بررسی عددی مودهای تغییرشکل لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح

*علی فرهادی؛ دانشگاه خوارزمی
علی فاخر؛ دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تهران
حمید زارع؛ دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

تاریخ: دریافت ۹۰/۱۰/۳ **پذیرش** ۹۱/۱۰/۱۱

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود، رفتار لرزه‌ای دیوارهای خاک مسلح و ارزیابی پاسخ دینامیکی آن‌ها، با تکیه بر مشاهدهٔ انواع مودهای تغییر شکل و تشخیص ساز و کارهای مختلف گسیختگی و شناسایی متغیرهای مؤثر در شکل‌گیری هر یک از مودها و ساز و کارها بررسی شده است. جزئیات مدل‌سازی عددی، مدل‌های رفتاری و مشخصات مصالح تشریح و پاسخ دینامیکی مدل با مدل فیزیکی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. بر روی دیواری به ارتفاع ۵ متر توسط پارامترهای مؤثر مانند سختی، نسبت طول به ارتفاع، فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده و ارتفاع دیوار از نظر پارامتریک بررسی شده است که دو نوع مود تغییرشکل مشاهده شد. این بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از مسلح‌کننده‌های انعطاف‌پذیر مود تغییر شکل را به‌سمت تغییر شکل شکمی[1] و مسلح کننده‌های سخت‌تر را به‌سمت تغییر شکل واژگونی[2] سوق می‌دهد. سختی مسلح کننده‌ها به‌عنوان مؤثرترین متغیر و نسبت طول به ارتفاع مسلح‌کننده به‌عنوان کم اثرترین متغیر، در تغییر نوع تغییر شکل نمای دیوارها بوده است.

واژه‌های کلیدی: دیوار خاک مسلح، مود تغییرشکل، رفتار لرزه‌ای، روش عددی

*نویسنده مسئول farhadi@tmu.ac.ir

۱. Bulging ۲. Overturning

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

مقدمه

ابداع سیستم خاک‌مسلح در دهۀ ٦٠ میلادی و توسعۀ روزافزون آن، فصل جدیدی در مباحث مکانیک خاک گشود. ورود زمین مصنوع‌های پلیمری[۱] در اواخر دهۀ ۷۰ میلادی به‌عنوان جای‌گزین نوارهای فلزی در نسل اول سیستم‌های خاک‌مسلح و به‌دنبال آن استفاده روزافزون باعث شد تا بحث رفتار سازه‌های خاکی مسلح یکی از مباحث روز جامع علمی و موضوع تحقیق بسیاری از محققان شود. این سازه‌ها عمل‌کرد بسیار خوبی در حین زلزله‌ها نشان داده‌اند، ولی کاف نبودن پاسخ این سازه‌ها در برابر زلزله موجب شده است طراحان برای دوری از خطر گسیختگی، تمایل به استفاده از فرضیات محافظه‌کارانه‌ای پیدا کنند که این امر منجر به ارائه طرح‌های غیراقتصادی می‌شود. بنا بر این فهم درست پاسخ شیروانی‌ها و دیوارهای خاکی مسلح می‌تواند منجر به ارائه یک طرح ایمن و در عین حال بهینه و اقتصادی شود.

روش‌های تحلیلی موجود برای محاسبۀ تغییر مکان دیوارها، با فرض کل دیوار به‌عنوان بلوک صلب و محاسبۀ لغزش دیوار بر مبنای توسعۀ روش بلوک لغزنده نیومارک، تنها عددی واحد به‌عنوان مقدار تغییرشکل دیوار در شرایط زلزله ارائه می‌کند. به همین منظور، بنظر می‌رسد در صورتی‌که بتوان مودهای مختلف تغییر شکل را که بیان‌گر تفاوت مقدار تغییرشکل جانبی در ارتفاع دیوار است و هم‌چنین عوامل مؤثر در شکل‌گیری هر یک از مودهای تغییرشکلی را شناسایی کرد، امکان تکمیل الگوریتم محاسبۀ تحلیلی تغییرشکل‌ها به‌روش نیومارک فراهم شود.

محققان مختلف عمل‌کرد دیوارهای خاک‌مسلح در مدل‌های آزمایشگاهی مثل میزمایل، میزلرزه و سانتریفوژ را بررسی کرده‌اند. از جمله واگنرون[۲] و آدام[۳] (۱۹۷۲) اولین پژوهش‌*ای* لرزه‌ای را بر روی سازه‌های مسلح شده خاکی انجام دادند. ریچاردسون[٤] و لی[٥] (۱۹۷۵) با استفاده از میز لرزه آزمایش‌های متعددی برای شناسایی مکانیسم گسیختگی داخلی دیوارهای مسلح خاکی انجام دادند، سپس کوزکی[٦] و همکاران (۱۹۹۸) برای مقایسۀ رفتار دیوار نگهبان با میز لرزه آزمایش‌هایی را انجام دادند که نتایج آزمایش‌ها حاکی از وابستگی تغییرشکل‌های

۱. Geosynthetics ۲. Vagneron ۳. Adam ٤. Richardson
٥. Lee ٦. Koseki

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

به‌وقوع پیوسته در این دیوارها به‌نوع نما هستند. بترست[۱] و همکاران (۲۰۰۲) برای شرایط مرزی و تکیه‌گاهی دیوارها به‌ویژه برای وجود داشتن یا وجود نداشتن ریشه یا عمق مدفون در دیوارها بررسی کردند. لینگ[۲] و همکاران (۲۰۰۵) بزرگ‌ترین آزمایش میزلرزه را روی دیوار خاک مسلح با نمای بلوک‌های مدولار انجام داد که مود اصلی تغییرمکان در همهٔ دیوارها واژگونی بوده است. لاتا[۳] و کریشنا[٤] (۲۰۰۸) اثر تراکم نسبی خاک‌ریز پشت بر روی رفتار لرزه‌ای دیوار خاک مسلح را بررسی کردند که پروفیل تغییرمکان جانبی دیوار به‌صورت واژگونی است. لینگ و لچنسکی (۲۰۱۰) چهار نمونهٔ آزمایشگاهی با استفاده از میزلرزه به همراه تحلیل عددی انجام دادند و دو نمونه را تحت شتاب افقی و دو نمونه را تحت شتاب افقی و قائم قرار داده‌اند، که نتایج مود اصلی تغییر مکان در تمامی دیوارها واژگونی بوده است.

