنیک سود می‌برند و استفاده از آن‌ها در پایدارسازی شیب‌های طبیعی و مصنوعی بسیار رایج شده است. از طرفی، ضعف روش‌های موجود در طراحی این دیوارها و رفتار پیچیده آن‌ها در طی عملیات احداث و نیز تحت بارهای لرزه‌ای، ضرورت مطالعه روی رفتار این قبیل سازه‌های خاکی را با توجه به آرایش هندسی و خواص مکانیکی مسلح کننده‌های آن‌ها، بیش از پیش آشکار کرده است. لذا در این تحقیق، ضمن اطمینان از صحت نحوه شبیه‌سازی عددی اجرای دیوار خاکی مسلح با تسمه‌های فلزی توسط نرم افزار Plaxis 2D، به بررسی تأثیر طول و سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سر بار از لبه دیوار) و نیز تأثیر میزان سر بار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر رفتار دیوار و تسمه‌ها در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای پرداخته شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان از کاهش جابه‌جایی‌های استاتیکی و لرزه‌ای دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها در طی افزایش میزان فاصله سر بار از لبه دیوار دارد که با افزایش طول تسمه‌ها در تمام فواصل (سر بار از لبه دیوار)، از میزان این جابه‌جایی‌ها (و در پی آن نیروی تسمه‌ها) کاسته می‌شود که این کاهش، با کمتر شدن فاصله سر بار از لبه دیوار، شدت بیشتری می‌یابد. همچنین، با افزایش سختی تسمه‌ها در تمام فواصل (سر بار از لبه دیوار)، با وجود کاهش ناچیز در میزان جابه‌جایی‌های استاتیکی و لرزه‌ای دیوار، نیروی تسمه‌ها افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، مدلسازی عددی، تحلیل دینامیکی، تسمه فلزی.

مقدمه

امروزه، ساخت و ساز از یک سو و تخریب سازه های ساخت بشر به دلیل وقوع سوانح طبیعی (چون سیل، زلزله و زمین لغزش و ...)، به چرخه ای دائمی، تبدیل گشته است. از مهمترین این سازه ها، می توان به دیوارهای خاکی محافظ کنار جاده ها، تونل ها، پایه های کناری پل ها و مرز سواحل و رودخانه ها اشاره کرد که توجه ویژه به پاسخ لرزه ای این دیوارها و دستیابی به یک طرح ایمن و بهینه جهت مقاوم سازی آن ها در برابر بار لرزه ای، ضرورت ویژه ای می یابد. چرا که خسارت این دیوارها منجر به تلفات جانی و زیان های اقتصادی قابل توجه ای حتی به سازه ها و تأسیسات مجاور شده که این موضوع اهمیت بررسی رفتار و مقاوم سازی دیوارهای خاکی در برابر زلزله را بیش از پیش نمایان می سازد.

در چند دهه اخیر، برای افزایش مقاومت کششی سازه های خاکی، از تکنیک تسلیح خاک با مصالح فلزی و پلیمری نظیر تسمه های فلزی و لایه های ژئوسنتتیک استفاده شده است. دیوارهای خاکی مسلح، از جمله سازه های خاکی بوده که از این تکنیک سود می برند و استفاده از آن ها در پایدارسازی شیب های طبیعی و مصنوعی (به ویژه در جاده سازی) بسیار رایج شده است. این دیوارها، به دلیل هزینه اجرای کمتر، سرعت اجرای بالاتر و نیز رفتار مکانیکی مناسب تر نسبت به دیوارهای وزنی و بتن مسلح، در مهندسی ژئوتکنیک، جایگاه ویژه ای پیدا کرده اند. از سوی دیگر، ضعف روش های موجود در طراحی این دیوارها و رفتار پیچیده آن ها در طی عملیات احداث و نیز تحت بارهای بهره برداری به ویژه بارهای لرزه ای در مناطق لرزه خیز، ضرورت مطالعه روی رفتار این قبیل سازه های خاکی را بیش از پیش آشکار کرده است.

تسلیح دیوارهای خاکی با تسمه های فلزی (تسمه هایی پهن و نازک)، از متداول ترین و قدیمی ترین روش های تسلیح دیوارهای خاکی می باشد که مفهوم و روش تحلیل و طراحی آن توسط یک مهندس فرانسوی به نام ویدال در سال ۱۹۶۶ بنا نهاده شد. دیوارحایل پراگنیرس، نخستین نمونه دیوار خاک مسلح بود که در سال ۱۹۶۵ در فرانسه بنا شد و پس از آن در سال های ۱۹۶۸ و ۱۹۶۹، اجرای یک پروژه طولانی دیوارهای حایل بر روی شیب های ناپایدار در جنوب فرانسه، فرصت انجام بررسی های تحقیقاتی و پیشرفت های فنی را فراهم نمود [۱].

دیوارهای خاک مسلح به دو ناحیه تفکیک می شوند، یکی ناحیه مسلح شده با تسمه های فولادی یا شبکه های پلیمری و دیگر بلوک خاک غیرمسلح در پشت این ناحیه. در اثر وقوع زلزله، ناحیه خاک غیرمسلح تحت اثر رانش دینامیکی و ناحیه مسلح تحت اثر نیروی اینرسی قرار می گیرد. طراحی لرزه ای دیوارهای خاک مسلح، با هدف کنترل لغزش و واژگونی ناحیه مسلح به مسلح کننده ها و همچنین کنترل شکست کشش در مسلح کننده ها در خلال وقوع زلزله، انجام می گیرد. براساس آزمایش های میز لرزان، مشاهده نمونه های واقعی پس از زلزله و تحلیل های عددی اجزای محدود، مشخص شده که دیوارهای خاک مسلح، عموماً، به دلیل انعطاف پذیری خوب، زلزله های شدید را بدون خرابی تحمل می کنند. توزیع عناصر مسلح کننده در جرم سازه، باعث توزیع و استهلاک انرژی لرزه ای می شود. در نتیجه، احتمال ایجاد نیروی متمرکز و به دنبال آن خرابی کاهش می یابد [۲].

