

تحلیل عددی رفتار دینامیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی با ژئوسنتتیک

عبدالحسین حداد^{۱*}

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

ahadad@semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۷)

چکیده

در سال‌های اخیر احداث دیوارهای تثبیت شده مکانیکی با لایه‌های ژئوسنتتیک در حاشیه شبکه‌های حمل و نقل نظیر بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن و هم‌چنین به عنوان کوله‌های پل و سایر دیوارهای نگهدارنده در مجاورت بناهای شهری، مورد توجه بسیار قرار گرفته است. دیوار تثبیت شده مکانیکی با ژئوسنتتیک، فن‌آوری اجرایی نسبتاً نوینی در زمینه دیوارهای حائل است که در آن از سه عنصر اصلی المان‌های تسلیح‌کننده (شامل شبکه‌های پلیمری موسوم به ژئوگرید و یا لایه‌های ژئوتکستایل)، خاکریز کوبیده شده و پوشش خارجی استفاده شده است. استفاده از این نوع دیوارها و کوله‌ها مزایای متعددی نظیر انعطاف پذیری در برابر نشست بستر، پایداری و ایمنی بیشتر در مقابل زلزله و صرفه اقتصادی را به همراه دارد. به لحاظ مزایای اقتصادی و فنی ذکر شده در این دیوارها، توجه به تبیین رفتار این سازه‌ها در شرایط مختلف محیطی از جمله بارگذاری‌های لرزه‌ای بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل‌های محدود، رفتار این نوع دیوارها در مقابل بارگذاری دینامیکی تحلیل شده و سعی شده است تا از این طریق تاثیر عوامل مختلف نظیر نقش سختی عناصر تسلیح‌کننده و شرایط گیرداری پاشنه دیوار بر واکنش این نوع دیوارها در شرایط بحرانی بارگذاری لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: دیوارهای تثبیت شده مکانیکی، ژئوسنتتیک، سختی لایه تسلیح‌کننده، تحلیل عددی.

مقدمه

دیوارهای خاک مسلح یا دیوارهای تثبیت شده مکانیکی، سازه‌های خاکی مرکبی هستند که از بخش‌های خاکریز کوبیده شده، عناصر تسلیح کننده و قطعات نما برای پوشش سطح خارجی تشکیل شده‌اند. ساخت دیوارهای خاک مسلح با استفاده از تسمه‌های فلزی از دهه ۱۹۶۰ در کشور فرانسه آغاز شد و سپس بهره‌گیری از این فن‌آوری نوین در سراسر جهان به سرعت گسترش یافت. در فاصله زمانی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۰ در حدود ۲۳۰۰۰ دیوار خاک مسلح با مساحتی بالغ بر ۷۰ میلیون مترمربع در ۳۷ کشور جهان ساخته شده است [۱]. تولید شبکه‌های پلیمری موسوم به ژئوگرید برای مسلح کردن خاک از سال ۱۹۸۰ آغاز شد و پس از آن استفاده از این شبکه‌ها در ساخت دیوارهای خاک مسلح در بزرگراه‌های آمریکا از سال ۱۹۸۳ متداول گشت. امتیازات ویژه شبکه‌های ژئوگرید نظیر دوام و ارزانی موجب شد تا این نوع محصولات به تدریج جایگزین تسمه‌های فلزی در دیوارهای خاک مسلح اولیه گردند. مزایای متعدد دیوارهای خاک مسلح شامل سرعت اجرا، نمای زیبا، استحکام و سازگاری با محیط و در نهایت صرفه اقتصادی موجب آن شده که این نوع سازه‌های حائل نسبت به سیستم‌های مشابه نظیر دیوارهای حائل بتن مسلح و یا دیوارهای ثقلی از امتیاز بالاتری برخوردار شوند [۲].

تاریخچه تحلیل دینامیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی

تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار استاتیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی در حین مراحل ساخت و اجرا و همچنین اعمال بارگذاری‌های ناشی از سربار ترافیک و یا عوامل دیگر صورت گرفته است اما مطالعه بر روی پاسخ دینامیکی این نوع سازه‌ها به دلایل زیر از پیچیدگی‌های ذاتی و منحصر بفردی برخوردار است.

۱- دیوار تثبیت شده مکانیکی از اجزای کاملاً غیر یکنواخت تشکیل شده که رفتار هر بخش به طور

مستقل و یا اندرکنش بخش‌های مختلف، درک واکنش تمام مجموعه را در مقابل بارگذاری دینامیکی غامض می‌نماید.