در ایران هم پژوهش‌هایی انجام شده است. میرلطیفی (۱۳۸۲)، رفتار دیوار را با استفاده از میزلرزه در شرایط مختلف آزمایش کرده است که حالت‌های محتمل تغییرشکل دیوارها به‌صورت تغییرشکل شکم‌گونه و طره‌ای به‌دست آمد. صابر ماهانی و همکاران (۲۰۰۸) تعداد ۲۰ عدد آزمایش مدل فیزیکی 1g برای دیوار خاک مسلح با نمای دورپیچ[۵] با استفاده از میزلرزه انجام داده‌اند که دو نوع مود اصلی تغییرشکل به‌نام‌های واژگونی با حداکثر تغییرشکل در بالای دیوار و شکم‌دادگی با حداکثر تغییرشکل در میانه ارتفاعی دیوار مشاهده شده است. اگر چه پایداری دیوارهای خاک مسلح در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای بسیار بررسی شده است. مسئلهٔ اصلی این پژوهش این است که این دیوارها در چه شرایطی و چگونه تغییر شکل می‌دهند.

مدل‌سازی عددی

مدلسازی عددی با نرم‌افزار اجرای محدود ABAQUS (6.10-1) به‌صورت دو بعدی انجام شده است. شکل ۳ شبکه‌بندی و مدل استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. سعی شده است با نمونهٔ آزمایشگاهی مطابقت زیادی داشته باشد و برای این کار، میز لرزان و ورق‌های پلی‌استایرن که به‌عنوان مرز جاذب در مدل آزمایشگاهی به‌کار برده شده بود نیز مدل‌سازی شده است.

۱. Bathurst ۲. Ling ۳. Latha ٤. Krishna ٥. Wrap - around

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

۱. خاک

مشخصات خاک استفاده شده برای صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی

مدل‌سازی خاک بر اساس خاک استفاده شده در آزمایشگاه از خاک دانه‌ای (ماسۀ فیروزکوه)، انجام شده است. برخی از پارامترهای مقاومتی (C, f) خاک با انجام آزمایش سه‌محوری در آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران به‌دست آمده است. این آزمایش‌ها در قالب کلاس درس آزمایشگاه خاک پیشرفته در نیمسال دوم ۸۹-۹۰ با سرپرستی دکتر قلندرزاده انجام شده است. و متغیر تغییرشکل‌پذیری خاک (مدول الاستیسیته) به‌عنوان پارامتر مجهول برای کالیبره کردن انتخاب شد. سعی شده در محدودۀ معقول پیشنهادی مراجع فنی تغییر داده شود. در تمام نرم‌افزارهای عددی برای آن‌که مشکل عددی در تشکیل ماتریس خواص مصالح پیش نیاید چسبندگی را عددی مخالف صفر قرار می‌دهیم مخصوصاً اگر خاک بخواهد وارد کرنش‌های پلاستیک شود. معمولاً محققان این عدد را جزء خطاهای موجود در یک مدل عددی می‌پذیرند در این تحقیق سعی شده این عدد بسیار کوچک و زیر پنج پاسکال باشد. برای شروع کار با توجه به تراکم در نظر گرفته شده برای ساخت مدل آزمایشگاهی، مقدار اولیه را با توجه به پیشنهادات مراجع فنی در نظر گرفته شود و سپس با تغییر آن سعی در نزدیک شدن مقادیر تغییر شکل مدل با نمونه آزمایشگاهی شده است. برای زاویۀ اتساع پیشنهادهای زیادی وجود دارد ولی یکی از قابل قبول‌ترین مراجع در این خصوص مقاله بولتون[۱] (۱۹۸۶) است.

جدول ۱. خصوصیات خاک استفاده شده در کالیبراسیون

عنوان خاک استفاده شده در مدل	وزن مخصوص خشک	مدول یانگ	ضریب پواسون	زاویۀ اصطکاک	زاویه اتساع
	kN/m3	MPa		Deg.	Deg.
خاکریز	۱۵/۱۰	۱۲	۰/۳	۳۸	۹
فونداسیون	۱۶/۳۰	۲۵	۰/۳	۳۸	۹

۱. Bolton

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

مشخصات خاک استفاده شده برای مدل با ابعاد واقعی

مدل‌سازی خاک برای مدل با ابعاد واقعی با توجه به پیشنهادات مراجع فنی انتخاب شده است و بر روی خاک دانه‌ای (ماسه متراکم) در نظر گرفته شده است. جدول ۲ خصوصیات خاک استفاده شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. خصوصیات خاک استفاده شده در مدل واقعی

عنوان خاک استفاده شده در مدل	نوع خاک	وزن مخصوص خشک	مدول یانگ	ضریب پواسون	زاویهٔ اصطکاک	زاویهٔ اتساع
		kN/m3	MPa		Deg.	Deg.
SOIL	خاک ماسه‌ای	۱۷	۵۰	۰/۳	۳۶	۹

مشخصات خاک استفاده شده برای خاک‌ریز، از نوع دانه‌ای و خشک است و از مدل الاستوپلاستیک استفاده شده است. رفتار الاستیک آن به‌صورت خطی و با توجه به تراکم خاک با مدول الاستیسیتهٔ ثابت (E=12 MPa)، نسبت پواسون ۰/۳ بیان می‌شود و رفتار پلاستیک آن با معیار مدل موهر کولمب که با توجه به دانه‌ای بودن خاک چسبندگی را صفر، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ۳۸ درجه و زاویهٔ اتساع آن ۹ درجه در نظر گرفته شده است.

۲. مسلح‌کننده

مصالح مسلح‌کننده از نوع پلی‌اتیلن با دانسیتهٔ زیاد است. مدلسازی این مصالح به‌صورت الاستیک و با سختی کششی (J=9.6 kN/m) به‌ازای کرنش ۰/۰۲ است که با المان (TRUSS) مدل‌سازی شده است.

۳. شرایط مرزی

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی آزمایشگاهی (صحت‌سنجی) و نمونه‌های واقعی متفاوت بوده است. برای مدل‌سازی آزمایشگاهی سعی شده که شرایط مرزی به‌صورت واقعی مدل‌سازی شود. به‌همین علت همانند شرایط واقعی، میزلرزان به‌صورت صلب و ورقه‌های پلی‌استایرن در انتهای نمونهٔ خاکی به‌عنوان مرز جاذب که بین خاک و بدنهٔ میز قرار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

می‌گیرند مدل‌سازی شده است. برای نمونه‌های واقعی عموماً سه روش عمده در مدل‌سازی مرزهای نامحدود، برای عدم انعکاس امواج در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد، که این روش‌ها عبارتند از:

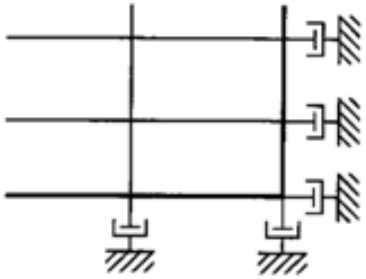
استفاده از المان‌های کلوین

استفاده از المان‌های میراگر

استفاده از المان‌های نامحدود

در این تحقیق برای مدل‌سازی شرایط مرزی نمونۀ واقعی از المان‌های میراگر در مدل‌سازی مرز جاذب استفاده شده است. اولین بار لیسمر[۱] و کوهلمیر[۲] (۱۹٦۵) المان‌های میراگر در حالت بارگذاری دینامیکی را برای پی‌های سطحی استفاده کردند. میراگر انرژی‌ای را که به مرزها می‌رسد جذب می‌کند. شکل ۱ این المان‌ها را نشان می‌دهد. ضرایب این میراگرها برای اعمال در مدل‌سازی با C_d تعریف می‌شود. مقدار آن از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$C_d = \rho V_s A \qquad (۱)$$



شکل ۱. روش مدل‌سازی مرزهای دور با المان‌های میراگر در این تحقیق

٤. میرایی رایلی

مشخصات میرایی رایلی که عموماً برای خاک با استفاده از مدل خاک پلاستیک لحاظ می‌شود و برای مسائل تحلیل خطی معادل عموماً عدد ۵٪ پیشنهاد می‌شود. جدول ۳ مقادیر میرایی استفاده شده در تحلیل را نشان می‌دهد. محققان مختلفی میرایی رایلی را پیشنهاد دادند. از جمله کلوگ[۳] و پنزین[٤] (۱۹۷۵) و فرمولاسیون آن بدین شکل است:

$$C = \alpha M + \beta K \qquad (۲)$$

M ماتریس جرم K ماتریس سختی α و b ضرایب میرایی هستند.

۱. Lysmer ۲. Kuhlemeyer ۳. Clough ٤. Penzien

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2} \qquad (۳)$$

در این رابطه ضرایب میرایی به انتخاب مقداری برای z و هم‌چنین آنالیز مودال و به‌دست آوردن محدودهٔ فرکانسی تعیین می‌شود.

جدول ۳. مقادیر میرایی استفاده شده در تحلیل‌های این تحقیق

نوع مدل	نوع میرایی	درصد میرایی مفروض در این تحقیق	مرجع و علت انتخاب
مدل آزمایشگاهی(خاک ماسه‌ای)	رایلی	۲۰	Sabermahani et al., 2008
مدل واقعی	رایلی	۵	Adams and Askenazi 1999

اعتبارسنجی مدل

برای صحت مدل‌سازی و اعتبارسنجی نتایج آن، ابتدا به تشریح مدل آزمایشگاهی انتخاب شده پرداخته و سپس اعتبار سنجی می‌شود.

۱. مدل آزمایشگاهی

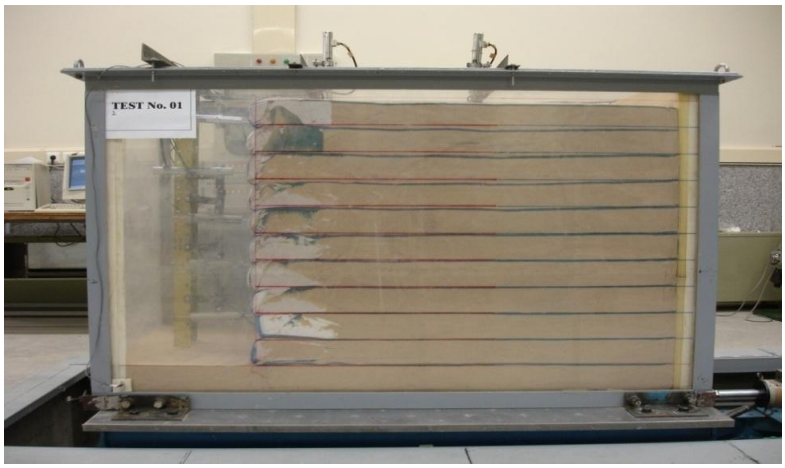
نتایج مدل‌های عددی این تحقیق با نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دیوار خاک مسلح با مقیاس $\frac{1}{5}$ صابر ماهانی و همکاران (۲۰۰۸) مقایسه و اعتبارسنجی شده است. تعداد ۲۰ آزمایش روی مدل‌های فیزیکی خاک‌مسلح با ارتفاع یک متر با استفاده از میزلرزان در دانشگاه تهران انجام شده است. دو نوع مود اصلی تغییرشکل به‌نام‌های واژگونی با حداکثر تغییرشکل در بالای دیوار و شکم دادگی با حداکثر تغییرشکل در میانهٔ ارتفاعی دیوار مشاهده شده است. در آزمایش‌های مختلف پارامترهای مدل نظیر طول مسلح‌کننده، نوع مسلح‌کننده، فاصلهٔ مسلح‌کننده، تراکم نسبی خاک، هم‌چنین مشخصه‌های حرکت ورودی نظیر شتاب حداکثر و فرکانس حرکت ورودی تغییر داده شده است تا تأثیر آن‌ها بر روی رفتار لرزه‌ای دیوار خاک مسلح مشاهده شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

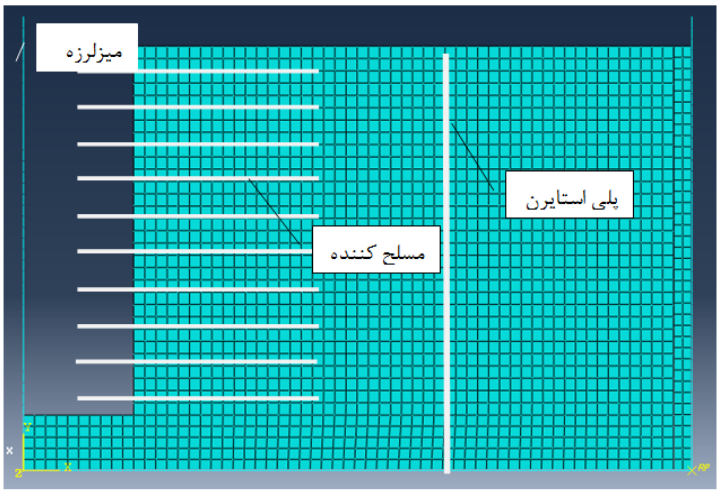
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

تمامی دیوارها در۱۰ لایه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر ساخته شدند. طول مسلح‌کننده‌ها به ارتفاع دیوار در آزمایش‌های مختلف برابر ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته شد.

ضخامت خاک پی و شرایط مرزی پنجه معادل ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد و برای این‌که مودهای تغییرشکل دیوارهای خاک مسلح هدف تحقیق بوده است نمای منعطف از نوع دورپیچ انتخاب شد.



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی میزلرزه که در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل عددی به کار رفت



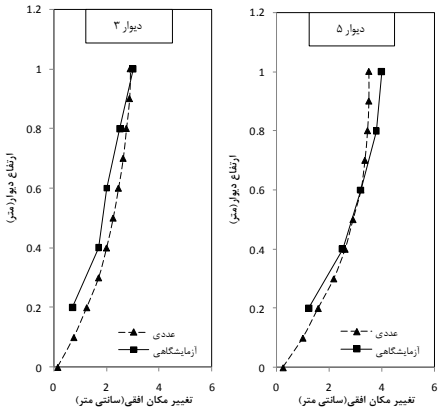
شکل ۳. اجزای مدل عددی ارائه شده در این تحقیق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

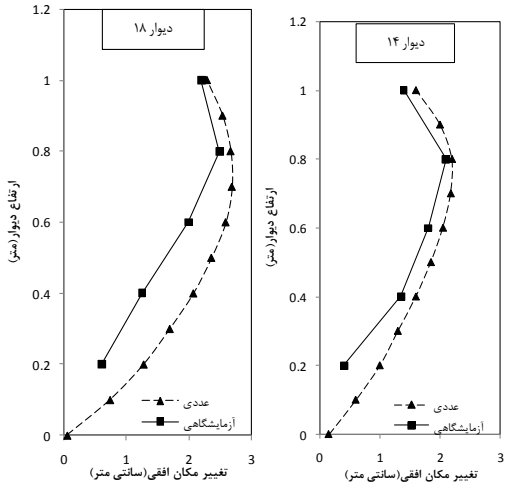
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

۲. صحت‌سنجی مدل

برای صحت مدل‌سازی و اعتبارسنجی نتایج آن، تغییرشکل نمای دیوار حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی ذکر شده مقایسه و مشاهده شد که نتایج از تطابق قابل قبولی برخوردار است. شمارهٔ دیوارها در شکل ٤ و ۵ مربوط به دیوارهای آزمایش شده به‌وسیلهٔ صابر ماهانی (۱۳۸۷) است.



شکل ٤. مقایسهٔ مقدار تغییر شکل نمای دیوار در پژوهش‌های آزمایشگاهی(صابرماهانی ۱۳۸۷) و عددی برای مود واژگونی

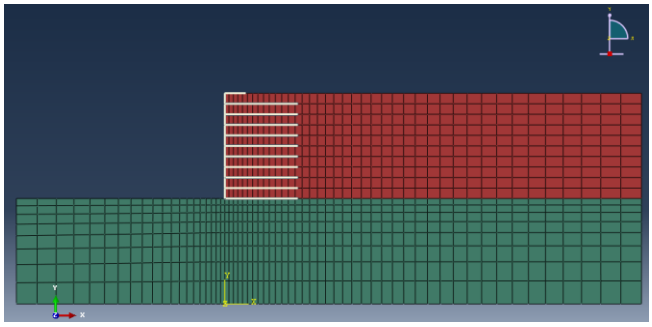


شکل ۵. مقایسهٔ مقدار تغییر شکل نمای دیوار در پژوهش*ای* آزمایشگاهی (صابرماهانی ۱۳۸۷) و عددی برای مود شکم‌دادگی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

مدل‌سازی دیوار با ابعاد واقعی و بررسی پارامتریک

با توجه به ارتفاع دیوار (۱ متر) در آزمایشگاه که ضریب مقیاس به‌کار گرفته شده در آن ۵ برابر کوچک‌تر از نمونۀ واقعی است، برای مدل‌سازی نمونه با ابعاد واقعی، ارتفاع دیوار ۵ متر در نظر گرفته شده است و برای جلوگیری از تأثیرگذاری مرزها روی نتایج، تا حد امکان مرزها را از نمای دیوار دور کردیم تا تأثیرگذاری آن به حداقل برسد (در بخش قبلی شرایط مرزی تشریح شد). شکل ٦ نمونه مدل‌سازی شده نمونه با ابعاد واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ٦. مدل دو بعدی با ابعاد واقعی دیوار خاک مسلح

برای تشخیص مود تغییرشکلی دیوار خاک‌مسلح، با توجه به نتایج به‌دست آمده در تحلیل، چنان‌که انتظار می‌رفت دو مود تغییرشکلی مشاهده شد. مودهای اصلی مشاهده شده تغییرشکل نمای دیواره یعنی واژگونی و شکم دادگی است. در این قسمت به بررسی و نحوۀ تشکیل مودها و ساز و کار تشکیل آن‌ها پرداخته شده است.

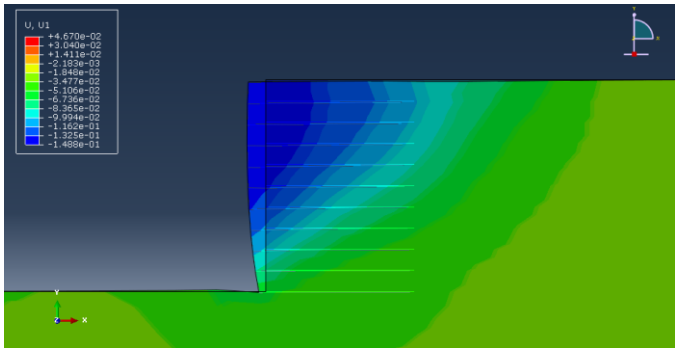
۱. مود تغییر شکل واژگونی

در مود واژگونی، حداکثر تغییرشکل نمای دیوار در بالا رخ داده و پروفیل تغییرشکل با توجه به نرمی نمای دیواره به‌صورت خطی- منحنی و مقدار آن از پایین به بالای دیواره افزایش می‌یابد. در این مود، تودۀ خاک مسلح بسته به انعطاف‌پذیری دیوار، هر چه صلب‌تر باشد به‌صورت یک‌پارچه و مشابه توده‌ای صلب دچار لغزش و واژگونی می‌شود و هرچه انعطاف‌پذیرتر باشد با یک شرایط بینابینی با شکم‌دادگی، دچار لغزش و واژگونی می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

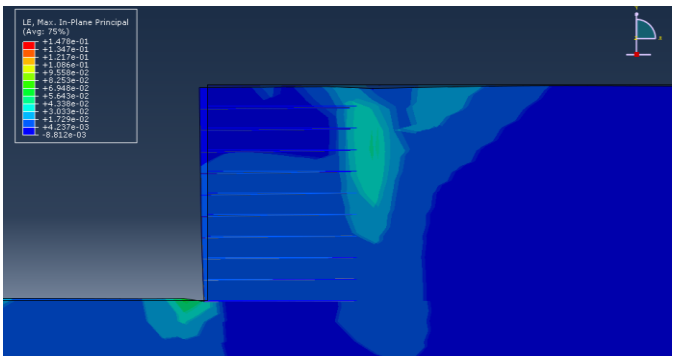
شکل ۷ مود تغییر شکل واژگونی را نمایش می‌دهد. هم‌چنین مراحل تشکیل گسیختگی در این مود انطباق خیلی زیادی با نتایج مدل آزمایشگاهی از خود نشان داده است.



شکل ۷. مود واژگونی با بروز حداکثر تغییرمکان در تاج دیوار (مقیاس محور افقی به عمودی۳ به ۱)

۲. ساز و کار گسیختگی در مود واژگونی

در دیوارهایی که مود تغییر شکل واژگونی مشاهده شد، پس از اعمال شتاب، به‌علت شکل‌گیری نقاط پلاستیک، و با حرکت رو به‌جلو تودهٔ مسلح، خاک‌ریز پشت دقیقاً در مرز تودهٔ خاک مسلح متحمل تغییر شکل‌های بسیار بزرگ شده است. تمرکز نقاط پلاستیک پشت خاک‌ریز، مبین این مطلب است. در این مود شاهد تمرکز تنش در ناحیهٔ پنجهٔ دیوار و فرورفتگی آن و هم‌چنین برآمدگی خاک در قسمت جلوی پنجه هستیم. شکل ۸ نقاط پلاستیک شده در مود تغییر شکل واژگونی را نمایش می‌دهد.

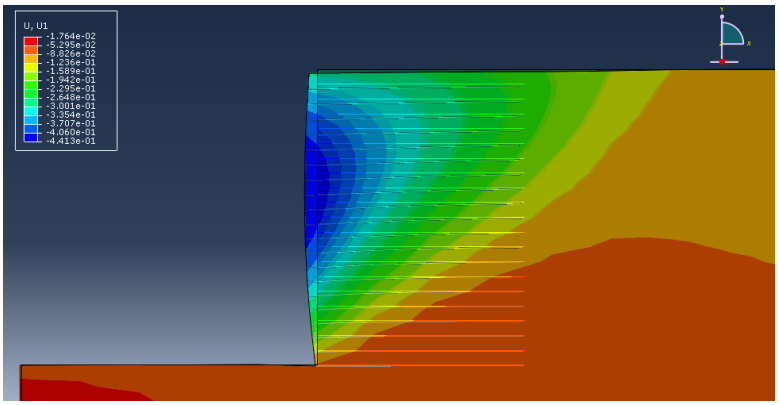


شکل ۸. نقاط پلاستیک در مود واژگونی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

۳. مود تغییرشکل شکم‌دادگی

در مود شکم‌دادگی، حداکثر تغییرشکل نمای دیوار برخلاف مود واژگونی که در تاج دیوار رخ می‌دهد. تودهٔ خاک مسلح بسته به انعطاف‌پذیری دیوار، به‌صورت یک‌پارچه و به‌صورت منحنی‌های محدب دچار لغزش و شکم‌دادگی می‌گردد. شکل ۹ مود تغییرشکل شکم‌دادگی را نمایش می‌دهد. گزارش‌های ارائه شده از مراحل تشکیل گسیختگی در مود شکم‌دادگی در مدل آزمایشگاهی نیز انطباق مناسبی با نتایج مدل عددی از خود نشان داده است.



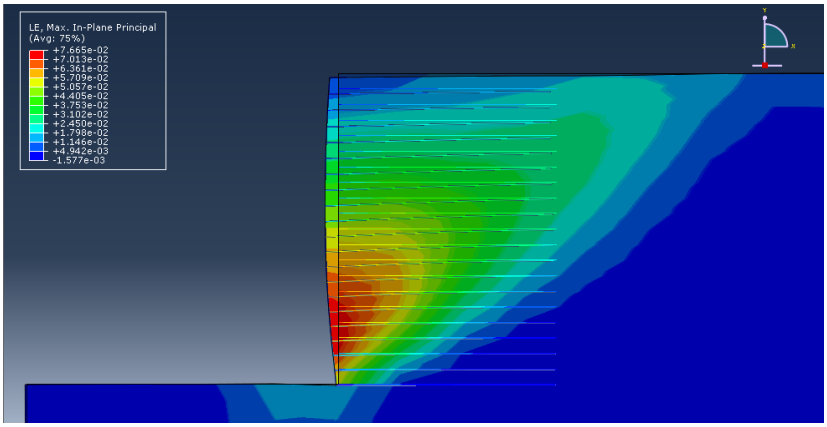
شکل ۹. مود شکم‌دادگی با بروز حداکثر تغییر مکان در وسط دیوار

٤. ساز و کار گسیختگی در مود شکم‌دادگی

در دیوارهایی که مود تغییرشکل شکم‌دادگی مشاهده شد، بعد از اعمال شتاب در هنگام شکل‌گیری نقاط پلاستیک، سطح گسیختگی به‌جای خاک‌ریز پشت در درون خاک مسلح تشکیل شد. حداکثر تغییرمکان نمای دیواره نیز به‌جای بالای دیوار، در میانه ارتفاع دیوار مشاهده شد. هم‌چنین حداکثر نشست سطح زمین در بالای دیواره به‌جای مرز تودهٔ خاک مسلح و خاک‌ریز پشت، در تودهٔ خاک مسلح رخ داده است. شکل ۱۰ نقاط پلاستیک شده در مود تغییرشکل شکم‌دادگی را نمایش می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]



شکل۱۰. نقاط پلاستیک در مود شکم‌دادگی

تحلیل حساسیت

برای جلوگیری از تکرار مدل‌های ساخته شده در قسمت‌های مختلف، در ابتدا یک مدل به‌عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و در بررسی‌ها فقط به پارامتر متغییر پرداخته می‌شود. مشخصات مدل مبنا در جدول ٤ آمده است.

جدول ٤. مشخصات در نظر گرفته برای مدل مبنا

عنوان خاک استفاده شده در مدل	سختی کششی مسلح کننده (J)	نسبت طول مسلح کننده به ارتفاع دیوار	نسبت فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار	شتاب نگاشت	ارتفاع دیوار
	kN/m	L/H	S_v/H		m
SOIL	۵۰۰	۰/۷	۰/۱	ELCENTRO	۵

برای این بخش با تغییر متغیرهایی از قبیل نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار ($\frac{L}{H}$)، نسبت فاصله قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار ($\frac{S_v}{H}$)، سختی مسلح‌کننده (J)، ارتفاع دیوار (H)، نوع خاک و حداکثر شتاب وارده (PGA) در محدودهٔ گسترده به بررسی تأثیرات هر یک از این متغیرها روی مود شکل‌پذیری دیوار پرداخته می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

جدول ۵. محدودهٔ مدل‌های ساخته شده برای تحلیل حساسیت

ردیف	پارامتر متغیر
۱	$0.4 < L/H < 1$
۲	$0.05 < S_v /H < 0.15$
۳	$2.5 < H < 12.5$
٤	$100\ kN/m < EA(J) < 5000 kN/m$

برای تحلیل حساسیت مدل نمونه با ابعاد واقعی مبنا با دیواری به ارتفاع ۵ متر و مسلح‌کننده ژئوسنتتیکی با مشخصات مصالح به‌کار رفته در مدل‌سازی که در جدول ٤ نشان داده شده است. شتاب اعمالی از شتاب‌نگاشت زلزله[1] با شتاب حداکثر ۰/۳۵ g و فرکانس ۵ هرتز در طول ۳۰ ثانیه و در قسمت تحتانی به مدل اعمال می‌شود. سختی کششی مسلح‌کننده (J=500 kN/m) به‌ازای کرنش ٪۲، فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده نسبت به ارتفاع دیوار ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

۱. بررسی تأثیر نسبت طول مسلح کننده به ارتفاع دیوار بر روی مود تغییرشکل

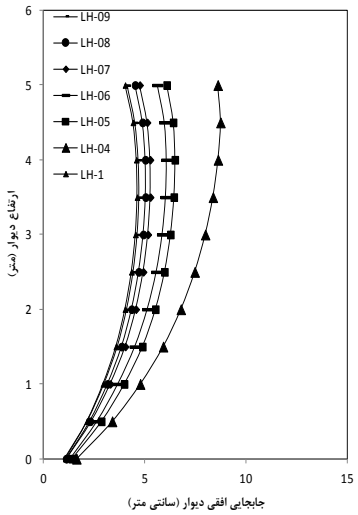
بدین‌منظور تعداد ۷ مدل در محدودهٔ $0.4 < \frac{L}{H} < 1$ آنالیز شد. جدول ٦ فهرست تحلیل‌های انجام شده بر مدل با ابعاد واقعی را نشان می‌دهد.

جدول ٦. تغییر نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار

ردیف	نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار (L/H)	مود تغییر شکل
۱	۰/٤	شکم‌دادگی
۲	۰/۵	شکم‌دادگی
۳	۰/٦	شکم‌دادگی
٤	۰/۷	شکم‌دادگی
۵	۰/۸	شکم‌دادگی
٦	۰/۹	شکم‌دادگی
۷	۱	شکم‌دادگی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]



شکل ۱۱. نمودار جابه‌جایی افقی دیوار برای مقادیر مختلف نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار

چنان‌که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، تأثیر متغیر $\frac{L}{H}$ روی مود تغییرشکلی دیوار نشان داده می‌شود. هرچه نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار کم‌تر می‌شود مود تغییرشکلی از شکم‌دادگی به سمت واژگونی تمایل پیدا می‌کند. نکتهٔ مهم، تأثیر بسیار کم این متغیر در تغییر مودها است، که با توجه به انتخاب محدودهٔ وسیعی از این متغیر مشاهده می‌شود و تغییر مود به شکل کامل رخ نداده است.

نکتهٔ دیگر در بررسی این پارامتر این‌که تا نسبت $0.5<\frac{L}{H}$ جابه‌جایی افقی دیوار از یک افزایش قابل قبولی برخوردار است، ولی در نسبت ۰/٤ به یک‌باره این مقدار افزایش زیادی می‌یابد. با مقایسهٔ افزایش این مقدار در نسبت L/H بیش‌تر از ۰/۵ ملاحظه می‌شود به‌ازای هر ۱۰٪ کاهش طول، کم‌تر از ۵٪ افزایش جابه‌جایی افقی دیوار داریم در نسبت L/H کم‌تر از ۰/۵ ملاحظه می‌شود به‌ازای هر ۱۰٪ کاهش طول، بیش‌تر از ۱۵٪ افزایش جابه‌جایی افقی دیوار داریم.

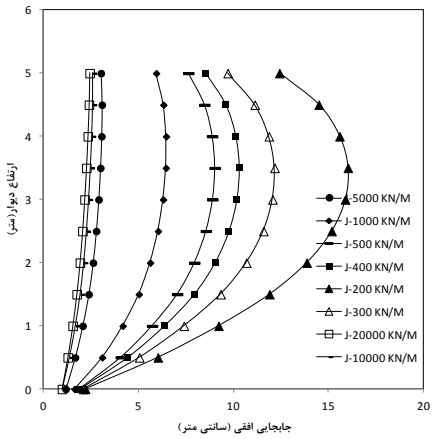
۲. بررسی تأثیر سختی کششی مسلح‌کننده‌ها بر روی مود تغییرشکل

در این قسمت تأثیر سختی کششی مسلح‌کننده‌ها بر روی مود تغییرشکلی دیوار انجام پذیرفت. جدول ۷ تحلیل‌های انجام گرفته برای این موضوع را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

جدول ۷. تغییر سختی مسلح‌کننده

ردیف	سختی کششی مسلح‌کننده (kN/m)	مود تغییر شکل
۱	۲۰۰	شکم‌دادگی
۲	۳۰۰	شکم‌دادگی
۳	٤۰۰	شکم‌دادگی
٤	۵۰۰	شکم‌دادگی
۵	۱۰۰۰	واژگونی
٦	۵۰۰۰	واژگونی
۷	۱۰۰۰۰	واژگونی
۸	۲۰۰۰۰	واژگونی



شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی افقی دیوار برای مقادیر مختلف سختی کششی مسلح‌کننده

شکل ۱۲، تأثیر سختی کششی مسلح‌کننده در تغییر مود تغییر شکل دیوار را نشان می‌دهد. با افزایش سختی مسلح‌کننده مود تغییرشکلی از مود شکم‌دادگی به مود واژگونی تغییر پیدا می‌کند و می‌تواند به‌عنوان متغیر تعیین‌کننده در بررسی‌های مودی مطرح شود..

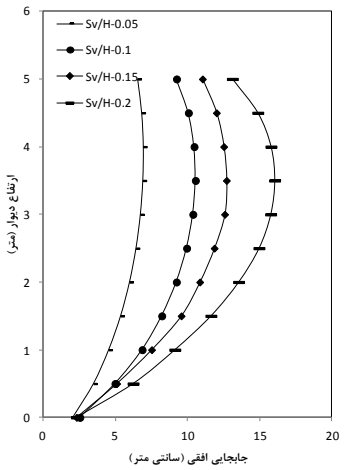
محدودۀ تغییرشکلی شکم‌دادگی برای سختی کششی مسلح‌کننده‌های $J \leq 500\ kN/m$ است و برای سختی کششی بیش‌تر تغییرشکل واژگونی حاکم است. نکته قابل توجه در بررسی این متغیر، تأثیر کم سختی کششی مسلح‌کننده در سختی‌های زیاد ($J > 1000\ kN/m$) در کاهش جابه‌جایی افقی دیواره‌ها است، به‌طوری‌که با افزایش دو برابری سختی کششی مسلح‌کننده در سختی‌های کم مقدار تغییرشکل حدوداً ٤۰ درصد کاهش می‌یابد ولی در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

سختی‌های زیاد این مقدار کاهش جابه‌جایی افقی به کم‌تر از ۱۵ درصد و در سختی‌های خیلی بالا ($J > 10000\ kN/m$) کاهش ۵ درصدی مشاهده می‌شود.

۳. بررسی تأثیر نسبت فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار بر روی مود تغییرشکل

فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده متغیر دیگری است که بررسی پارامتریک روی آن انجام گرفت.



شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی افقی دیوار برای مقادیر مختلف

برای بررسی تأثیر نسبت فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار $\frac{S_v}{H}$، چهار محدوده انتخاب شد که در جدول ۹ آمده است. شکل ۱۳ جابه‌جایی افقی دیوار را با توجه به نسبت فاصلهٔ قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار را نشان می‌دهد. چنان‌که مشخص است کاهش این نسبت تغییر مود تغییرشکلی از شکم‌دادگی به واژگونی را نشان می‌دهد. با کم شدن فاصلهٔ مسلح‌کننده، رفتار تودهٔ خاک مسلح به توده‌های صلب شبیه‌تر بوده و به‌همین دلیل سطوح گسیختگی در خاک‌ریز پشت شکل می‌گیرد و مود تغییرشکلی به سمت واژگونی تمایل پیدا می‌کند.

٤. بررسی تأثیر ارتفاع دیوار بر روی مود تغییرشکل

ارتفاع دیوار یکی از متغیرهای بررسی شده است، با توجه به شرایط اجرایی سعی در انتخاب ارتفاع دیوار کوتاه، متوسط و بلند شد که شامل ارتفاع دیوار ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متر است. جدول ۱۰ آنالیزهای انجام گرفته روی ارتفاع‌های مختلف دیوار را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

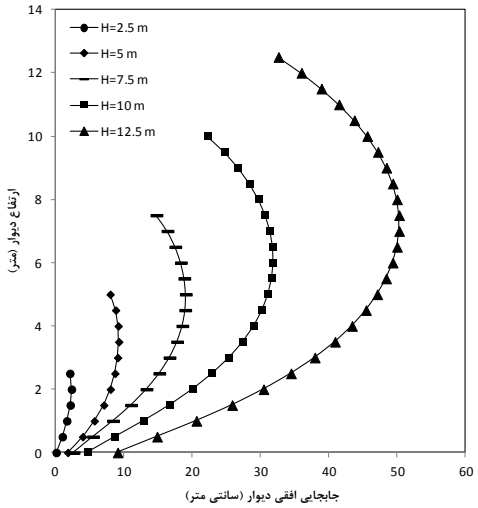
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

جدول ۹. مود تغییرشکل دیوار به ازای فاصلۀ قائم مسلح‌کننده مختلف

ردیف	فاصلۀ قائم مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار (S_v /H)	مود تغییر شکل
۱	۰/۰۵	واژگونی
۲	۰/۱	شکمی
۳	۰/۱۵	شکمی
٤	۰/۲	شکمی

جدول ۱۰. مود تغییرشکل دیوار به‌ازای ارتفاع دیوار مختلف

ردیف	ارتفاع دیوار (متر)	مود تغییر شکل
۱	۲/۵	واژگونی
۲	۵	شکم‌دادگی
۳	۷/۵	شکم‌دادگی
٤	۱۰	شکم‌دادگی
۵	۱۲/۵	شکم‌دادگی



شکل ١٤. نمودار جابه‌جایی افقی دیوار برای مقادیر مختلف ارتفاع دیوار

با افزایش ارتفاع دیوار، مود تغییرشکلی به سمت شکم‌دادگی تمایل پیدا می‌کند. همان‌گونه که در شکل ١٤ ملاحظه می‌گردد فقط در دیوار ۲/۵ متری مود واژگونی حاکم بوده است. علت این امر نیز با افزایش ارتفاع دیوار تودۀ خاک با توجه به ثابت ماندن سختی کششی مسلح‌کننده،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

منعطف‌تر شده و سطوح گسیختگی در داخل خاک‌ریز تشکیل می‌شود و تغییر شکل شکم‌دادگی محتمل‌تر است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش مدل‌سازی عددی اجزا محدود، تحلیل پاسخ دینامیکی دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی بررسی شد تا انواع مود تغییرشکل این نوع ابنیه نگهبان در شرایط زلزله تعیین شود. نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و سپس تحلیل حساسیت بر نمونه با ابعاد واقعی انجام گرفت که این نتایج حاصل شده است:

الف) در بررسی‌های پارامتریک صورت گرفته، مودهای تغییرشکلی واژگونی، شکم‌دادگی مشاهده شده است.

ب) سطح گسیختگی در مود واژگونی در داخل تودهٔ خاک‌ریز پشت تشکیل می‌شود و ساز وکار گسیختگی خارجی[۱] است.

ج) در مود شکم‌دادگی، به‌دلیل انعطاف زیاد دیوار، سطح گسیختگی در داخل تودهٔ خاک مسلح تشکیل می‌شود و ساز و کار گسیختگی داخلی[۲] است.

د) نتایج تحلیل‌ها نشان داده است که هرچه از مسلح‌کننده‌های انعطاف‌پذیرتر استفاده شود مود تغییرشکلی نمای دیوار را به‌سمت شکمی سوق می‌دهد، که نتایج آزمایشگاهی نیز مؤید این مطلب است.

ه) بررسی پارامتریک نشان داده است که مهم‌ترین عامل در تعیین مود تغییرشکلی دیوار خاک مسلح، سختی مسلح‌کننده‌ها است که هر چه سختی مسلح‌کننده‌ها کاهش یابد تمایل به تغییرشکل شکمی بیش‌تر می‌شود و نسبت طول به ارتفاع مسلح کننده‌ها کم‌ترین اثرات را در تغییر مود تغییر شکلی ایجاد می‌کند.

و) تغییر ارتفاع دیوار تغییر شکل‌ها را به‌سمت مود شکمی سوق می‌دهد، و هم‌چنین با افزایش نسبت فاصلهٔ قائم به ارتفاع مسلح‌کننده، مود تغییر شکل شکمی حاکم است..

۱. External ۲. Internal

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

فهرست نشانه‌ها:

سختی کششی مسلح‌کننده	J	فاصلۀ قائم مسلح‌کننده	S_v
ضریب میراگر	C_d	حداکثر شتاب مبنا	PGA
جرم مخصوص خاک	ρ	میرایی بحرانی	ζ
سرعت موج برشی	V_s	ماتریس سختی	K
سطح پوششی میراگر	A	ماتریس جرم	M
ضریب میرایی رایلی	α	ضریب میرایی رایلی	β

منابع

۱. شاهقلی محسن، *تحلیل و طراحی دیوارهای خاک مسلح در برابر زلزله*، پایان‌نامۀ کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۷۸).

۲. میرلطیفی سیدعلیرضا، *مطالعۀ رفتار لرزه‌ای دیوارهای خاکی مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از آزمایش‌های مدل میزلرزه 1g*، پایان‌نامۀ کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۸۲).

۳. صابرماهانی محسن، *مطالعه مودهای تغییرشکل و پاسخ لرزه‌ای دیوار خاک مسلح با استفاده از میزلرزه 1g*، پایان‌نامۀ دکتری مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۸۷).

٤. رضایی سعید، *معیارهای طراحی دیوارهای حائل خاک مسلح و انتخاب مناسب ترین معیار*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۸۷).

5. Bathurst R. J., Hatami K., Alfaro M. C., "Geosynthetic reinforced soil walls and slopes: Seismic aspects. In: Shukla, S.K. (Ed.), Geosynthetics and Their Applications", Thomas Telford (2002) 327-392.

6. Bolton M. D., "The strength and dilatancy of sands, Geotechnique", Vol 36, No 1 (1986) 65-78.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

7. Clough R. W., Penzien J., "Dynamics of structures. New York: McGraw-Hill (1975).

8. Hoe I, ling., Songatao Yang, Dov Leshchinsky, Huabei Liu, Christopher Burke, "Finite-Element simulation of full-scle modular-block reinforced Soil retaining wall under earthquake loading", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 136 No. 5 (2010).

9. Koseki J., