پیشنهاد ضریب شتاب افقی معادل زلزله در دیوارهای حایل خاکی مسلح شده با تسمه‌های پلیمری

علی کمک‌پناه، مریم یزدی*؛
دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط‌زیست

تاریخ: دریافت ۹۳/٤/۳ **پذیرش** ۹۳/۹/۹

چکیده

از آن‌جاکه استفاده از سازه‌های خاک مسلح در مناطق لرزه‌خیز روز به روز در حال افزایش است، بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها اهمیت می‌یابد. در این تحقیق، به بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای حایل خاک مسلح شده با تسمه‌های پلیمری می‌پردازیم. برای تحلیل حساسیت، تأثیر فراسنج‌های طول مسلح کننده‌ها، نحوهٔ اجرای مسلح‌کننده‌ها، بیشینهٔ شتاب موج ورودی و فرکانس موج ورودی که اثر چشم‌گیری بر تغییر شکل‌ها دارند بررسی می‌شود. مشکل عمدهٔ تحلیل‌های دینامیکی زمان‌بر بودن آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای عددی است. از این‌رو، مناسب‌ترین و ساده‌ترین راه حل، تعیین ضرایبی معادل است که به‌واسطهٔ آن بتوان تغییر مکان‌های دیوار را از دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی به یک‌دیگر هم‌گرا کرد تا با استفاده از تحلیل‌های شبه استاتیکی که زمان بسیار کم‌تری نسبت به تحلیل‌های دینامیکی می‌گیرند، به طراحی نسبتاً دقیقی دست یافت. به‌این‌منظور با در نظر گرفتن تغییر مکان افقی دیوار به‌عنوان مبنای مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دیوار حایل، خاک مسلح، تسمه پلیمری، تحلیل دینامیکی ، ضریب شتاب افقی معادل زلزله

* **نویسنده مسئول** yazdi_ma@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

مقدمه

به‌دلیل ضعیف بودن خاک در برابر تنش‌های کششی، طراحان همیشه به‌دنبال بهترین راه حل برای جبران این نقیصه خاک هستند. تسلیح خاک از قدیمی‌ترین روش‌هایی است که در ساختن سازه‌هایی که غالباً از خاک به‌عنوان اصلی‌ترین مصالح استفاده می‌شود، به‌کار می‌رود.

در روش خاک مسلح، نوارها (تسمه‌های) فولادی یا نوارهایی از جنس پلاستیک، پلیمر یا صفحات ژئوسینتتیکی به‌صورت لایه‌لایه و موازی یک‌دیگر در میان محیط خاک قرار می‌گیرند. رابطهٔ میان تودهٔ خاک و مسلح کننده‌ها از طریق اصطکاک بین دانه‌های خاک و تسمه‌ها یا صفحات به‌وجود می‌آید. وجود این عناصر، از طرفی باعث زیاد شدن مقاومت کششی محیط خاک شده و از طرف دیگر بر خصوصیات تغییر شکلی محیط تأثیر می‌گذارد به‌گونه‌ای که در نهایت مجموعه‌ای پایدارتر با ظرفیت باربری بیش‌تر و قابلیت تغییر شکل امن‌تر تشکیل شود. در نتیجه با این فن می‌توان دیوارهای حایل بلند و خاک‌ریزهای با شیب تند یا ارتفاع زیاد را بنا نهاد.

هر چند تسمه‌ها و شبکه‌های فلزی در چند دههٔ پیش کاربرد وسیعی در تسلیح خاک داشته است اما پیشرفت علوم مهندسی پلیمر در دهه‌های اخیر، تسمه‌های پلیمری را که مزیت‌های بهتری نسبت به دیگر مسلح‌کننده‌ها دارند، به‌عنوان گزینه مناسبی مطرح کرده است که به‌دلیل انعطاف‌پذیر بودن تسمه‌ها و مقاومت زیاد آن‌ها می‌تواند رفتار خوبی در برابر زلزله داشته باشد زیرا تسمه‌های پلیمری نسبت به تسمه‌های فولادی انعطاف‌پذیرترند و در نتیجه استفاده از آن‌ها در ساخت دیوار خاک مسلح، تشکیل توده‌ای تغییرشکل‌پذیر می‌دهد. علاوه بر این استفاده روزافزون از این تکنولوژی جدید و جای‌گزینی این سیستم به‌جای سیستم‌های سنتی و رایج قبلی، لزوم شناخت صحیح رفتار این نوع سازه‌ها را روشن‌تر می‌سازد.

اساس تکنولوژی تسمه‌های پلیمری بر پایهٔ تزریق مواد پلیمری دور هسته الیاف بافته شده از جنس پلی‌استر است. مصالح ترکیبی حاصل، به‌شکل منسوج مسطح (تسمه) است. پوشش پلیمری این مصالح آن را در برابر عوامل مخرب فیزیکی و شیمیایی محیط اطراف محافظت می‌کند. نوع مصالح هسته و پوشش آن بر اساس نیازمندی‌های پروژه قابل انتخاب است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

قابلیت خوردگی نداشتن و زنگ‌زدگی، درگیری بهتر و یک‌پارچه‌تر با خاک، انعطاف‌پذیری، اندرکنش متعادل با مصالح خاک و سنگ و سهولت اجرا از جمله مزیت‌های این سیستم است.

نداشتن شناخت کافی از نحوهٔ رفتار سازه‌های خاکی مسلح‌شده با تسمه‌های پلیمری، ما را از طراحی مؤثر و صحیح دور نگه می‌دارد. با توجه به این‌که ایران در یکی از لرزه‌خیزترین نواحی جهان قرار گرفته، از این‌رو، درک عمل‌کرد مناسب دیوارها قبل از وقوع زلزله اهمیت زیادی دارد. از این‌رو، در این پژوهش رفتار دینامیکی دیوارهای حایل خاک مسلح بررسی می‌شود. در این راستا به‌بررسی تأثیر نحوهٔ اجرای تسمه‌های پلیمری و مقایسهٔ استفاده از تسمه‌های پلیمری و فلزی در تغییر مکان دیوار می‌پردازیم. در ادامه نیز اثر عواملی مانند طول مسلح کننده‌ها، بیشینهٔ شتاب موج ورودی و فرکانس موج ورودی بررسی می‌شود.

در تحقیقات مختلف رفتار دیوارهای خاک مسلح بررسی شده است. بتهرست و حاتمی (۱۹۹۸)، با استفاده از نرم‌افزار FLAC، تأثیر مشخصات مسلح کننده مانند طول و سختی و هم‌چنین قید پای‌دیوار بر پاسخ دینامیکی دیوار خاکی مسلح شده با ژئوسینتتیک‌ها را بررسی کردند [۱]، [۲]. نتایج آن‌ها حاوی این نکته بود که ماکزیمم نیرو در مسلح‌کننده‌ها برخلاف توصیهٔ آیین‌نامه آشتو [۳]، در ارتفاع تابعی خطی نیست.

وو و همکاران (۲۰۰۸)، گسیختگی دیواره خاک‌ریزهای ژئوسینتتیکی را بررسی کردند. در این تحقیق با استفاده از آزمایش بزرگ مقیاس برش مستقیم، مقاومت سطح مشترک اندازه‌گیری شده است. سپس پایداری و تغییر شکل ژئوممبرین با روش‌های عددی و تحلیلی بررسی شده است [٤].

زنگ و همکاران در سال ۲۰۰۹، با تحلیل عددی به مدل‌سازی اثر بارگذاری یک‌نواخت و سیکلی بر سطح مشترک بین ژئوتکستایل و خاک پرداخته‌اند. در تحقیقات آن‌ها از مدل خرابی الاستو پلاستیک برای مدل‌سازی رفتار سطح مشترک بین ژئوتکستایل و خاک استفاده شده است [۵].

هونگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود پاسخ دو دیوار خاکی بزرگ مقیاس که یکی با ژئوگرید پلیمری نسبتاً قابل انبساط و دیگری با شبکه مش جوش شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

نسبتاً سخت مدل‌سازی شده بود، در طول مدت ساخت و تحت سربار بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل سازی عددی با نرم‌افزار FLAC برای پیش‌بینی عمل‌کرد دیوار خاکی مسلح شده، برای مدل‌سازی خاک مسلح، سطح مشترک، شرایط مرزی و ... مناسب است [٦].

مشکل عمدهٔ تحلیل‌های دینامیکی زمان‌بر بودن آن‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای عددی است. هم‌چنین انتخاب شتاب‌نگاشت وارده به مدل بر نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی بسیار تأثیرگذار است. از این رو، مناسب‌ترین و ساده‌ترین راه حل، تعیین ضرایبی معادل است که به‌واسطه آن بتوان تغییر مکان‌های دیوار را از دو روش شبه استاتیکی و دینامیکی به یک‌دیگر هم‌گرا کرد تا با استفاده از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی که زمان بسیار کم‌تری نسبت به تحلیل‌های دینامیکی می‌گیرند، به طراحی نسبتاً دقیقی دست یافت.

با توجه به آن‌که روش شبه‌استاتیکی روی‌کردی مناسب و ساده برای معادل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی است، هدف اصلی این مقاله بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای حایل خاک مسلح شده با تسمه‌های پلیمری برمبنای روش عددی تفاضل محدود و ارائه روشی برای معادل‌سازی رفتار دینامیکی با پیشنهاد یک ضریب شبه استاتیکی معادل برای مدل است. این روند با در نظر گرفتن تغییر مکان دیوار نوان مبنای مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) را نتیجه می‌دهد.

مدل‌سازی عددی

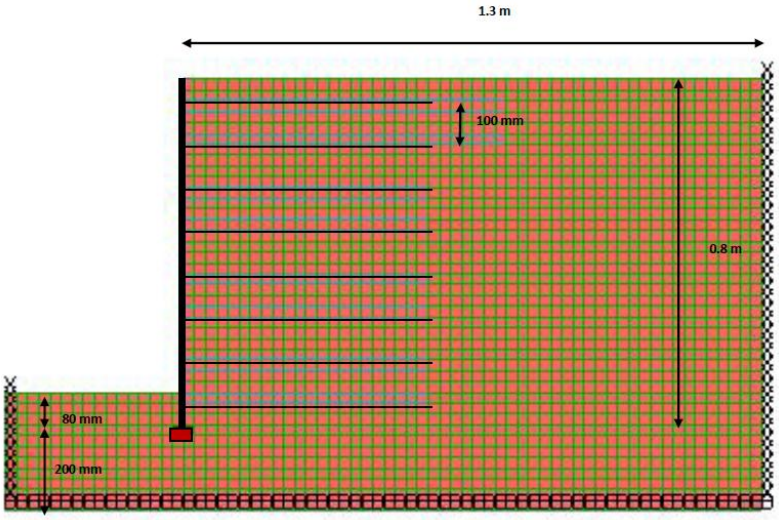
۱. مشخصات کلی

در تحقیق حاضر، مدل‌سازی بر مبنای روش عددی تفاضل محدود دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انجام شده است. بر این اساس مدل عددی آزمایش‌های میزلرزان انجام شده روی تسمه‌های پلیمری، ساخته شده و با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی کالیبره و صحت‌سنجی شده است. روند مدل‌سازی شامل ایجاد هندسه مدل، تعیین فراسنج‌های مصالح، اعمال شرایط مرزی و اولیه، تعادل استاتیکی، بارگذاری دینامیکی (اعمال شتاب نگاشت)، بارگذاری شبه استاتیکی (اعمال ضریب شتاب افقی معادل مدل) بوده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

۲. هندسه مدل

ابعاد مدل‌های عددی ساخته شده منطبق با مدل‌های فیزیکی در آزمایش‌های میزلرزان انتخاب شده‌اند. مدل‌سازی بر دیوارهایی با ارتفاعی مشابه با ارتفاع مدل‌های فیزیکی برابر با ۰/۸ متر درنظر گرفته شد که با در نظر گرفتن ضریب مقیاس N=۷/۵ معادل دیواری با ارتفاع ٦ متر است. هم‌چنین ضخامت فونداسیون برابر ۲۰۰ میلی‌متر است. بر اساس توصیهٔ آیین‌نامه FHWA [۷]. عمق گیرداری (عمق خاک‌ریزی در جلوی دیوار) در دیوار بزرگ مقیاس باید برابر ۰/٦ متر باشد که با اعمال ضریب مقیاس این مقدار برابر با ۸۰ میلی‌متر خواهد شد. در شکل ۱ نمای کلی مدل‌های ساخته شده با اجرای زیگزاکی، ابعاد کلی مدل و پی نشان داده شده است. چنان‌که قبلاً بیان شد در اجرای موازی مسلح کننده‌ها، تعداد لایه‌های مسلح کننده‌ها در ارتفاع دو برابر اجرای زیگزاکی است.



شکل ۱. نمای کلی مدل‌های ساخته شده در FLAC

۳. مصالح

خاک: به‌دلیل اندرکنش مناسب‌تر خاک‌های دانه‌ای و مسلح‌کننده‌ها نسبت به خاک‌های ریزدانه، معمولاً برای ساخت دیوارهای خاک مسلح از خاک‌های دانه‌ای استفاده می‌شود. خاک استفاده شده در ساخت مدل‌های عددی مشابه مدل‌های فیزیکی ماسه ۱٦۱ فیروزکوه است. از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

آن‌جاکه محققان پیشین این خاک را به‌عنوان خاک استاندارد معرفی کرده‌اند (بهادری و همکاران، صابر ماهانی، میرلطیفی) و دارای دانه‌بندی یک‌نواخت و مشابه ماسه تویورا ژاپن است برای انجام این تحقیق از آن استفاده شده است. این خاک که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده، برای مدل‌سازی خاک ناحیهٔ مسلح شده، خاک پشت دیوار و فونداسیون استفاده شده است. باید به این نکته توجه داشت که بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارها در مدل‌های عددی، در شرایط مشابه با مدل‌های آزمایشگاهی میزلرزه یعنی ساخت‌گاه تیپ ۲ انجام شده است. برای مدل‌سازی المان‌های خاک در پشت دیوار از مدل الاستوپلاستیک کامل مور- کولمب استفاده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات خاک ۱٦۱ فیروزکوه

نام	e_{min}	e_{max}	زاویه اصطکاک داخلی (°)		C_c	C_u	ماسه (%)	عبوری از الک ۲۰۰ (%)	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	Gs
SP	۰/۵۸٤	۰/۸۷٤	٤۰	۰/۸۸	۱/۸۷		۹۹	۱	۰/۳	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۱٦	۲/٦۵

مسلح‌کننده‌ها: رفتار دیوار خاک مسلح وابسته به نوع مسلح کننده‌های آن است. در این تحقیق از مسلح‌کننده تسمهٔ پلیمری استفاده شده است. دو روش اجرا برای استفاده مسلح‌کننده‌های پلیمری در خاک مسلح وجود دارد. اولین روش، روش اجرای زیگزاکی تسمه‌های پلیمری است که امروزه به‌صورت گسترده‌ای در اجرا استفاده می‌شود. روش دوم اجرای موازی مسلح‌کننده است که هر دوروش اجرا در شکل نشان داده شده‌اند. در روش اجرای زیگزاکی، مسلح‌کننده‌ها در هر لایه به‌صورت زیگزاکی اجرا می‌شوند و در مقایسه با تسمه‌های فلزی طول آن‌ها در هر لایه تقریباً دو برابر است، این در حالی است که تعداد لایه‌های آن‌ها در ارتفاع مشابه با تسمه‌های فلزی است. از سوی‌دیگر در روش اجرای موازی تسمه‌های پلیمری، طول تسمه‌ها در هر لایه مشابه با تسمه‌های فلزی است درحالی‌که تعداد لایه‌های اجرایی آن‌ها در ارتفاع نسبت به تسمه‌های فلزی دو برابر است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که مجموع طول مسلح‌کننده‌های پلیمری در هر دو روش اجرا تقریباً با هم برابر است و این مقدار دوبرابر میزان استفاده تسمه‌های فلزی در خاک مسلح در شرایط مشابه است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

تسمه‌ها در ترازهای از پیش تعیین‌شده (مشخص شده روی نما) در خاک قرار داده شده‌اند. در این نرم‌افزار از مدل الاستیک ـ پلاستیک کامل برای مدل‌سازی المان تسمه که در این‌جا به‌عنوان المان مسلح‌کننده‌ها انتخاب شده استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی عددی، مشخصات مسلح‌کننده‌ها باید به‌دقت انتخاب شوند. هم‌چنین اندرکنش بین خاک و مسلح‌کننده نیز در نتایج بسیار تأثیرگذار است. در این تحقیق این فراسنج‌ها با انجام آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی تسمه‌ها و کشش بر روی آن‌ها انتخاب شده‌اند. این آزمایش‌های به‌منظور انتخاب دقیق تسمه استفاده شده در آزمایش‌های میزلرزان انجام شده‌اند. فراسنج‌های دقیق مسلح‌کننده‌ها و فراسنج‌های اندرکنشی آن‌ها با خاک مورد نظر در جدول ۲ آورده شده‌اند.



a b

شکل ۲. روش‌های اجرای تسمه‌های پلیمری a) روش اجرای زیگزاکی b) روش اجرای موازی نما

پنل‌های نما با استفاده از المان تیر مدل‌سازی شده‌اند. در سازه‌های واقعی، بین پنل‌های دیوار با قطعات پلاستیکی پر می‌شود. به‌منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف بین پنل‌های بتنی برای جلوگیری از شکست پنل‌ها، در مدل‌سازی عددی ابعاد پنل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که فاصلهٔ بین آن‌ها در نظر گرفته شود. مشخصات کامل پنل‌های نما در جدول ۲ آمده است.

٤. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی

آن‌چه‌که در مدل‌سازی‌های دینامیکی اهمیت دارد انتخاب مرزهای کناری است. در این‌جا در شرایط استاتیکی ابتدا تکیه‌گاه‌های غلتکی که اجازه حرکت در راستای X را به المان نمی‌دهد و تنها در راستای گرانش حرکت دارند برای برآورد تنش برجای اولیه استفاده شد و سپس در آنالیز دینامیکی مرزهای آزاد جای‌گزین آن‌ها می‌شود. این عمل باعث می‌شود که ابتدا شرایط استاتیکی ارضا شده و مدل به پایداری برسد و سپس مرزهای آزاد جای‌گزین شود تا از برگشت امواج انعکاسی جلوگیری شده و محیطی واقعی‌تر مدل گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

جدول ۲. مشخصات مصالح استفاده شده در مدل‌سازی عددی

فونداسیون		خاک	
الاستو پلاستیک کامل مور- کولمب	مدل رفتاری	الاستو پلاستیک کامل مور- کولمب	مدل رفتاری
۱۷	وزن مخصوص خشک (KN/m^3)	۱٦/٥	وزن مخصوص خشک (KN/m^3)
۳۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۸	زاویه اتساع (درجه)	۸	زاویه اتساع (درجه)
۲۰۰۰	چسبندگی (pa)	۲۰۰۰	چسبندگی (pa)
۲٥	مدول الاستیسیته (MPa)	۲٥	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۳	نسبت پواسون	۰/۳	نسبت پواسون
فونداسیون بتنی زیر دیوار		**نما**	
الاستیک خطی	مدل رفتاری	الاستیک خطی	مدل رفتاری
۲٤	وزن مخصوص (KN/m^3)	تیر	نوع المان
۲۰	مدول الاستیسیته (GPa)	۲٤	وزن مخصوص (KN/m^3)
۰/۲	نسبت پواسون	۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۰۲	ارتفاع (m)	۰/۲	ارتفاع (m)
۰/۰٤	عرض (m)	۰/۰۲	عرض (m)

مسلح کننده	
تسمه پلیمری	نام
الاستیک خطی	مدل رفتاری
تسمه	نوع المان
۰/۸	عرض محاسباتی (m)
۸ (چیدمان موازی)	تعداد تسمه‌ها در عرض محاسباتی
۱٦ (چیدمان زیگزاکی)	
۱۲	عرض تسمه (mm)
۰/۸	ضخامت تسمه (mm)
۲/۲۳	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۷/٦	محدوده نیروی تسلیم کششی (kN)
ناچیز	محدوده نیروی تسلیم فشاری
٪۱۲	درصد کرنش تسمه در هنگام گسیختگی کششی

مشخصات سطح مشترک خاک / مسلح کننده	
کولمب	مدل رفتاری
۱/٤٥	ضریب اصطکاک ظاهری اولیه در سطح مشترک خاک و تسمه "f^*0"
۰/۷۸	کمینه ضریب اصطکاک ظاهری در سطح مشترک خاک و تسمه "f^*1"
$۸/۹۷\times۱۰^{٤}$	سختی برشی در سطح مشترک خاک و تسمه ($MN/m^2/m$)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

۵. بارگذاری دینامیکی

در بارگذاری سیستم دو هدف عمده در نظر گرفته شد. اول آن‌که بارگذاری باید شبیه واقعیت باشد به‌طوری‌که به‌تدریج بر دامنهٔ آن افزوده و دو باره کاهش یابد تا بتواند مدل مناسبی از شتاب‌نگاشت‌هایی که در حین زلزله تولید می‌شود، باشد. در عین حالی‌که خصوصیت فوق را دارد، فراسنج‌های اساسی زلزله داشته باشد تا ساده و قابل کنترل باشد و بتوان به‌راحتی آن‌ها را تغییر داد.

با توجه به اهداف فوق، شتاب‌نگاشتی که با رابطهٔ (۱) معرفی می‌شود به‌عنوان تابع بارگذاری انتخاب شد که پیش از این نیز محققان مختلف مانند حاتمی و بتهرست [۸] استفاده کرده‌اند.

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{\beta . e^{-\alpha t} . t^{\zeta}} . Sin(2\pi . f . t) \qquad (۱)$$

این نوع بارگذاری هر دو خصیصه مذکور را دارد و دو فراسنج مهم دارد. دامنهٔ شتاب که با زمان تغییر می‌کند و در حدود ۰/۵ ثانیه در مقدار حداکثر خود قرار می‌گیرد و دوم فرکانس که مقدار ثابتی دارد. در این تحقیق موج‌هایی با شتاب حداکثری برابر با ۰/٤g، ۰/٦g و ۰/۸g به مدل‌ها اعمال شده‌اند. هم‌چنین با توجه به این نکته که فرکانس غالب بیش‌تر زلزله‌ها بین یک تا سه هرتز است و با توجه به ضریب مقیاس انتخابی و آنالیز ابعادی انجام شده، فرکانس وارده به مدل‌ها باید بین ٤/۵ تا ۱۳/٦ باشد که فرکانس ۵، ۷ و ۱۰ هرتز برای اعمال به مدل‌ها انتخاب شد.

به‌صورت کلی می‌توان گفت که تغییر مکان‌های ایجاد شده در سازهٔ خاک مسلح رابطهٔ خوبی با فراسنج CAV دارند. فراسنج CAV غالباً رابطهٔ مستقیمی با بزرگا دارد و به‌منظور برآورد خسارت حاصل از زلزله استفاده می‌شود که بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$CAV = \int_o^t |a(t)| dt \qquad (۲)$$

که در آن a(t) تغییرات شتاب در برابر زمان است.

مشخصات موج‌های اعمالی به مدل‌های عددی در جدول ۳ آمده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

جدول ۳. مشخصات موج‌های اعمال شده

شماره موج	a_{max}/g	زمان (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	CAV (m/s)
۱	۰/٤	۸	۵	٦/۵٤
۲	۰/٤	۸	۷	۷/۷۰
۳	۰/٤	۸	۱۰	۹/۸٤
٤	۰/٦	۱۲	۵	۱۲/۷٦
۵	۰/۸	۱٤	۵	۲۰/۷۷

٦. میرایی

در این تحقیق میرایی از نوع میرایی رایلی در نظر گرفته شده است. این نوع میرایی عموماً برای خاک با مشخصات پلاستیک لحاظ می‌شود و نیازمند دو فراسنج ضریب میرایی و حوزهٔ فرکانس مؤثر است تا با بهره‌گیری از آن دو ضریب ماتریس میرایی و جرم انتخاب شود. برای رسیدن به حوزهٔ فرکانس مؤثر نیاز به تعیین فرکانس ارتعاش‌های طبیعی دیوار است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

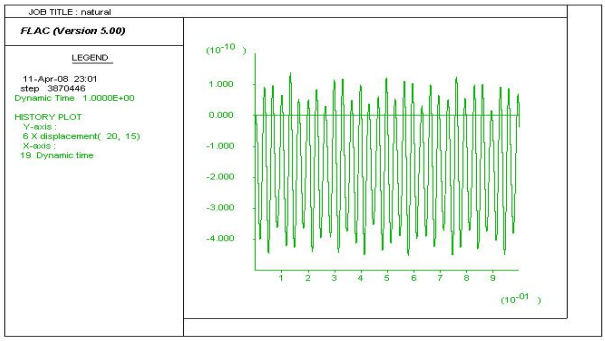
۷. فرکانس ارتعاشات طبیعی دیوار

یکی از گام‌های ضروری در طراحی لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح و دیوارهای معمولی، تعیین فرکانس ارتعاش‌های طبیعی آن‌ها است. پژوهش‌های عددی در مورد دیوارهای خاک مسلح نشان داده است که دورهٔ ارتعاش‌های طبیعی این نوع دیوارها متاثر از سختی مسلح‌کننده‌ها، طول مسلح‌کننده‌ها و یا شرایط مرزی پنجه دیوارها نیست. هم‌چنین مقاومت خاک دانه‌ای خاک‌ریز پشت که با استفاده از زاویهٔ اصطکاک داخلی بیان می‌شود نیز تأثیر چشم‌گیری در دورهٔ ارتعاش‌های طبیعی این نوع دیوارها نخواهد داشت [۸].

باتوجه به همهٔ موارد مذکور می‌توان نتیجه گرفت که تغییر فراسنج‌های مدل در آزمایش‌های مختلف تأثیری در تغییر دورهٔ ارتعاش‌های طبیعی دیوار ندارد. پس از ساخت یک نمونه دیوار با مشخصات فوق در نرم‌افزار FLAC به‌منظور به‌دست آوردن فرکانس طبیعی سازه، سازه بدون میرایی و بارگذاری خارجی، تحت وزن خود، به‌مدت یک ثانیه تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته است. سپس با کنترل تغییر مکان در نقطه‌ای از سازه، تعداد سیکل‌های رفت و برگشت در مدت یک ثانیه به‌دست آمده و برابر با فرکانس طبیعی سازه می‌شود. در شکل ۳ نتیجهٔ این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

تحلیل نشان داده شده است. بر این اساس فرکانس طبیعی دیوار حدود ۳۰ هرتز به‌دست آمده است.



شکل ۳. تعیین فرکانس غالب در پروتوتیپ

۸. مدل‌های مختلف تحلیل

مدل‌های مختلف تحلیل برای شرایط استاتیکی، دینامیکی و شبه استاتیکی در جدول ٤ آورده شده‌اند.

صحت‌سنجی مدل

در مدل‌سازی عددی، مهم آن است که در ابتدا از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل کرد. بدین‌منظور از آزمایش‌های میزلرزان انجام شده بر دیوار حایل خاکی مسلح شده با تسمه‌های پلیمری استفاده شده است. همهٔ آزمایش‌ها در مرکز مدل‌سازی فیزیکی و سانتریفیوژ دانشگاه تهران انجام شده است. میز دارای ابعاد ۱/۲ متر در ۱/۸ متر با یک درجهٔ آزادی است. مدل‌های فیزیکی در درون جعبه‌ای شفاف و از جنس پلکسی گلاس با عرض ۰/۸ متر، طول ۱/۸۲ متر و ارتفاع ۱/۲۳ متر ساخته شده‌اند. از آن‌جا که همهٔ مدل‌های عددی از روی مدل‌های کوچک مقیاس فیزیکی ساخته شده‌اند، همهٔ ابعاد مدل فیزیکی مطابق با مدل‌های عددی هستند. برای محاسبهٔ تغییر شکل نما، LVDTها روی یک ستون صلب نصب شده بودند تا تغییر مکان چهار نقطه از بالا تا پایین نمای دیوار مشخص شود. برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی از دو آزمایش میزلرزان استفاده شده که مشخصات آن‌ها در جدول ۵ آمده است. هم‌چنین نتایج مقایسه‌ای تغییرمکان افقی دیوار بین مدل‌سازی فیزیکی و عددی در شکل‌های ٤ و ۵ نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل‌ها پیداست، نتایج تطابق خوبی با هم نشان می‌دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

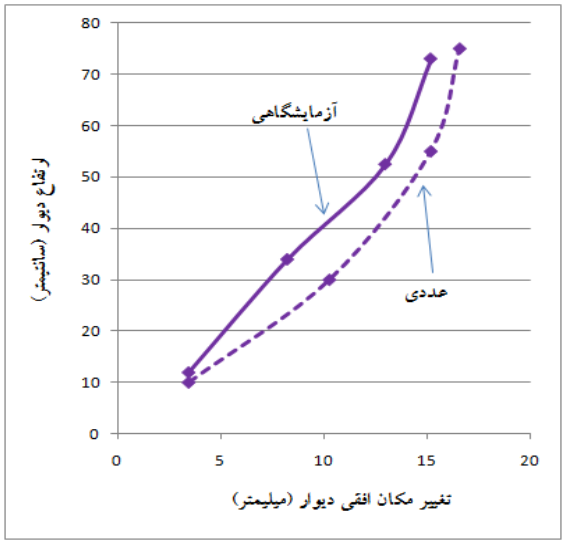
جدول ٤. مشخصات مدل‌های عددی

ردیف	نام مدل	طول			چیدمان مسلح کننده‌ها	شماره موج
		لایه‌های پایینی (۳ لایه)	لایه‌های میانی (۳ لایه)	لایه‌های بالایی (۲ لایه)		
۱	7-9-p-wa1	۰/۷ H		۰/۹ H	موازی	۱
۲	5-7-9-p-wa1	۰/۵ H	۰/۷ H	۰/۹ H	موازی	۱
۳	7-p-wa1		۰/۷ H		موازی	۱
٤	7-p-wa3		۰/۷ H		موازی	۳
۵	7-9-p-wa3	۰/۷ H		۰/۹ H	موازی	۳
٦	7-9-p-wa5	۰/۷ H		۰/۹ H	موازی	۵
۷	5-7-9-p-wa5	۰/۵ H	۰/۷ H	۰/۹ H	موازی	۵
۸	7-9-p-wa2	۰/۷ H		۰/۹ H	موازی	۲
۹	7-9-p-wa4	۰/۷ H		۰/۹ H	موازی	٤
۱۰	7-9-z-wa1	۰/۷ H		۰/۹ H	زیگزاکی	۱
۱۱	5-7-9-z-wa1	۰/۵ H	۰/۷ H	۰/۹ H	زیگزاکی	۱
۱۲	7-z-wa1		۰/۷ H		زیگزاکی	۱
۱۳	7-9-z-wa3	۰/۷ H		۰/۹ H	زیگزاکی	۳
۱٤	7-9-z-wa5	۰/۷ H		۰/۹ H	زیگزاکی	۵
۱۵	5-7-9-z-wa5	۰/۵ H	۰/۷ H	۰/۹ H	زیگزاکی	۵
۱٦	7-9-z-wa2	۰/۷ H		۰/۹ H	زیگزاکی	۲
۱۷	7-9-z-wa4	۰/۷ H		۰/۹ H	زیگزاکی	٤

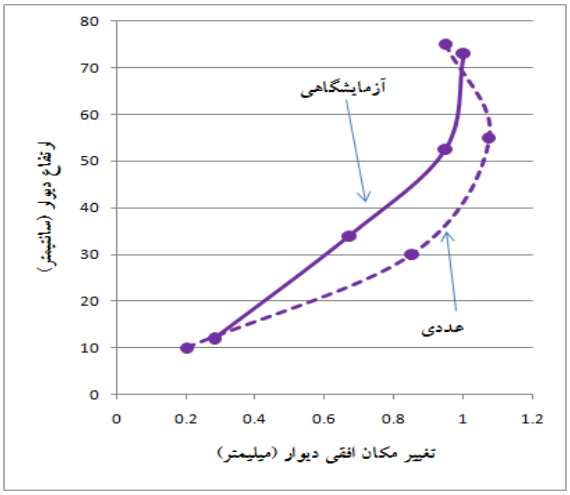
جدول ۵. مشخصات مدل‌های استفاده شده در صحت‌سنجی

نام مدل		7-p-wa1	5-7-9-p-wa5
طول مسلح کننده‌ها	لایه‌های پایینی (۳ لایه)	۰/۷ H	۰/۵ H
	لایه‌های میانی (۳ لایه)		۰/۷ H
	لایه‌های بالایی (۲ لایه)		۰/۹ H
چیدمان مسلح کننده‌ها		موازی	موازی
شماره موج		۱	۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]



شکل ٤. مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی در دیوار 5-7-9-p-wa5



شکل ٥. مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی در دیوار 7-p-wa1

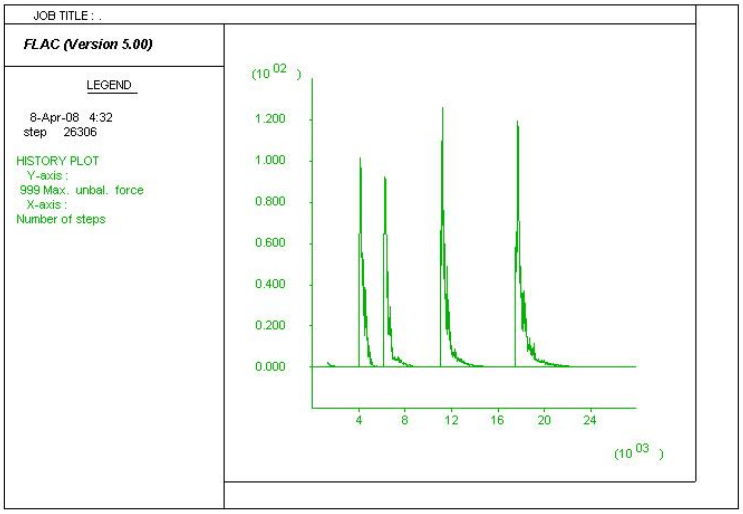
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

نتایج آنالیزهای دینامیکی

مدل‌های استاتیکی به‌صورت مرحله به‌مرحله ساخته شده و در پایان هر مرحله به تعادل رسیده‌اند. تاریخچهٔ نیروهای نامتعادل‌شونده در ساخت مرحله‌ای مدل در شکل ٦ نشان داده شده است. هم‌چنین تغییر مکان کلی دیوار ساخته شده در حالت استاتیکی در شکل ۷ آمده است.

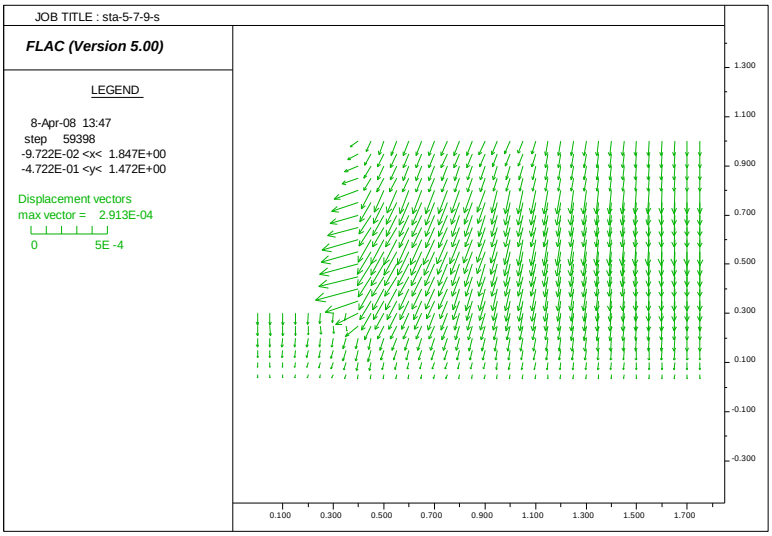
آنالیزهای دینامیکی بعد از اتمام مرحلهٔ استاتیکی و صفر شدن نیروهای نامتعادل شونده و به تعادل رسیدن سیستم آغاز شده‌اند. هر آنالیز حدود ۸۰ ساعت به‌طول انجامیده است. در این مرحله تأثیر نحوهٔ چیدمان تسمه‌های پلیمری و مقایسهٔ اثر استفاده از تسمه‌های فلزی و پلیمری بر تغییر مکان دیوار بررسی شده است. هم‌چنین اثر طول مسلح‌کننده‌ها، بیشینهٔ شتاب و فرکانس موج ورودی بررسی شده است.

در آنالیزهای شبه استاتیکی سعی شده تا با اعمال یک ضریب افقی معادل به‌مدل عددی (پس از به تعادل رسیدن مدل)، تغییر مکان‌های دیوار در حالت دینامیکی و شبه‌استاتیکی به یک‌دیگر نزدیک شوند. با توجه به زمان‌بر بودن تحلیل‌های دینامیکی استفاده از این ضرایب در کاهش زمان تحلیل بسیار تأثیرگذار است.



شکل ٦. تاریخچهٔ نیروهای نامتعادل‌شونده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]



شکل ۷.تغییر مکان کلی دیوار بعد از تحلیل استاتیکی

۱. تأثیر نحوهٔ اجرای تسمه‌های پلیمری

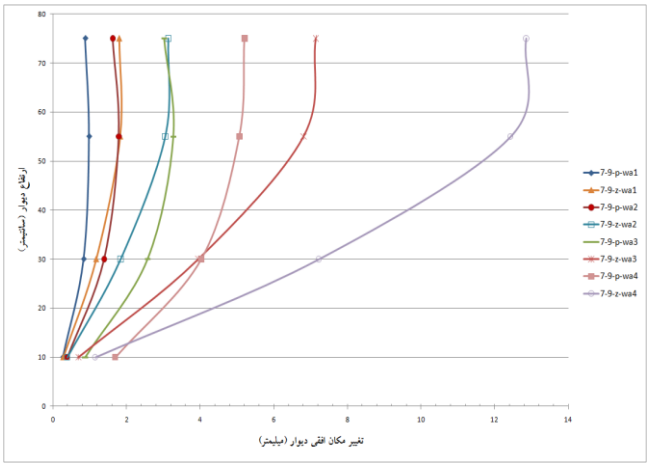
این تأثیر با مدل‌سازی تسمه‌های پلیمری به‌صورت زیگزاک و موازی در مدل‌های مختلف بررسی شده و نتایج آن در شکل ۸ آمده است. نتایج بیان‌گر این نکته است که نحوهٔ اجرای تسمه‌های پلیمری تأثیر به‌سزایی بر تغییر مکان دیوار دارد. اجرای زیگزاکی تسمه‌ها، تغییر مکان دیوار را پس از اعمال موج ۱، به بیش از دو برابر افزایش داده است. چنان‌که از این شکل پیداست اجرای موازی مسلح کننده‌ها در کاهش تغییر مکان دیوار پس از اعمال موج‌های قوی‌تر محسوس‌تر است. بنا بر این اجرای موازی تسمه‌های پلیمری نسبت به اجرای زیگزاکی آن‌ها بسیار مناسب‌تر است.

۲. تأثیر طول مسلح‌کننده‌ها

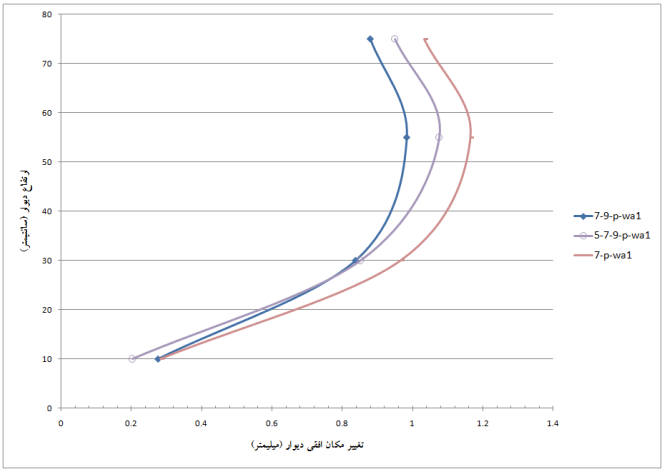
نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه دیوارهای p-7 و p-9-7-5 نشان می‌دهد که کاهش طول مسلح‌کننده‌ها در لایه‌های پایینی دیوار و افزایش آن در لایه‌های بالایی در بهبود رفتار دیوار مؤثر است. باید توجه کرد که هر دو دیوار در مجموع طول مسلح‌کننده‌ها تقریباً با هم برابرند. هم‌چنین با مقایسه دیوارهای p-9-7-5 و p-7-9 می‌توان مشاهده کرد که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

بهترین عمل‌کرد متعلق به دیوار با طول بیش‌تر مسلح‌کننده بوده است. در دیوارهای با اجرای زیگزاکی تغییر در طول مسلح‌کننده‌ها در لایه‌های بالایی و پایینی دیوار تأثیر ناچیزی بر تغییر مکان دیوار داشته است.



شکل ۸. تأثیر نحوهٔاجرای تسمه‌های پلیمری بر تغییر مکان دیوار



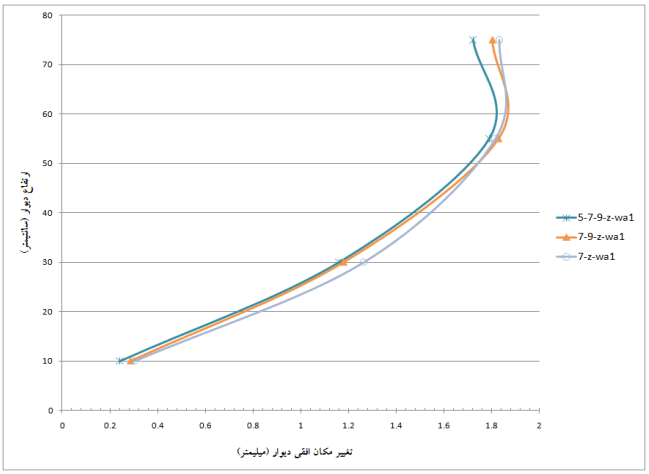
شکل۹. تأثیرطول تسمه بر تغییر مکان دیوارهای مسلح شده با تسمه‌های پلیمری با اجرای موازی

۳. تأثیر بیشینه شتاب ورودی

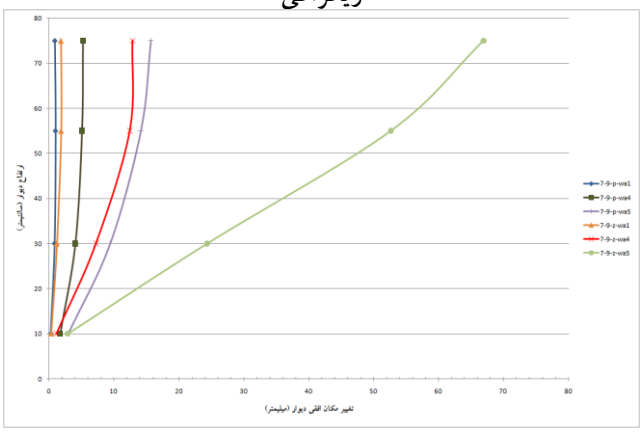
با مقایسهٔ نتایج (شکل ۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که شتاب ورودی بیش‌ترین تأثیر را در تغییرمکان دیوار خواهد داشت. با افزایش بیشینهٔ شتاب ورودی از ۰/٤g به ۰/٦g تغییرمکان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

دیوار حدود ۲ تا ۳ برابر شده است. هم‌چنین با افزایش شتاب از ۰/٦g به ۰/۸g تغییرمکان دیوار ۵ تا ۸ برابر شده است. بنا بر این تغییر مکان دیوار رابطه‌ای غیرخطی با بیشینه شتاب دارد.



شکل ۱۰. تأثیر طول تسمه بر تغییر مکان دیوارهای مسلح شده با تسمه‌های پلیمری با اجرای زیگزاکی



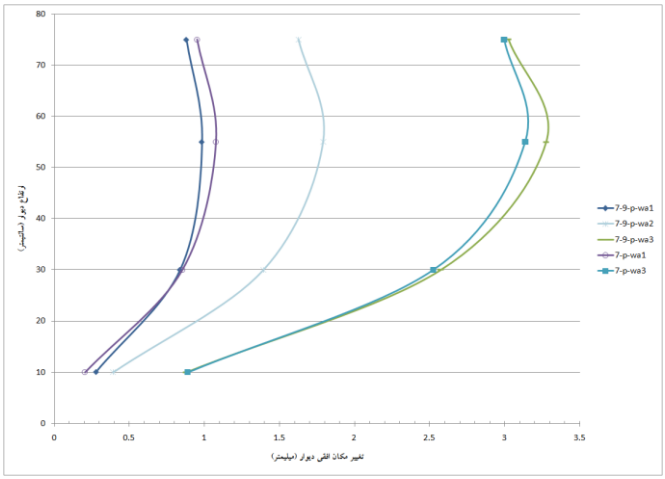
شکل۱۱. تأثیر بیشینه شتاب موج ورودی بر تغییر مکان دیوار

٤. تأثیر فرکانس

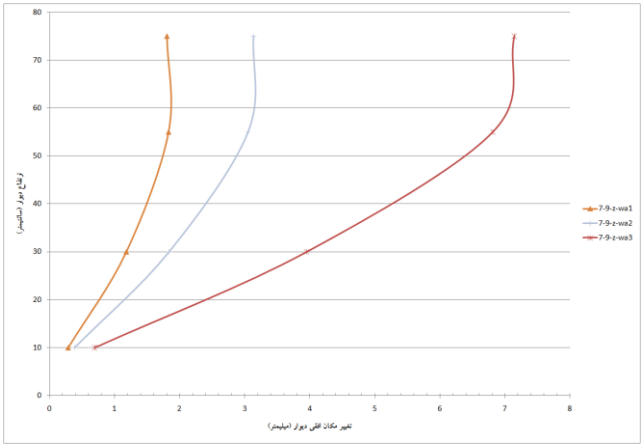
نتایج این قسمت در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آمده است. نتایج بیان‌گر این نکته است که افزایش فرکانس تغییر مکان دیوار را افزایش داده است. افزایش فرکانس از ۵ به ۷ هرتز تغییر مکان را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

تا ۲ برابر افزایش داده است. برای افزایش فرکانس از ۷ به ۱۰ هرتز این افزایش برابر ۲/۵ برابر است.



شکل ۱۲. تأثیر فرکانس موج ورودی بر تغییرمکان دیوارهای مسلح شده با تسمه‌های پلیمری با اجرای موازی



شکل ۱۳. تأثیرفرکانس موج ورودی بر تغییر مکان دیوارهای مسلح شده با تسمه‌های پلیمری با اجرای زیگزاکی

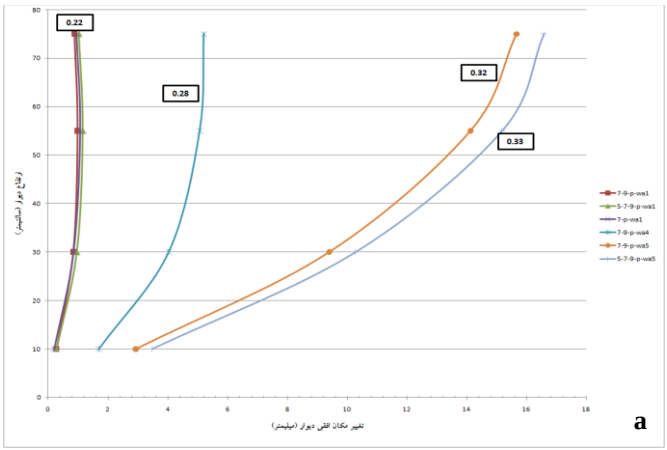
تحلیل‌های شبه استاتیکی

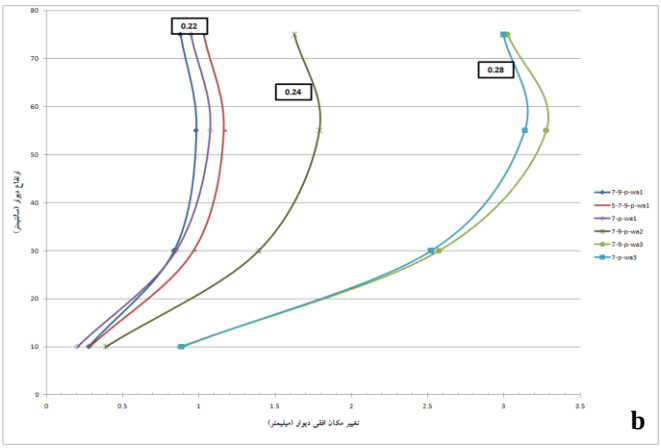
پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی و به‌دست آوردن تغییرمکان دیوار در حالت‌های مختلف، با انجام

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

تحلیل‌های شبه‌استاتیکی به‌روش تفاضل محدود با نرم‌افزار FLAC و با اعمال ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h)، سعی در به‌دست آوردن تغییر مکان‌هایی متناظر با نتایج بخش قبل برای هر مدل گردید.

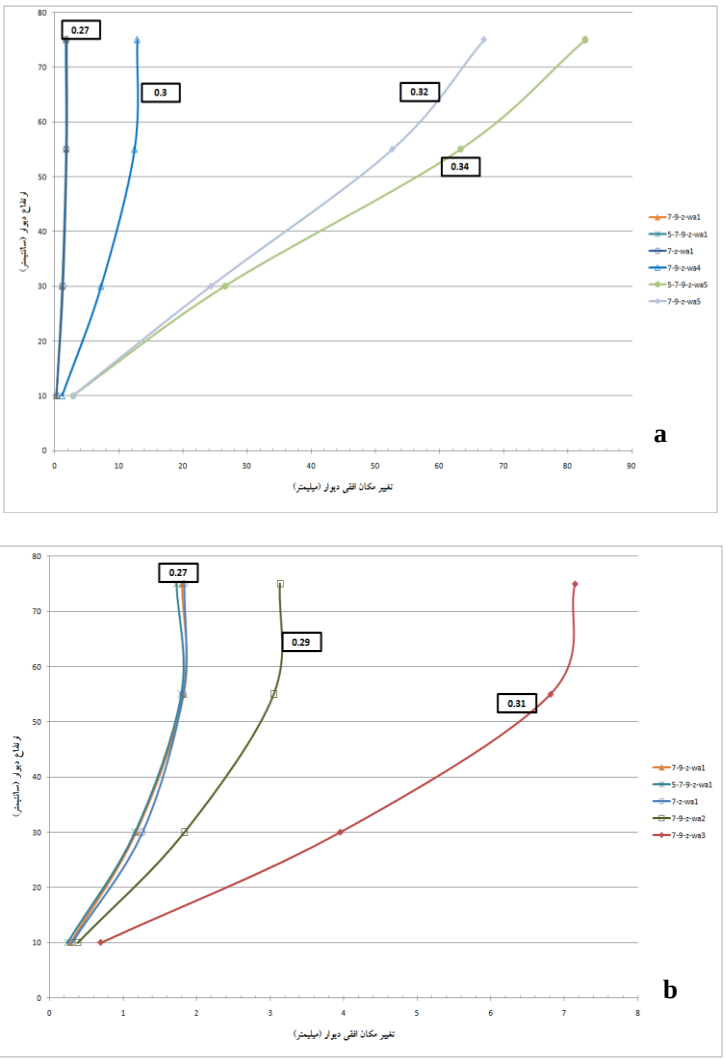
نتایج تحلیل‌های شبه‌استاتیکی و ضرایب k'_h متناظر ارائه شده برای هر مدل در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی، ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای هر مدل را می‌توان در جدول ٦ خلاصه کرد. نتایج، محدودهٔ تغییرات ضریب شتاب افقی معادل برای مدل را بین ۰/۲۲ تا ۰/۳۴ نشان می‌دهد.





شکل ۱۴. محدودهٔ تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای خاک مسلح‌شده با اجرای موازی تسمه‌های پلیمری، a) اثر تغییر بیشینهٔ شتاب موج ورودی، b) اثر تغییر فرکانس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]



شکل ۱۵. محدودهٔ تغییرات ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل (k'_h) در دیوارهای خاک مسلح شده با اجرای زیگزاکی تسمه‌های پلیمری، a) اثر تغییر بیشینهٔ شتاب موج ورودی، b) اثر تغییر فرکانس

چنان‌که انتظار می‌رود ضریب افقی معادل زلزله با بیشینه شتاب در ارتباط مستقیم است، یعنی با افزایش شتاب بیشینه زلزله، مقدار این ضریب در دیوارهای مشابه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

علاوه بر این مشاهده می‌شود که ضریب مذکور، تابعی از فرکانس موج ورودی و نوع مسلح‌کننده نیز است.

در نهایت، بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ٦، مشابه روند تحلیل شبه استاتیکی شیروانی‌های خاکی، می‌توان با استفاده از آنالیز معکوس رابطهٔ (۳) را برای تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پیشنهاد کرد:

$$k'_h = \beta \sqrt{\frac{a_{max}}{g}} \left(\frac{f}{f_n}\right)^{0.3} \quad (۳)$$

در رابطهٔ مذکور a_{max} بیشینهٔ شتاب زلزله ،g شتاب ثقل و f فرکانس بارگذاری و f_n فرکانس پایه سیستم هستند. ضریب β برای انواع اجرای مسلح‌کننده‌ها ی پلیمری بدین‌صورت پیشنهاد می‌شود:

برای تسمه‌های پلیمری با اجرای موازی:

$$\beta = ۰/۵۹$$

برای تسمه‌های پلیمری با اجرای زیگزاکی:

$$\beta = ۰/٦٦$$

چنان‌که در بخش بارگذاری دینامیکی آورده شده است، رابطهٔ مذکور در محدودهٔ فرکانس ۵ تا ۱۰ هرتز برقرار است.

نتیجه‌گیری

با توجه به آنالیزهای دینامیکی و شبه‌استاتیکی انجام شده، خلاصه نتایج به‌دست آمده بدین‌شرح است:

- نحوهٔ اجرای تسمه‌های پلیمری تأثیر به‌سزایی بر تغییر مکان دیوار دارد. اجرای موازی تسمه‌های پلیمری نسبت به اجرای زیگزاکی آن‌ها بسیار مناسب‌تر است و تغییر مکان‌های دیوار را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد.

جدول ٦. محدودهٔ ضرایب شتاب افقی معادل زلزله برای هر مدل

نام مدل	a_{max}/g	فرکانس	k'_h

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

			(هرتز)
7-9-p-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۲
5-7-9-p-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۲
7-p-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۲
7-p-wa3	۰/٤	۱۰	۰/۲۸
7-9-p-wa3	۰/٤	۱۰	۰/۲۸
7-9-p-wa5	۰/۸	۵	۰/۳۲
5-7-9-p-wa5	۰/۸	۵	۰/۳۳
7-9-p-wa2	۰/٤	۷	۰/۲٤
7-9-p-wa4	۰/٦	۵	۰/۲۸
7-9-z-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۷
5-7-9-z-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۷
7-z-wa1	۰/٤	۵	۰/۲۷
7-9-z-wa3	۰/٤	۱۰	۰/۳۱
7-9-z-wa5	۰/۸	۵	۰/۳۲
5-7-9-z-wa5	۰/۸	۵	۰/۳٤
7-9-z-wa2	۰/٤	۷	۰/۲۹
7-9-z-wa4	۰/٦	۵	۰/۳

- با افزایش بیشینهٔ شتاب ورودی از ۰/٤g به ۰/٦g تغییر مکان دیوار حدود ۲ تا ۳ برابر شده است. هم‌چنین با افزایش شتاب از ۰/٦g به ۰/۸g تغییر مکان دیوار ۵ تا ۸ برابر شده است. بنا بر این تغییر مکان دیوار رابطه‌ای غیرخطی با بیشینهٔ شتاب دارد.
- افزایش فرکانس به همراه افزایش سرعت مطلق تجمعی، تغییر مکان دیوار را افزایش داده است. افزایش فرکانس از ۵ به ۷ هرتز تغییر مکان را تا ۲ برابر و با افزایش فرکانس از ۷ به ۱۰ هرتز تا ۲/۵ برابر افزایش داده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

محدودهٔ تغییرات ضریب شتاب افقی معادل برای مدل بین ۰/۲۲ تا ۰/۳۴ به‌دست آمده است. چنان‌که انتظار می‌رود ضریب افقی معادل زلزله با بیشینهٔ شتاب در ارتباط مستقیم است، یعنی با افزایش شتاب بیشینه زلزله، مقدار این ضریب در دیوارهای مشابه افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که ضریب مذکور، تابعی از فرکانس موج ورودی و نوع مسلح‌کننده نیز هست.

- رابطهٔ زیر را می‌توان برای تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل پیشنهاد کرد:

$$k'_h = \beta \sqrt{\frac{a_{max}}{g}} \left(\frac{f}{f_n}\right)^{0.3}$$

منابع

1. Bathurst R.J., Hatami K., "Influence of Reinforcement Stiffness, Length and Base Condition on Seismic Response of Geosynthetic Reinforced Soil Walls", Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics, USA (1998) 613-616.
2. Bathurst, R.J., Hatami K., "Seismic Response of a Geosyntetic-Reinforced Soil Retaining Wall", Geosynthetics International, Vol.5 (1-2) (1998) 127-166
3. AASHTO, Interims: Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA (1998).
4. Wu W., Wang X.T., Aschauer F., "Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir", Geotextiles and Geomembranes, Vol.26 (2008) 363-370.
5. Ga Zhang, Liping Wang, Jian-Min Zhang, "Monotonic and cyclic modeling of interface between geotextile and gravelly soil",

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]

INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS IN GEOMECHANICS, DOI: 10.1002/nag (2009).

6. Bingquan Huang, Richard J., Bathurst, Kianoosh Hatami, M.ASCE., "Numerical Study of Reinforced Soil Segmental Walls Using Three Different Constitutive Soil Models", JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING , ASCE, Vol. 135, No. 10 (2009).
7. FHWA, "Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes- Volume I. Federal Highway Administration and National Highway Institute", Washington DC. FHWA NHI-10-024 (2009).
8. Hatami K., Bathurst R.J., "Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000)137-157.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.5.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3151]