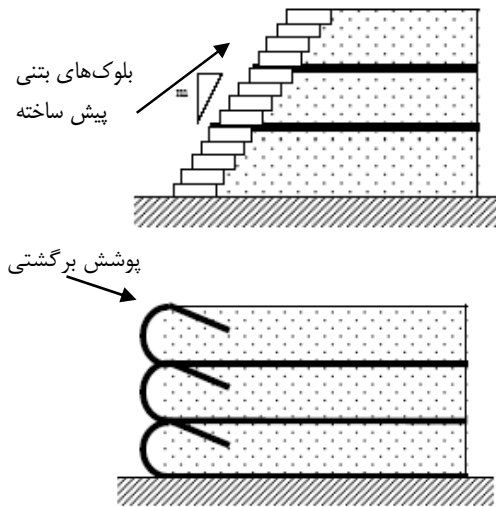
۲- رفتار غیرخطی خاکریز تسلیح شده در مقابل بارهای دینامیکی و تغییر شکل‌های با دامنه متغییر، هنوز به طور کامل شناخته نشده است.

۳- واکنش این دیوارها در مقابل بارگذاری دینامیکی به خصوص در محل اتصال لایه‌های تسلیح کننده و پوشش خارجی به دلیل تنوع اتصالات پیچیده است.

۴- نقش صلبیت پوشش خارجی به خصوص در محل پاشنه آن بر پاسخ دینامیکی دیوار، نیازمند کسب تجربیات نظری و آزمایشگاهی بیشتر است.

علیرغم پیچیدگی‌های ذکرشده، در حال حاضر منابع طراحی استفاده از روش شبه استاتیکی همراه با فرضیات ساده کننده‌ای را در محاسبه نیروی رانش لرزه‌ای دیوار ناشی از شتاب زلزله پیشنهاد می‌کنند [۳ و ۴].

در میان تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات **Yogendrakumar** و همکاران [۵] و **Fujii** و همکاران [۶] اشاره نمود. در این تحقیقات با حل معادلات رفتاری مصالح موجود در دیوارها در شرایط دینامیکی و با استفاده از روش اجزای محدود، پاسخ‌های خطی و غیر خطی دیوارها محاسبه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از روش تحلیل نموی غیر خطی در این نوع دیوارها منجر به پیش بینی پاسخ‌های بهتری خواهد شد. **Cai** و **Bathurst** در مدل‌سازی دیوار تثبیت شده مکانیکی با ژئوسنتتیک و پوشش بلوک بتنی به روش اجزای محدود، تاثیر بارگذاری دینامیکی بر تغییرمکان و پاسخ شتاب دیوار، نیروی برشی و جا به جایی بین بلوک‌های پوشش و نیروی کششی داخل لایه‌های تسلیح کننده را بررسی کردند [۷]. **Hatami** و **Bathurst** در یک سلسله تحقیقات عددی گسترده به روش تفاضل محدود و مدل‌سازی آزمایشگاهی مطالعات نسبتاً کاملی را بر روی نقش اجزای مختلف دیوار در پاسخ دینامیکی



شکل ۱- انواع پوشش‌های رایج در دیوارهای تثبیت شده مکانیکی

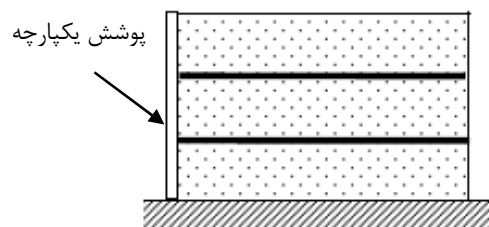
در این تحقیق نقش عوامل یاد شده بر رفتار دینامیکی دیوار از طریق تحلیل عددی به روش تفاضل محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل سازی عددی دیوار تثبیت شده مکانیکی

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد دیوارهای تثبیت شده مکانیکی از سه جزء اصلی خاکریز، عناصر تسلیح کننده و پوشش نما تشکیل شده اند. در شکل ۲ مدل سازی عددی دیوار به همراه اجزای دیگر آن از قبیل پی دیوار نشان داده شده است. خاکریزهای تسلیح شده که بخش عمده‌ای از حجم دیوار را تشکیل می‌دهند، معمولاً از مصالح دانه‌ای با مشخصات فنی ویژه‌ای انتخاب می‌شوند. قابلیت زهکشی مناسب و ایجاد نیروی اصطکاک لازم بین ذرات خاک و لایه‌های تسلیح کننده از جمله ویژگی‌های لازم در انتخاب این نوع مصالح هستند. در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق جنس و نوع مصالح خاکریز به صورت همگن و مطابق با مشخصات فنی جدول ۱ و مدل رفتاری آن به صورت الاستو-پلاستیک مور-کولمب انتخاب شده است.

دیوارها به انجام رساندند [۸ و ۹]. در این مطالعات تاثیر مشخصات تسلیح کننده مثل طول و فاصله، و سختی نمای خارجی دیوار و همچنین تاثیر فرکانس ارتعاشی وارد بر دیوار در پاسخ مجموعه دیوار بررسی شد. آن‌ها دریافتند که از مجموع تغییر مکان‌های دیوار در هر پله از بارگذاری دینامیکی، تغییر مکان کل دیوار به شکل دائمی و به مقدار زیاد شکل می‌گیرد. این بررسی‌ها نشان داد که حداکثر نیروی کششی داخل اجزای تسلیح کننده برخلاف توصیه آیین نامه‌ها به صورت خطی تابع ارتفاع نیست. پیشنهاد آنان برای درک بهتر توزیع نیروی داخل عناصر مسلح کنند، استفاده از الگوی رفتاری دوخطی به جای الگوی خطی بود. علاوه بر این نتایج به دست آمده از تجربیات آزمایشگاهی نشان داد که انتخاب زاویه اصطکاک حداکثر (در حالت کرنش مسطح) در مدل سازی عددی خاکریز، با شرایط واقعی پاسخ دیوار هم‌خوانی بیشتری دارد.

از عوامل موثر بر پاسخ دینامیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی در حین زلزله، نقش سختی لایه‌های تسلیح کننده مورد استفاده در دیوار و شرایط گیرداری پای دیوارها بسیار حائز اهمیت است. شرایط گیرداری پای دیوارها علاوه بر عمق استقرار پی دیوار به سختی پوشش خارجی نیز وابسته است. در ساخت این نوع دیوارها به طور کلی از سه نوع پوشش استفاده می‌شود. پوشش یک‌پارچه بتنی، پوشش متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته (بلوک‌های بتنی) و پوشش انعطاف پذیر از جنس لایه‌های ژئوسنتتیک که به پوشش برگشتی معروف هستند. سه نمونه از این نوع پوشش‌ها به طور نمادین در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



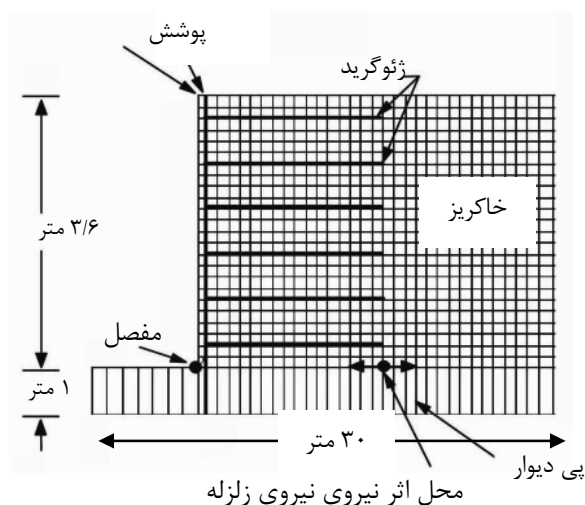
است. طول لایه های تسلیح کننده نیز در هر لایه معادل ۰/۷ ارتفاع دیوار انتخاب شده است. در این تحقیق ارتفاع قطعات نما ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده اند. هم چنین از مکانیزم اتصال اصطکاکی در بین قطعات نما جهت مدل سازی عددی استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی قطعات نما ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی لایه ژئوسنتتیک و قطعات پیش ساخته بتنی نما مورد استفاده در تحلیل

مقدار	ویژگی
۵ (N/m ²)	وزن لایه (در واحد سطح)
۱۰ ^{۰.۵} تا ۱۰ ^{۰.۲} (kN/m)	سختی کششی
۲۲۰ (kN/m)	مقاومت جاری شدن
۰/۰۰۳ (m ²)	سطح مقطع
۳۰۰۰ (MN/m/m)	مقاومت لایه حد واسط
ناچیز	مقاومت فشاری
ارتجاعی	مدل رفتاری قطعات نما
۲۲ (kN/m ³)	وزن مخصوص قطعات نما
۲۵ (GPa)	ضریب یانگ قطعات نما
ناچیز	ضریب پواسون قطعات نما

شرایط مرزی و بارگذاری

در امتداد مرز تحتانی مسئله (در حاشیه پی دیوار) از تکیه گاه مفصلی در دو جهت طولی و عرضی استفاده شده است. این انتخاب به آن علت بوده که پی دیوار صلب فرض شده است. در امتداد مرزهای کناری نیز از مفصل های غلتکی استفاده شده تا امکان جا به جایی قائم لایه های خاک تحت اثر نیروی وزن فراهم آید. در مرحله تحلیل دینامیکی و در امتداد مرزهای کناری، با تبدیل مفصل های غلتکی به تکیه گاه جاذب انرژی از وقوع پدیده برگشت و تداخل امواج داخلی در مدل جلوگیری به عمل آمده است. میرایی سیستم خاکریز تسلیح شده و نمای دیوار نیز بر اساس مدل میرایی هیستریسیس در مصالح انتخاب شده است. در مصالحی هم چون خاک و یا سنگریزه میرایی عموماً تابعی از دامنه کرنش ایجاد شده در مصالح است و با



شکل ۲- مدل سازی عددی دیوار و پی آن

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح خاکریز مورد استفاده در تحلیل عددی

مقدار	ویژگی
۲۰ (kN/m ³)	وزن مخصوص
۳۶ (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی
۶ درجه	زاویه اتساع
۴۰ (Mpa)	ضریب یانگ
۰/۳	ضریب پواسون

ویژگی های مکانیکی لایه های تسلیح کننده مورد استفاده در مدل نیز در جدول ۲ ارائه شده است. ژئوسنتتیک مورد استفاده از نوع ژئوگرید بوده و خصوصیات اصلی آن عبارت هستند از: وزن مخصوص، ضریب سختی (در مقابل کشش) با دیمانسیون نیرو در واحد عرض لایه، مقاومت جاری شدن کششی، سطح مقطع در عرض واحد و ضرائب مقاومت اصطکاکی بین لایه و خاک اطراف آن که به صورت یک لایه حد واسط عمل می نماید. در مدل عددی شبکه های ژئوگرید در ۶ ردیف و با فواصل قائم ۰/۶ متر از یکدیگر در نظر گرفته شده اند. معمولاً انتخاب فواصل قائم لایه ها بر حسب ضریبی از ارتفاع قطعات پیش ساخته نما

مراحل تحلیل عددی

پس از ایجاد مدل عددی از دیوار تثبیت شده مکانیکی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ و قراردادن پارامترهای مکانیکی اجزای مختلف دیوار در المان‌های مربوط به هر بخش، تحلیل عددی در دو بخش صورت پذیرفت. بخش اول شامل تحلیل استاتیکی است که در آن به منظور ایجاد شرایط تنش‌های برجا در محیط خاکریز و دیوار و همچنین ایجاد نیروی کششی در داخل اجزای تسلیح کننده نیروهای ناشی از ثقل به مجموعه وارد می‌شوند. در انتهای این بخش از تحلیل تغییر شکل‌ها و تنش‌های ایجاد شده ناشی از اثر نیروی ثقل بر بخش‌های مختلف دیوار تعیین می‌شوند.

در بخش دوم تحلیل، با اعمال شتاب تحریک پایه در محل پی دیوار، مجموعه دیوار تثبیت شده مکانیکی در معرض بارگذاری دینامیکی قرار گرفته و پاسخ دیوار به این مرحله از بارگذاری شامل تغییر شکل‌ها و تنش‌ها داخلی محاسبه می‌شوند.

مدل سازی با نرم افزار FLAC2D

نرم افزار FLAC2D یک برنامه تحلیل محیط‌های پیوسته مبتنی بر روش تفاضل‌های محدود است. به کمک این نرم افزار می‌توان رفتار محیط‌های مورد مطالعه حاوی مصالحی که دچار جریان پلاستیک و یا تغییر شکل‌های بزرگ می‌گردند را تحت اثر انواع بارگذاری دلخواه، شبیه سازی کرد [۱۱]. قابلیت این برنامه در مدل‌سازی رفتار غیر خطی مصالح و پیش بینی شکست خمیری آن‌ها موجب گشته تا استفاده از آن در زمینه‌های مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک در میان کارشناسان تحلیل عددی از اقبال زیادی برخوردار باشد. در تحقیق انجام شده مراحل زیر به ترتیب طی شده‌اند:

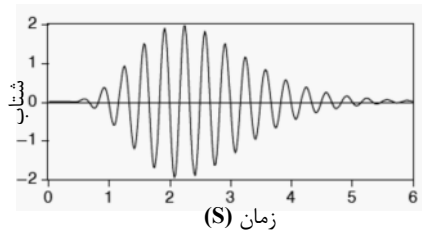
- انتخاب محدوده هندسی متناسب با ابعاد مسئله مورد بررسی و ایجاد شبکه اولیه در آن مطابق شکل ۲.
- انتخاب مدل رفتاری متناسب و حتی‌الامکان متشابه با رفتار واقعی مصالح و استخراج ضرائب مرتبط با آن مدل در این تحلیل برای مدل‌سازی محیط خاکریز از

افزایش دامنه کرنش، مقدار میرایی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. البته به علت نقش جزئی بخش نما در جذب انرژی، از میرایی قطعات نما صرف نظر شده است. مقدار میرایی خاکریز نیز بر اساس تجربیات Elgamal بین ۵ تا ۱۰ درصد انتخاب شده است [۱۰].

به منظور اعمال شرایط بارگذاری دینامیکی بر مدل از یک تابع بارگذاری معرف شتاب مطابق رابطه ۱ استفاده شده است. در این تابع با افزایش زمان دامنه شتاب افزایش یافته و پس از ۲/۵ ثانیه مجدداً کاهش می‌یابد. فرکانس ارتعاش در این تابع ثابت و مقدار آن ۳ هرتز انتخاب شده که نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم دیوار و پی زیر آن است.

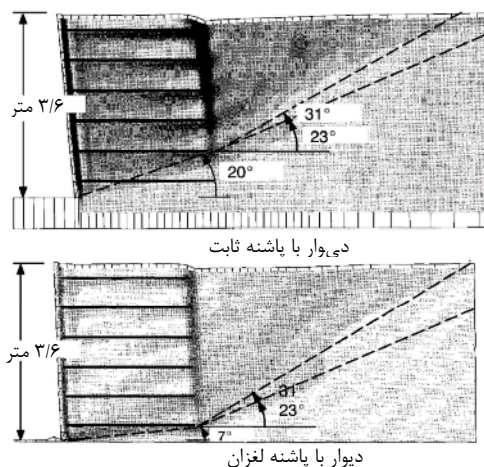
$$\ddot{u}(t) = \sqrt{55} e^{-5.5t} t^{1.2} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

در شکل ۳ منحنی بارگذاری دینامیکی وارده بر دیوار (شتاب تحریک در محل پایه) نشان داده شده است.



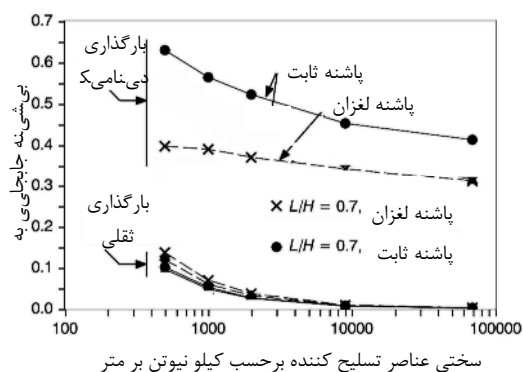
شکل ۲- منحنی بارگذاری دینامیکی وارد بر دیوار

در تحلیل‌های انجام شده حداکثر دامنه شتاب وارد بر دیوار به ترتیب معادل ۰/۲۵ و ۰/۳۵ شتاب ثقل در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است اگرچه تابع بارگذاری دینامیکی فوق از لحاظ محتوی فرکانس و طول زمان بارگذاری با شتاب نداشت‌های ناشی از زمین لرزه‌های واقعی تفاوت دارد، اما از لحاظ سادگی در محاسبات و شکل تابع شباهت زیادی با رکوردهای زمین‌لرزه داشته و بر طبق تجربیات حاتمی و همکاران اثر چنین تابع هارمونیک بر سیستم دیوار به مراتب بیش از تاثیر یک زلزله واقعی با دامنه شتاب مشابه و دوره زمانی یکسان است، از این رو می‌توان از آن جهت تبیین رفتار دینامیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی بهره جست [۹].



شکل ۳- ناحیه برشی ایجاد شده در خاکریز پشت دیوار پس از اعمال شتاب پایه

همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد مقدار تغییر مکان بیشینه دیوار در مرحله پس از ساخت با افزایش سختی نسبی عناصر تسلیح کننده کاهش چشمگیری می‌یابد، به طوری که جا به جایی دیوارهای با عناصر تسلیح کننده سخت‌تر از ۱۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر عملاً بسیار ناچیز است.



شکل ۴- تاثیر سختی عناصر تسلیح کننده بر تغییر مکان دیوار

تغییر مکان دیوار پس از اعمال بارگذاری دینامیکی تا حد زیادی تابع شرایط گیرداری پاشنه دیوار بوده و افزایش سختی عناصر تسلیح کننده تاثیر کمی بر کاهش دامنه جا به جایی‌ها داشته است. همچنین مطابق نتایج حاصله

مدل رفتاری الاستو- پلاستیک موه‌ر- کولومب استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی لایه‌های تسلیح کننده از المان کابلی موجود در نرم‌افزار با مدل رفتاری الاستو- پلاستیک کامل استفاده شده است.

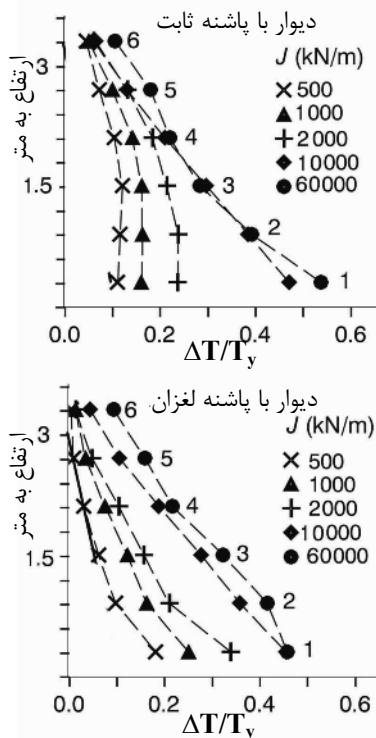
- اعمال شرایط مرزی شامل تنش‌ها و تغییر شکل‌های اولیه در مسئله
- تحلیل اولیه مدل به منظور ایجاد شرایط برجا در سازه خاکی پیش از تحلیل دینامیکی.
- تحلیل نهایی مدل و ایجاد تغییرات لازم در شرایط اولیه نظیر اعمال بارگذاری دینامیکی و یا ایجاد تغییر شکل اولیه در صورت نیاز.
- ملاحظه و استخراج نتایج نهایی تحلیل به کمک نرم افزار رابط گرافیکی. پس از اتمام مراحل تحلیل، می‌توان با استفاده از قابلیت‌های رابط گرافیکی این برنامه نتایج حاصل از تحلیل را بر روی مدل اولیه ملاحظه کرد.

نتایج تحلیل دینامیکی

در اولین بخش از ارائه نتایج حاصله از تحلیل دینامیکی دیوار تثبیت شده مکانیکی، تصویر منطقه تحت اثر برش در محل خاکریز دیوار و مقدار تغییر مکان‌های بیشینه افقی دیوار مورد اشاره قرار می‌گیرند. در شکل ۳ ناحیه برشی ایجاد شده در مناطق خاکریز تسلیح شده و خاک مورد حفاظت واقع در پشت دیوار پس از اعمال شتاب پایه نشان داده شده است. در این دو شکل تاثیر شرایط جا به جایی پاشنه دیوار در گسترش ناحیه برشی به خوبی ملاحظه می‌گردد. در حالت پاشنه ثابت مقدار تمرکز تنش‌های برشی در اطراف و انتهای لایه‌های تسلیح کننده به مراتب بیش‌تر از حالت پاشنه لغزان است. در شکل ۴ مقدار جا به جایی بیشینه برای دیوارهای با عناصر تسلیح کننده با سختی مختلف و شرایط جا به جایی متفاوت در پای دیوار (پاشنه ثابت و پاشنه لغزان) نشان داده شده است. این شکل تغییر مکان‌ها در دو حالت تحلیل پس از تنش برجا و تحلیل دینامیکی را در بر دارد.

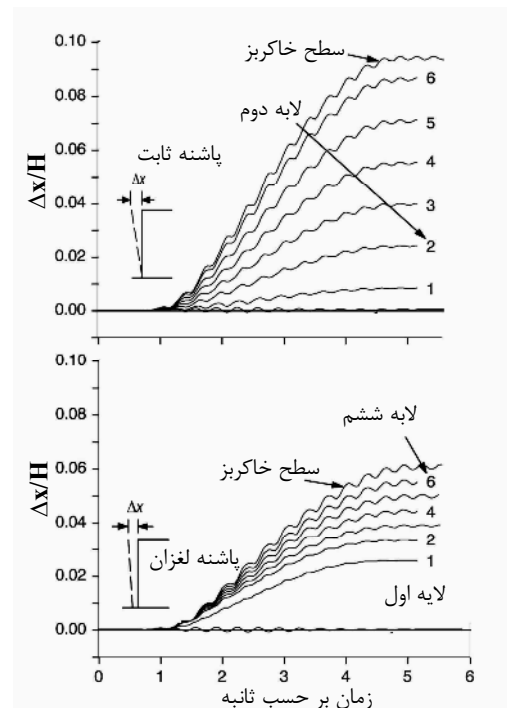
کاهش مقدار شتاب وارده بر دیوار، جا به جایی‌ها به حد ثابتی میل نموده‌اند.

در آخرین بخش از ارائه نتایج تحلیل دینامیکی دیوارهای با پاشنه ثابت و لغزان، نمودارهای معرف اضافه نیروی کششی که پس از اعمال شتاب پایه در لایه‌های تسلیح کننده ایجاد شده اند در شکل ۶ ارائه می‌گردند. در تهیه این نمودارها سختی عناصر تسلیح کننده از مقدار ۵۰۰ تا ۶۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر تغییر یافته است. به منظور بدون کردن این نمودارها نسبت اضافه کشش دینامیکی (ΔT)، در لایه‌های تسلیح کننده به مقاومت جاری شدن آن‌ها (T_y) در محور افقی نشان داده شده است. محور قائم نیز در شکل ۶ معرف ارتفاع و اعداد کنار نمودارها معرف شماره لایه تسلیح کننده است که از پایین به بالا شماره گذاری شده‌اند.



شکل ۶- تغییرات اضافه نیروی کششی دینامیکی در لایه‌های تسلیح کننده بر حسب ارتفاع و سختی لایه مقدار اضافه کشش دینامیکی در لایه‌ها از رابطه ۲ تعیین شده است.

تاثیر افزایش سختی عناصر تسلیح کننده بر جابجایی در دیوارهای با پاشنه لغزان کمتر از دیوارهای با پاشنه ثابت بوده است. در شکل ۵ تاریخچه تغییر مکان دینامیکی دیوار (نسبت به ارتفاع کل دیوار) در ترازهای مختلف، در دو حالت دیوار با پاشنه ثابت و دیوار با پاشنه لغزان برای یک سری از تحلیل‌های انجام شده ارائه شده است. ترازهای مورد بررسی در این شکل، محل‌های قرارگیری لایه‌های تسلیح کننده و سطح فوقانی خاکریز و تراز پی دیوار است. سختی عناصر تسلیح کننده در این سری از تحلیل‌ها معادل ۱۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر و حداکثر شتاب تحریک پایه ۰/۲۵ شتاب ثقل در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج حاصله ملاحظه می‌گردد که بزرگنمایی جا به جایی با افزایش ارتفاع از پای دیوار افزایش یافته و مقدار نسبی آن در دیوار با پاشنه ثابت از دیوار با پاشنه لغزان بیشتر است.



شکل ۵- تاریخچه تغییر مکان دینامیکی دیوار

همان‌گونه که از نتایج مشاهده می‌گردد، با افزایش زمان بارگذاری، بر دامنه جابه جایی دیوار افزوده شده و سپس با

- علاوه بر بیشنه جا به جایی افقی، تاریخچه زمانی جا به جایی افقی نیز در دیوارهای با پاشنه ثابت نسبت به دیوارهای با پاشنه لغزان از دامنه بیشتری برخوردار است. از این رو به نظر می‌رسد استفاده از دیوارهای با پاشنه ثابت در شرایطی که جا به جایی افقی تاج دیوار از حساسیت زیادی برخوردار است (نظیر کوله پل‌ها که تکیه گاه عرشه پل می‌باشند) به خصوص در حالت لرزه‌ای باید با احتیاط کامل صورت پذیرد.
- در دیوارهای تثبیت شده مکانیکی تحت اثر شتاب پایه، اضافه نیروی کششی دینامیکی در لایه‌های تسلیح کننده نسبت به نیروی کششی در حالت استاتیکی، با افزایش عمق روند فزونی داشته و در دیوارهای با پاشنه ثابت و لایه‌های تسلیح کننده با سختی زیاد مقدار اضافه نیرو به صورت غیر خطی با عمق افزایش می‌یابد.

- افزایش سختی لایه‌های تسلیح کننده موجب افزایش اضافه نیروی کششی دینامیکی در آن‌ها گشته و مقدار این افزایش در دیوارهای با پاشنه ثابت بیشتر از دیوارهای با پاشنه لغزان است. با توجه به این نکته استفاده از اتصالات مکانیکی مقاوم در محل تماس لایه‌های تسلیح کننده سخت به قطعات پوشش، اجتناب ناپذیر است.

$$\Delta T = T_{max(dynamic)} - T_{max(Static)} \quad (2)$$

در رابطه بالا، $T_{max(dynamic)}$ بیشینه نیروی کششی داخل لایه تسلیح کننده حاصل از تحلیل دینامیکی و $T_{max(Static)}$ بیشینه نیروی کششی داخل لایه در حالت تحلیل استاتیکی دیوار است که از روش **FHWA** محاسبه شده است [۱].

همان‌گونه که در این اشکال ملاحظه می‌گردد، نسبت اضافه نیروی کششی در شرایط دینامیکی در دیوارهای با پاشنه ثابت از دیوارهای با پاشنه لغزان بیشتر است. از سوی دیگر با افزایش سختی عناصر تسلیح کننده به بیش از مقدار ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر، نسبت اضافه نیروی دینامیکی نیز در ترازهای نزدیک به پی دیوار به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام تحلیل‌های عددی متعدد، تاثیر افزایش سختی لایه‌های تسلیح کننده و هم‌چنین نوع گیرداری پاشنه بر رفتار دینامیکی دیوارهای تثبیت شده مکانیکی تحت اثر تحریک شتاب پایه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیقات به طور خلاصه به شرح زیر ارائه می‌شود:

- در دیوارهای با پاشنه ثابت، وسعت و مقدار تنش برشی ایجاد شده تحت اثر شتاب پایه، در انتهای لایه‌های تسلیح کننده بیشتر از دیوارهای با پاشنه لغزان است. این امر نشان دهنده این موضوع است که ثابت کردن پاشنه دیوار یا به عبارت دیگر صلب نمودن آن موجب افزایش مقدار تنش برشی و در نتیجه گسترش مناطق پلاستیک در خاک اطراف لایه‌های تسلیح کننده می‌شود.
- بیشینه جا به جایی افقی دینامیکی در دیوارهای با پاشنه ثابت از دیوارهای با پاشنه لغزان بیشتر است. به عبارت دیگر انعطاف پذیری شرایط حرکت در پای دیوار موجب کاهش بزرگ‌نمایی جا به جایی در دیوار می‌شود. رعایت این نکته می‌تواند ما را در طرح دیوارهای با انعطاف پذیری بیشتر در برابر زلزله رهنمون سازد.

مراجع

- [1] Elias, V., Barry, R.C., (2001), *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design & Construction Guidelines*, U.S. Department of Transportation Washington, D.C., FHWA-NHI-00-043
- [2] Koerner, R.M. Koerner, J. Te-Yang Soong (2001) – Earth Retaining Wall Costs in the USA, Geosynthetics Conference 2001, pp.483-508
- [3] AASHTO, (1998): *Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA
- [4] Holtz, R.D., Barry, R.C. and Berg, R.R., (1998) "Geosynthetics Design and Construction Guidelines", Publication No: FHWA HI 95-038
- [5] Yogendrakumar, M., Bathurst, R.J. and Finn, W.D.L., (1992), Dynamic Response Analysis of Reinforced-Soil Retaining Wall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(8), pp. 1158-1167
- [6] Fujii, T., Fukuda, N. and Tajiri, N., (1997), Dynamic Response Analysis of Geogrid Reinforced Steep Embankment Subjected to An Earthquake, *Proceedings of the Third International Symp. on Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan, pp.197-202
- [7] Cai, Z., and Bathurst, R.J., (1995), Seismic Response Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Segmental Retaining Walls by Finite Element Method, *Computers and Geotechnics*, Vol.17, pp.523-546
- [8] Bathurst R.J. and Hatami K, (1998) "Seismic Response Analysis of A Reinforced Soil Retaining Wall", *Geosynthetics International* (special issue on Earthquake Engineering), *Industrial Fabrics Association International (IFAI)*, USA, 5(1-2), pp. 127-166.
- [9] Bathurst R. J. and Hatami K, (2003), Full-Scale Performance Testing and Numerical Modelling of Reinforced Soil Retaining Walls, *Proceeding of Landmarks in Earth Reinforcement*, pp.773- 799
- [10] Elgamal, A-W., Alampalli, S. and Van Laak, P., 1996, "Forced Vibration of Full-Scale Wall-Backfill System", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 10, pp.849-858.
- [11] FLAC, 1995, "Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 3.30, Itasca Consulting Group, Inc., 708 South Third Street, Minneapolis, Minneapolis, USA.