صابر ماهانی و همکارانش در سال ۲۰۱۰، به بررسی تغییرشکل لرزه ای دیوارهای خاک مسلح با استفاده از آزمایش میز لرزه 1g (به تعداد ۲۰ عدد آزمایش مدل فیزیکی بر روی دیوارهای خاک مسلح به ارتفاع ۱ متر)، پرداختند. نتایج نشان داد که هر چه مسلح کننده های سخت تری استفاده کنیم، انعطاف پذیری دیوار کمتر خواهد بود. هر چه طول مسلح کننده ها کمتر باشد، توده خاک مسلح لاغرتر شده و انعطاف رفتار داخلی دیوار کمتر بوده و تمایل به واژگونی صلب، بیشتر خواهد بود. هر چه فواصل قائم مسلح کننده کمتر باشد، صلبیت دیوار بیشتر و هر چه فواصل بیشتر باشد، رفتار دیوار منعطف تر خواهد بود [۳]. Sander و همکارانش در سال ۲۰۱۴، با آزمایش لرزه ای در مقیاس واقعی دیوارهای حایل خاک مسلح تا ارتفاع ۷ متر و با پایش دقیق، به اندازه گیری پارامترهای مختلف پرداختند. نتایج آزمایش یعنی وارد کردن تمام لرزش های هارمونیک و زلزله نشان داد که جابه جایی نهایی دیوار در قسمت بالا، ۵/۶ سانتی متر و در قسمت میانی، ۴/۱ سانتی متر و در پای دیوار، ۰/۳ سانتی متر می باشد. همچنین، دو ترک قابل مشاهده، یکی به عرض ۳ سانتی متر در عرض دیوار و دیگری حدود ۳۰ سانتی متر در قسمت پشت دیوار دیده شد. همچنین، در رفتگی بلوک های پوسته نیز بعد لرزه مشاهده گردید [۴].

Muhunthan و Hattamleha در سال ۲۰۰۵، با مطالعه روی چند نوع دیوار خاکی مسلح، به بررسی رفتار مکانیکی روکش این دیوارها پرداختند. با مقایسه رفتار روکش در این دیوارها دیده شد که انعطاف پذیری دیوارهای خاکی مسلح در طی احداث با توجه به شرایط بارگذاری و تکیه گاهی منجر به بهبود در رفتار مکانیکی روکش دیوار می شود [۵]. شعبانی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به صورت تجربی تاثیر شیب لایه های تسلیح و مهار آن ها را تحت بارگذاری استاتیکی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی نشان دهنده بهبود عملکرد دیوار در اثر استفاده از عناصر تسلیح مورب تا ۱۰ درصد خواهد بود [۶].

یثربی و آزاد در سال ۲۰۰۶، با مطالعه روی دیوار خاکی مسلح در شرایط استاتیکی و با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Plaxis 2D، به بررسی تاثیر میزان سختی مسلح کننده ها روی تغییرشکل و نیروی تولید شده در دیوار خاکی مسلح پرداختند. نتایج حاصل از این

مطالعه عددی نشان داد که با افزایش سختی مسلح کننده ها، از میزان تغییرشکل دیوار کاسته شده و بر نیروهای تولید شده در مسلح کننده ها افزوده می شود [۷].

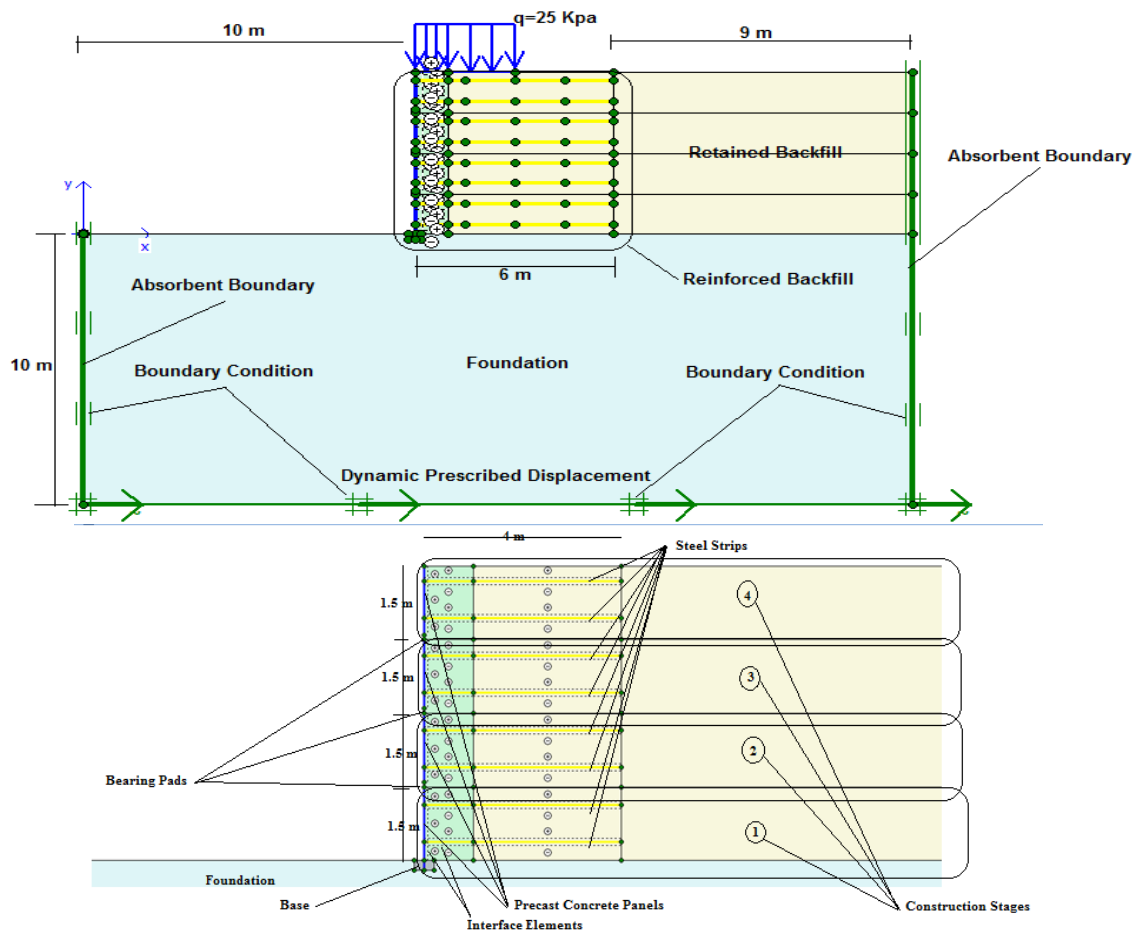
فرهادی و همکارانش در سال ۲۰۱۲، با استفاده از روش اجزای محدود، رفتار لرزه ای دیوارهای خاک مسلح و ارزیابی پاسخ دینامیکی آن ها را با تکیه بر مشاهده انواع مودهای تغییرشکل و تشخیص مکانیسم های مختلف گسیختگی و شناسایی پارامترهای موثر در شکل گیری هر یک از مودها و مکانیسم ها، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مود واژگونی، ماکزیمم تغییرشکل نمای دیوار، در بالا رخ داده و پروفیل تغییرشکل با توجه به نرمی نمای دیواره به صورت خطی- منحنی و مقدار آن از پایین به بالای دیواره افزایش می یابد [۸]. Damians و همکارانش در سال ۲۰۱۳، با شبیه سازی های عددی توسط نرم افزار اجزای محدود Plaxis 2D، به بررسی تأثیر سختی روکش دیوار بر رفتار مکانیکی دیوارهای خاکی مسلح با تسمه های فلزی پرداختند. نتایج حاصل از این شبیه سازی ها نمایانگر تأثیر چشمگیر سختی روکش دیوار بر نیروهای روکش و نیز میزان و توزیع نیروهای بسیج شده در تسمه ها می باشد [۹].

استفاده از دیوارهای خاکی مسلح با تسمه های فلزی در پایدارسازی شیب های خاکی و سنگی، به دلیل قابلیت انعطاف پذیری بالا، مقاومت زیاد در برابر نیروهای استاتیکی و دینامیکی، سادگی نصب (به علت استفاده از قطعات پیش ساخته در مسلح کننده ها و پوشش دیوار)، شکل ظاهری مطلوب و صرفه جویی های قابل توجه در مصالح و زمان اجرا، دهه هاست که در سراسر دنیا، گسترش قابل توجهی یافته است. با این وجود، به دلیل رفتار پیچیده این نوع از دیوارهای خاکی مسلح در طی عملیات احداث و نیز تحت بارهای بهره برداری خصوصاً بارهای لرزه ای در مناطق لرزه خیز، ضرورت مطالعه روی رفتار لرزه ای این دیوارها با توجه به آرایش هندسی و خواص مکانیکی تسمه های فلزی مسلح کننده آن ها، از اهمیت ویژه ای برخوردار می شود.

لذا، در این تحقیق، ابتدا، با استفاده از داده های اندازه گیری شده از ابزارگذاری یک دیوار خاکی مسلح با تسمه های فلزی، از صحت نحوه شبیه سازی عددی اجرای این نوع از دیوارهای خاکی مسلح توسط نرم افزار اجزای محدود Plaxis 2D، اطمینان حاصل خواهد شد. با اطمینان از صحت نحوه شبیه سازی عددی اجرای دیوار خاکی مسلح با تسمه های فلزی در تحقیق، در ادامه با شبیه سازی های عددی اجرای دیوار خاکی مسلح مذکور و بارگذاری استاتیکی و لرزه ای آن، به بررسی تأثیر طول و سختی تسمه ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) و نیز تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر رفتار دیوار و تسمه ها در شرایط استاتیکی و لرزه ای، پرداخته خواهد شد.

مدلسازی

یکی از روش های شبیه سازی دیوارهای خاکی مسلح و در پی آن تحلیل پایداری و دینامیکی آن ها، روش عددی اجزای محدود می باشد. نرم افزار Plaxis 2D، یک نرم افزار عددی اجزای محدود بوده، که توانایی مدل سازی و تحلیل دو بعدی دیوارهای خاکی مسلح را، در شرایط استاتیکی و دینامیکی، دارا می باشد. جهت مدلسازی دو بعدی دیوار خاک مسلح با تسمه های فلزی از نرم افزار Plaxis و برای شبیه سازی عددی اجرای یک دیوار از مورد مطالعه توسط Chida و Nakagaki در سال ۱۹۷۹ [۱۰]، استفاده شده است.



شکل ۱- مدل هندسی شبیه‌سازی شده

دیوار خاکی مسلح مورد نظر مطابق با شکل ۱ در ۴ مرحله مساوی و تا ارتفاع ۶ متر از سطح زمین، اجرا شده است. خاکریز مورد استفاده جهت اجرای این دیوار، از دو بخش مسلح با تسمه‌های فلزی و غیر مسلح، تشکیل یافته، که در خاکریز مسلح، تا فاصله یک متر از نمای دیوار، از خاک با تراکم کمتری، استفاده شده است. نمای دیوار، از پانل‌های پیش‌ساخته بتنی با طول و عرض ۱/۵ متر تشکیل یافته، که جهت جلوگیری از تماس پانل‌ها و در نتیجه شکست و خرد شدن بتن در درزهای افقی بین پانل‌های مجاور، از پرکننده‌های باربر از جنس لاستیک در این درزها، استفاده شده است. همچنین، کل نمای دیوار توسط یک پایه بتنی (شالوده نمای دیوار)، بر روی زمین، قرار گرفته است. در هر مرحله از اجرای این دیوار، پس از نصب پانل‌ها و پرکننده‌های باربر، در سه لایه، خاکریزی صورت گرفته، که در بین این لایه‌ها (یعنی بین لایه‌های اول و دوم و لایه‌های دوم و سوم در هر مرحله)، از دو عدد تسمه در طول هر پانل (جهت دستیابی به خاکریز مسلح به عرض ۴ متر)، استفاده شده، که این روند، در مراحل بعدی اجرای دیوار، ادامه یافته است [۱۰].

جهت مدلسازی مصالح خاکی همگن مطابق با مطالعه Guler et al (2012) از مدل رفتاری الاستوپلاستیک مور - کولمب استفاده گردیده است [۱۱]. مشخصات مصالح خاکی در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق این جدول ψ ، φ ، c ، ν ، E ، γ به ترتیب وزن مخصوص، مدول یانگ، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع خاک‌های دانه‌ای فونداسیون و خاکریز دیوار هستند. برای مدلسازی عناصر سازه‌ای مثل رویه دیوار، پرکننده و عناصر تسلیح تسمه‌ای از مدل رفتاری الاستیک استفاده گردیده است. بر این اساس مشخصات عناصر سازه‌ای رویه بتنی و پرکننده مطابق با جدول ۲ و ۳ بوده که دارای دو مشخصه اصلی سختی محوری (EA) و سختی خمشی (EI) است. علاوه بر این جهت مدلسازی تسمه‌های فلزی در شرایط دو بعدی از المان ژئوگرید در نرم‌افزار پلکسیس استفاده شده است. مشخصه اصلی این المان سختی محوری بوده که می‌توان مقادیر معادل آن را با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود:

$$(EA)_{eq} = E_s A_s \frac{n_s}{L_p} \quad (1)$$

$$A_s = L_s \times t_s \quad (2)$$

که در آن، E_s ، L_p و n_p به ترتیب مدول الاستیسیته تسمه ها، طول پانل های نمای دیوار و تعداد تسمه ها در طول پانل ها می باشد. همچنین، A_s ، سطح مقطع تسمه ها بوده و L_s و t_s به ترتیب طول مقطع و ضخامت تسمه ها هستند. مشخصات تسمه فلزی در جدول ۴ ارائه شده است. شایان ذکر است مطابق با واقعیت برای پانل های بتنی رویه یک فونداسیون با عرض و ضخامت ۰/۴ و ۰/۲ متر با استفاده از المان سازه ای مطابق با پانل رویه مدلسازی شده که در جدول ۵ مشخصات آن ارائه شده است.

برای مدل سازی عددی اندرکنش پانل های نمای دیوار و تسمه های فلزی با خاکریز دیوار، از المان های اینترفیس بین پانل ها و خاکریز، استفاده می شود. بدین منظور در این شبیه سازی، فاکتور کاهش مقاومت المان های اینترفیس بین پانل ها و خاکریز، برابر با ۰/۶ (با توجه به آنالیز برگشتی انجام شده)، در نظر گرفته شد. جهت پایداری مدل عددی، جابه جایی های افقی در مرزهای جانبی (با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده) و جابه جایی های افقی و قائم در مرز پایین مدل (با توجه به شروع یک لایه بسیار سخت از عمق ۱۰ متری)، مقید می شود. لازم به ذکر است که در تحلیل های لرزه ای تحقیق حاضر برای عدم بازتاب کاذب موج ها در مرزهای جانبی توده خاک از مرز جاذب استفاده می شود. همچنین، در این تحلیل ها، جهت شبیه سازی اثر زلزله، در سراسر مرز پایین توده خاک، از روش کنترل تغییر مکان استفاده شده که تغییر مکان افقی مقرر شده دینامیکی، به میزان ۰/۰۱ متر، اعمال می شود. بر این اساس نمودار شتاب - زمان از زلزله Upland (در کشور ایالات متحده آمریکا) که در سال ۱۹۹۰ رخ داده است، استفاده گردید. این تاریخچه از ایستگاهی که در فاصله ۵ کیلومتری کانون زلزله قرار داشت، ثبت شده است (شکل ۲). بزرگی این زلزله، ۵/۴ ریشتر و حداکثر شتاب افقی آن ۰/۲۵g است.

برای مش بندی مدل، از المان های ۱۵ گره ای متوسط (با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده)، استفاده می شود. سپس، با توجه به محدوده توزیع جابه جایی های کل توده های خاک در انتهای عملیات احداث دیوار خاکی مسلح، مش ها در کلاسترهای مربوط به خاکریز مسلح دیوار، اصلاح می شوند. جهت تحلیل مدل، مطابق با روند اجرایی محاسبات انجام گردیده و نتایج در انتهای ساخت و اعمال بارگذاری استاتیکی و دینامیکی استخراج گردید.

بخشی عمده ای از انرژی گسترش یافته در یک محیط ژئوتکنیکی صرف غلبه بر اصطکاک بین ذرات و بخشی دیگر سبب پیدایش کرنش های برگشتناپذیر می شود. لذا با انتشار امواج در درون یک محیط ژئوتکنیکی به تدریج از انرژی آن کاسته شده و به عبارتی میرا می گردد. از اینرو جهت مدلسازی میرایی مورد نظر از میرایی رایلی با ضرائب α و β که به ترتیب متناسب با جرم و سختی هستند، استفاده شده است. جهت تعیین این ضرائب نیاز به دو فرکانس بوده که براساس مطالعات (Guler et al (2012) انتخاب گردیده است [۱۱].

جدول ۱- مشخصات خاک های دانه ای فونداسیون و خاکریز دیوار

	γ (KN/m ³)	E (Mpa)	ν	C (Kpa)	ϕ	ψ
Foundation	20	1000	0.3	1	36	6
Backfill	<1 m from Face	18	5	0.3	1	44
	>1 m from Face	18	10	0.3	1	44

جدول ۲- مشخصات پانل های نمای دیوار

$(EA)_p$ (MN/m)	$(EI)_p$ (KNm ² /m)	W_p (KN/m/m)	ν_p
6	11	4.5	0.15

جدول ۳- مشخصات پرکننده های باربر

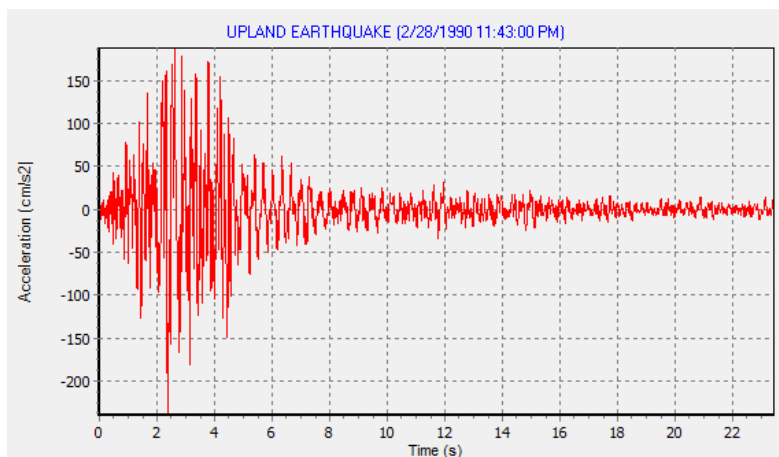
$(EA)_{bp}$ (MN/m)	$(EI)_{bp}$ (KNm ² /m)	W_{bp} (KN/m/m)	ν_{bp}
0.1	0.3	0.2	0.49

جدول ۴- مشخصات تسمه های فلزی

E_s (Gpa)	L_s (m)	t_s (m)
20	0.1	0.0023

جدول ۵- مشخصات شالوده نمای دیوار

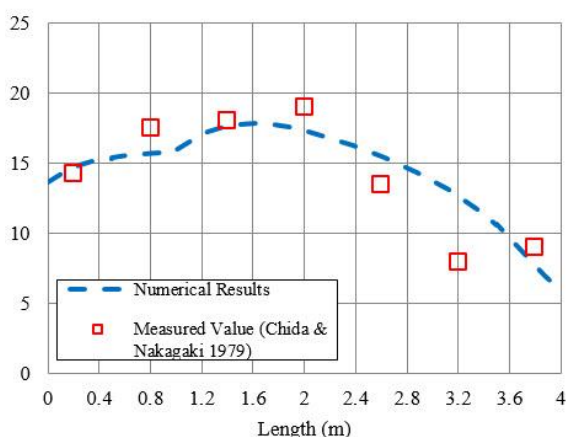
γ_c (KN/m ³)	E_c (Mpa)	ν_c
24	30000	0.2



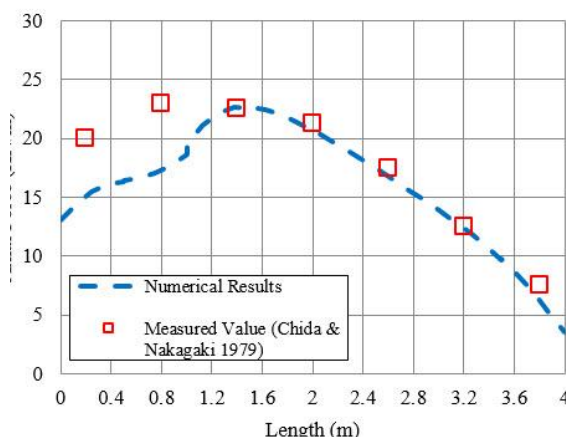
نمودار ۲- تاریخچه شتاب- زمان زلزله Upland

صحت‌سنجی

همان‌گونه که در بخش مدل‌سازی اشاره گردیده است، جهت مدل‌سازی دیوار خاک مسلح از مطالعه موردی Chida و Nakagaki سال ۱۹۷۹ استفاده گردیده است. براساس این مطالعه برای مسلح نمودن دیوار از ۸ ردیف تسلیح‌کننده تسمه‌ای استفاده شده است. تاثیر ساخت دیوار بر نیروی کششی ایجاد شده در برخی از این تسمه‌های فلزی پیمایش شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تطابق خوبی بین نتایج عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.



(ب)



(الف)

شکل ۳- نیروی کششی در تسمه‌های (الف) ردیف دوم و (ب) ردیف سوم

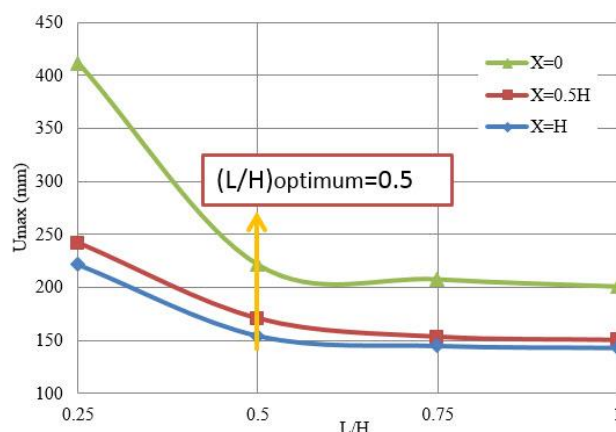
ارائه نتایج

در این بخش، با مطالعات پارامتریک به کمک شبیه‌سازی‌های عددی تشریح شده در بخش قبلی (یعنی شبیه‌سازی روند اجرای دیوار خاکی مسلح با تسمه‌های فلزی و سپس اعمال سربار دیوار و نیز شبیه‌سازی دیوار مذکور در شرایط لرزه‌ای) و تغییر در میزان طول و سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) و نیز تغییر در میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار)، ضمن ارزیابی ماکزیمم جابه‌جایی کل دیوار (U_{max}) در طی اعمال سربار دیوار (شرایط استاتیکی) و اعمال زلزله (شرایط لرزه‌ای)، ماکزیمم نیروی محوری کششی تسمه‌ها (F_{max}) نیز در طی اعمال سربار دیوار (شرایط استاتیکی) و اعمال زلزله (شرایط لرزه‌ای) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این امر، جهت بررسی تاثیر طول و سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) و نیز تاثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار و نیروی تسمه‌ها پس از اعمال سربار دیوار (در شرایط استاتیکی) و نیز بررسی تاثیر این پارامترها بر جابه‌جایی‌های دیوار و نیروی تسمه‌ها در طی اعمال زلزله صورت می‌گیرد. همچنین در طی این مطالعات با در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای طول و سختی تسمه‌ها، ضریب اطمینان پایداری دیوار در طی افزایش میزان سربار مستقر بر لبه دیوار نیز در هر دو شرایط استاتیکی و لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

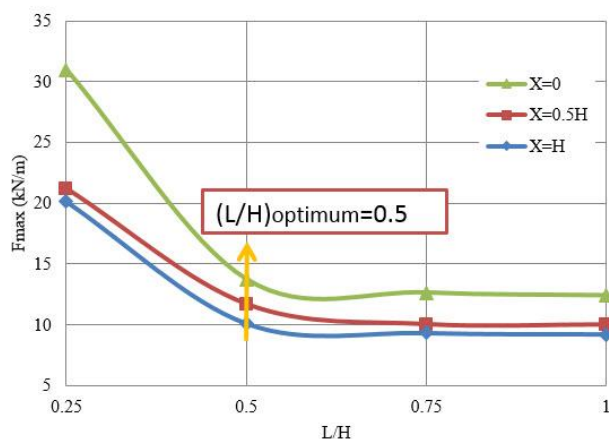
بررسی تأثیر طول و سختی تسمه‌ها و میزان سربار بر رفتار دیوار و تسمه‌ها در شرایط استاتیکی

در ابتدا، در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار (X) (از ۰ تا H)، به بررسی تأثیر افزایش طول تسمه‌ها (L) (از $0.25H$ تا H) و نیز افزایش مدول یانگ تسمه‌ها (E_s) (از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مگا پاسکال) بر ماکزیمم جابه‌جایی کل دیوار و ماکزیمم نیروی محوری کششی تسمه‌ها پس از اعمال سربار دیوار، پرداخته می‌شود. سپس، در طی افزایش میزان سربار مستقر بر لبه دیوار ($X=0$) (از ۲۵ تا ۱۸۵ کیلو پاسکال) و نیز در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای طول و سختی تسمه‌ها، به بررسی تأثیر میزان سربار دیوار بر حداکثر جابه‌جایی کل و ضریب اطمینان پایداری دیوار و نیز حداکثر نیروی محوری کششی تسمه‌ها پس از اعمال سربار پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که میزان سربار ۱۸۵ کیلوپاسکال برابر با میزان ظرفیت باربری نهایی دیوار در طی اعمال سربار به عرض ۳ متر بر لبه دیوار است.

از شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود که در شرایط استاتیکی، ضمن کاهش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار، با افزایش طول تسمه‌ها (خصوصاً از $0.25H$ تا $0.5H$) در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، به جهت افزایش سطح تأثیر تنش‌های بسیج شده خاک (مقاومت خاک) در جدار تسمه‌ها، از میزان جابه‌جایی‌های دیوار (و در پی آن نیروی تسمه‌ها)، کاسته می‌شود، که این کاهش با کمتر شدن فاصله سربار از لبه دیوار شدت بیشتری می‌یابد. لذا با توجه به این نتایج و نیز صرفه جویی در هزینه‌ها، می‌توان طول بهینه تسمه‌ها را در شرایط استاتیکی برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار 0.5 برابر ارتفاع خاکریز در نظر گرفت.

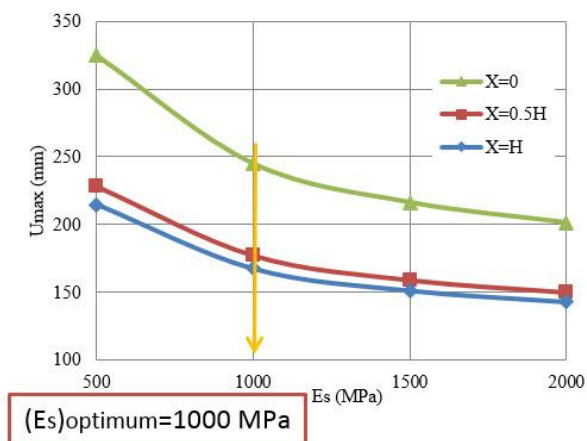


شکل ۴- تأثیر طول تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار پس از اعمال سربار ($E_s=2000$ MPa)

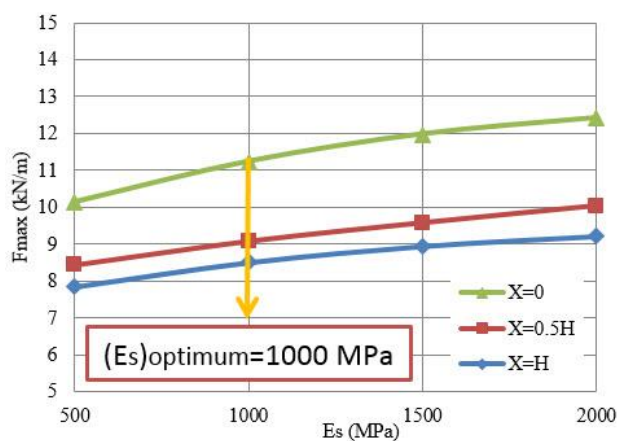


شکل ۵- تأثیر طول تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر نیروی تسمه‌ها پس از اعمال سربار ($E_s=1000$ MPa)

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ نیز دیده می‌شود که در شرایط استاتیکی، ضمن کاهش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار، با افزایش سختی تسمه‌ها در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، با وجود کاهش ناچیز در میزان جابه‌جایی‌های دیوار (خصوصاً در مدول یانگ ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، نیروی تسمه‌ها افزایش می‌یابد. لذا، می‌توان گفت که در شرایط استاتیکی، افزایش مدول یانگ تسمه‌ها از یک حدی (در حدود ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، بیشتر منجر به افزایش نیرو در تسمه‌ها شده و کمک ناچیزی در کاهش جابه‌جایی‌های دیوار در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار) می‌کند.

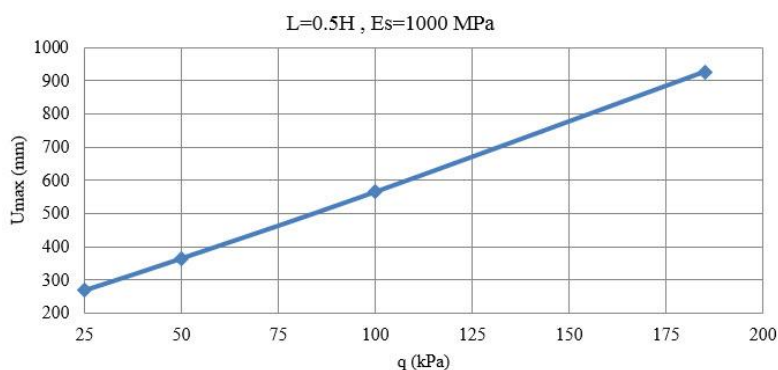


شکل ۶- تأثیر سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار پس از اعمال سربار ($L=H$)

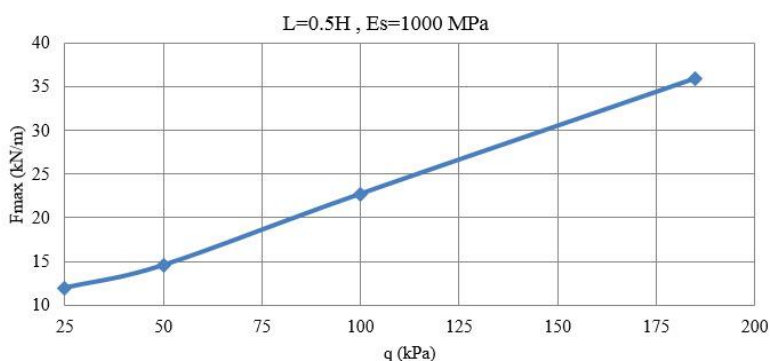


شکل ۷- تأثیر سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر نیروی تسمه‌ها پس از اعمال سربار ($L=H$)

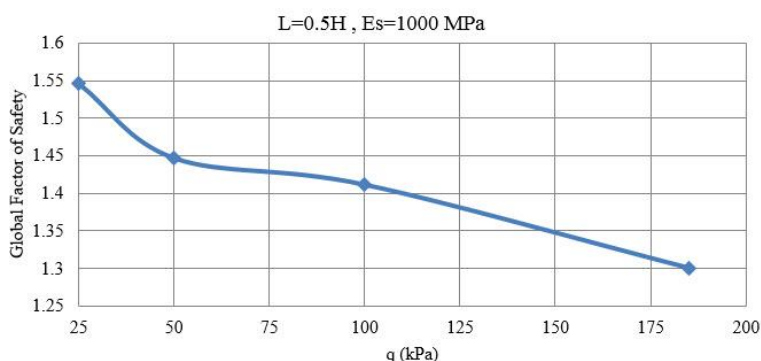
از طرفی، از شکل‌های ۸ تا ۱۰ نیز دیده می‌شود که در شرایط استاتیکی، با افزایش میزان سربار مستقر بر لبه دیوار، ضمن افزایش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها، از میزان ضریب اطمینان پایداری دیوار، کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که در این ارزیابی‌ها از مقادیر بهینه طول و سختی تسمه‌ها در شرایط استاتیکی (یعنی به ترتیب $0.5H$ و 1000 مگا پاسکال) استفاده شده است.



شکل ۸- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار پس از اعمال سربار



شکل ۹- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر نیروی تسمه ها پس از اعمال سربار

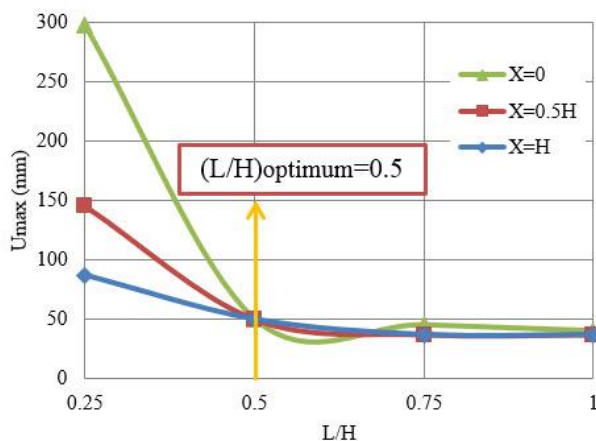


شکل ۱۰- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر ضریب اطمینان پایداری دیوار پس از اعمال سربار

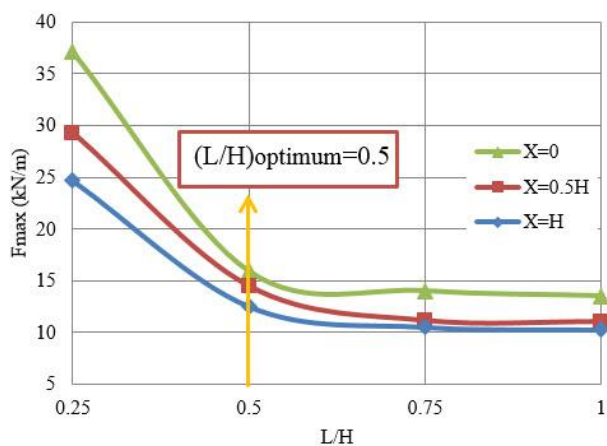
بررسی تأثیر طول و سختی تسمه ها و میزان سربار بر رفتار دیوار و تسمه ها در شرایط لرزه ای

در ابتدا، در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار (X) (از 0 تا H)، به بررسی تأثیر افزایش طول تسمه ها (L) (از 0.25H تا H) و نیز افزایش مدول یانگ تسمه ها (E_s) (از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مگا پاسکال) بر حداکثر جابه جایی کل دیوار و حداکثر نیروی محوری کششی تسمه ها در طی اعمال زلزله، پرداخته می شود. سپس در طی افزایش میزان سربار مستقر بر لبه دیوار ($X=0$) (از ۲۵ تا ۱۸۵ کیلو پاسکال) و نیز در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای طول و سختی تسمه ها، به بررسی تأثیر میزان سربار دیوار بر ماکزیمم جابه جایی کل و ضریب اطمینان پایداری دیوار و نیز ماکزیمم نیروی محوری کششی تسمه ها در طی اعمال زلزله، پرداخته می شود. شایان ذکر است در تحلیل دینامیکی تنها تغییر مکان های ناشی از بارگذاری دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است.

از شکل های ۱۱ و ۱۲ دیده می شود که در طی اعمال زلزله (در شرایط لرزه ای) نیز همچون شرایط استاتیکی، ضمن کاهش جابه جایی های دیوار و در پی آن نیروی تسمه ها در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار، با افزایش طول تسمه ها (خصوصاً از 0.25H تا 0.5H) در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، به جهت افزایش سطح تأثیر تنش های بسیج شده خاک (مقاومت خاک) در جدار تسمه ها، از میزان جابه جایی های دیوار (و در پی آن نیروی تسمه ها) کاسته می شود، که این کاهش با کمتر شدن فاصله سربار از لبه دیوار شدت بیشتری می یابد. لذا با توجه به نتایج حاصل مذکور و نیز صرفه جویی در هزینه ها، می توان طول بهینه تسمه ها در شرایط لرزه ای را نیز (همچون شرایط استاتیکی) برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار ۰/۵ برابر ارتفاع خاکریز در نظر گرفت.

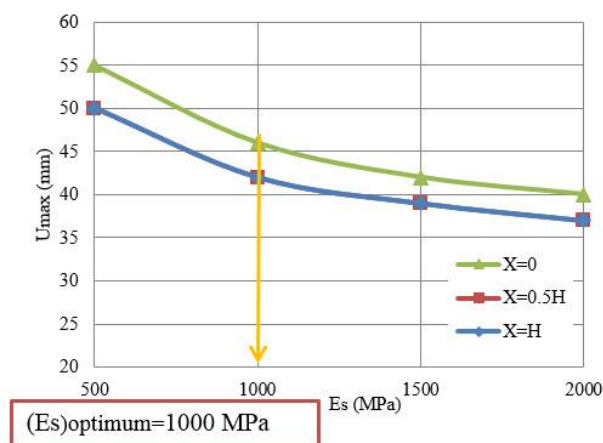


شکل ۱۱- تأثیر طول تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار در طی اعمال زلزله

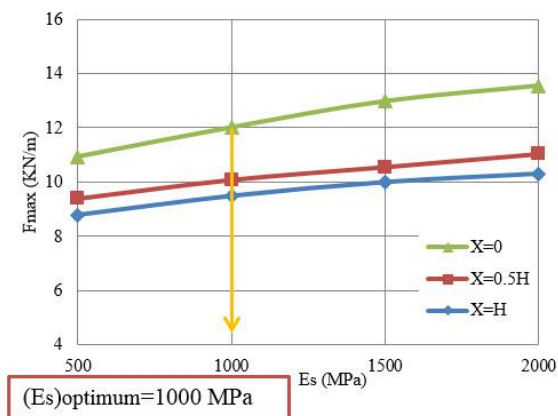


شکل ۱۲- تأثیر طول تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر نیروی تسمه‌ها در طی اعمال زلزله ($E_s=2000$ MPa)

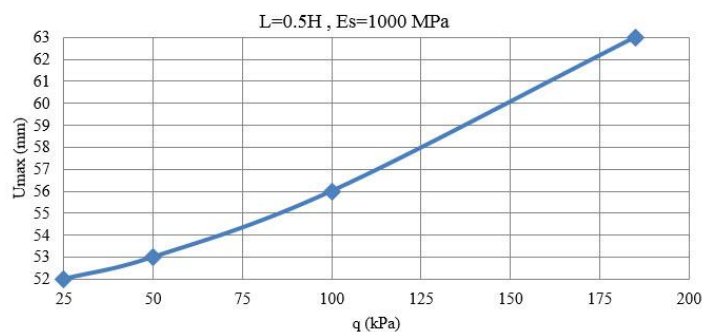
با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز دیده می‌شود که در شرایط لرزه ای نیز همچون شرایط استاتیکی، ضمن کاهش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها در طی افزایش میزان فاصله سربار دیوار از لبه دیوار، با افزایش سختی تسمه‌ها در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، با وجود کاهش ناچیز در میزان جابه‌جایی‌های دیوار (خصوصاً در مدول یانگ ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، نیروی تسمه‌ها، افزایش می‌یابد. لذا، می‌توان گفت که در شرایط لرزه‌ای نیز (همچون شرایط استاتیکی)، افزایش مدول یانگ تسمه‌ها از یک حدی (در حدود ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، بیشتر منجر به افزایش نیرو در تسمه‌ها شده و کمک ناچیزی در کاهش جابه‌جایی‌های دیوار در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار) می‌کند.



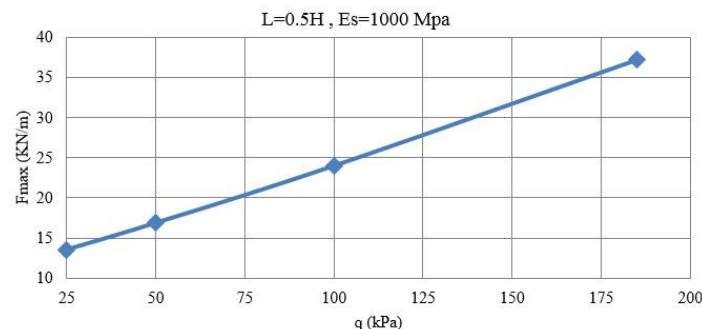
شکل ۱۳- تأثیر سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار در طی اعمال زلزله ($L=H$)



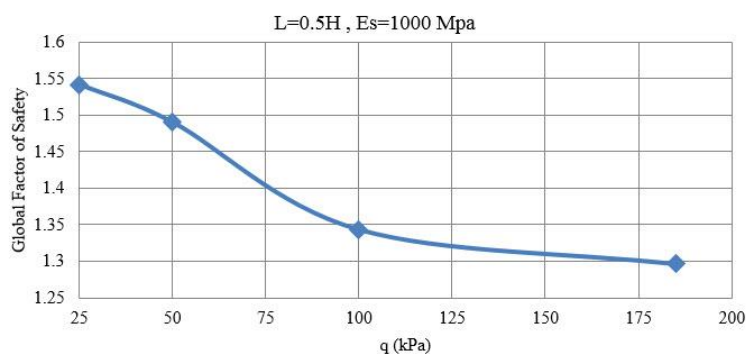
شکل ۱۴- تأثیر سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) بر نیروی تسمه‌ها در طی اعمال زلزله ($L=H$)
 با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ مشاهده می‌شود که در شرایط لرزه‌ای نیز، با افزایش میزان سربار مستقر بر لبه دیوار، ضمن افزایش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها، از میزان ضریب اطمینان پایداری دیوار، کاسته می‌شود. لازم به ذکر است که در این ارزیابی‌ها از مقادیر بهینه طول و سختی تسمه‌ها در شرایط استاتیکی (یعنی به ترتیب $0.5H$ و 1000 مگا پاسکال) استفاده شده است.



شکل ۱۵- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر جابه‌جایی‌های دیوار در طی اعمال زلزله



شکل ۱۶- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر نیروی تسمه‌ها در طی اعمال زلزله



شکل ۱۷- تأثیر میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار) بر ضریب اطمینان پایداری دیوار در طی اعمال زلزله

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اهم نتایج حاصل از بررسی استاتیکی و لرزه‌ای، حداکثر جابه‌جایی کل دیوار و حداکثر نیروی محوری کششی تسمه‌ها در طی تغییر در میزان طول و سختی تسمه‌ها (در فواصل مختلف سربار از لبه دیوار) و همچنین ارزیابی حداکثر جابه‌جایی کل و ضریب اطمینان پایداری دیوار و نیز حداکثر نیروی محوری کششی تسمه‌ها در طی تغییر در میزان سربار دیوار (مستقر بر لبه دیوار)، به صورت زیر ارائه شده است:

در شرایط بررسی استاتیکی، با کاهش میزان فاصله سربار از لبه دیوار، جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش طول تسمه‌ها (خصوصاً از 0.25H تا 0.5H) در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، به جهت افزایش سطح تأثیر تنش‌های بسیج شده خاک (مقاومت خاک) در جدار تسمه‌ها، از میزان جابه‌جایی‌های دیوار (و در پی آن نیروی تسمه‌ها)، کاسته می‌شود، که این کاهش با کمتر شدن فاصله سربار از لبه دیوار شدت بیشتری می‌یابد. می‌توان طول بهینه تسمه‌ها را برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار، ۰/۵ برابر ارتفاع خاکریز، در نظر گرفت. با افزایش سختی تسمه‌ها در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، با وجود کاهش ناچیز در میزان جابه‌جایی‌های دیوار (خصوصاً در مدول یانگ ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، نیروی تسمه‌ها، افزایش می‌یابد. افزایش مدول یانگ تسمه‌ها از یک حدی (در حدود ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، بیشتر منجر به افزایش نیرو در تسمه‌ها شده و کمک ناچیزی در کاهش جابه‌جایی‌های دیوار در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار) می‌کند. لذا، می‌توان سختی بهینه تسمه‌ها را برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار، ۱۰۰۰ مگا پاسکال، در نظر گرفت.

در طی اعمال زلزله (در شرایط لرزه‌ای) نیز همچون شرایط استاتیکی، ضمن کاهش جابه‌جایی‌های دیوار و در پی آن نیروی تسمه‌ها در طی افزایش میزان فاصله سربار از لبه دیوار، با افزایش طول تسمه‌ها (خصوصاً از 0.25H تا 0.5H) در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، به جهت افزایش سطح تأثیر تنش‌های بسیج شده خاک در جدار تسمه‌ها، از میزان جابه‌جایی‌های دیوار (و در پی آن نیروی تسمه‌ها) کاسته می‌شود. می‌توان طول بهینه تسمه‌ها در شرایط لرزه‌ای را نیز (همچون شرایط استاتیکی) برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار، ۰/۵ برابر ارتفاع خاکریز، در نظر گرفت.

در شرایط لرزه‌ای نیز همچون شرایط استاتیکی، با افزایش سختی تسمه‌ها در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار)، با وجود کاهش ناچیز در میزان جابه‌جایی‌های دیوار (خصوصاً در مدول یانگ ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، نیروی تسمه‌ها، افزایش می‌یابد. در شرایط لرزه‌ای نیز (همچون شرایط استاتیکی)، افزایش مدول یانگ تسمه‌ها از یک حدی (در حدود ۱۰۰۰ مگا پاسکال)، بیشتر منجر به افزایش نیرو در تسمه‌ها شده و کمک ناچیزی در کاهش جابه‌جایی‌های دیوار در تمام فواصل (سربار از لبه دیوار) می‌کند. لذا، می‌توان سختی بهینه تسمه‌ها در شرایط لرزه‌ای را نیز (همچون شرایط استاتیکی) برای تمام فواصل سربار از لبه دیوار، ۱۰۰۰ مگا پاسکال، در نظر گرفت.

منابع و مراجع

- [1] Bowles, L. E. Foundation analysis and design. McGraw-hill, 1996.
- [2] MANUAL, ENGINEER. "Retaining and Flood Walls." US Army (1989).
- [3] Sabermahani, M., A. Ghalandarzadeh, and A. Fakher. "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls." *Geotextiles and Geomembranes* 27, no. 2 (2009): 121-136.
- [4] Sander, Andrew C., Patrick J. Fox, and Ahmed Elgamal. "Full-scale seismic test of MSE retaining wall at UCSD." In *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, pp. 1133-1141. 2014.
- [5] Hattamleha, O.A. Muhunthan, B., 2005, "Numerical Procedures for Deformation Calculations in the Reinforced Soil Walls", *Geotextiles and Geomembranes*, No. 24, pp. 52-57.
- [۶] شعبانی، م.ج.، روشن ضمیر، م.ع.، اسلامی، ع.، ۱۳۹۵، "ارزیابی عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با تسلیح کننده های مورب، رویه شیب دار و مهار تسلیح کننده ها"، *مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس*، دوره شانزدهم، شماره ۱، ۱۳۹۵.
- [7] Yasrobi, SH., Azad, A., 2006, "Facing Effects in Geosynthetic- Reinforced Soil Structures", *Tarbiat Modares University, Tehran, Iran*.
- [۸] فرهادی، ع.، فاخر، ع.، زارع، ح.، ۱۳۹۱، "مطالعه عددی مودهای تغییر شکل لرزه ای دیوار خاک مسلح"، *نخستین همایش منطقه ای مهندسی عمران، دانشگاه ملایر*.
- [9] Damians, I. P., A. Lloret, A. Josa, and R. J. Bathurst. "Influence of facing vertical stiffness on reinforced soil wall design." In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris. 2013.
- [10] Chida, S., and M. Nakagaki. "Test and experiment on a full-scale model of reinforced earth wall." In *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement*, vol. 2, pp. 533-538. 1979.
- [11] Guler, Erol, Elif Cicek, M. Melih Demirkan, and Murat Hamderi. "Numerical analysis of reinforced soil walls with granular and cohesive backfills under cyclic loads." *Bulletin of Earthquake Engineering* 10, no. 3 (2012): 793-811.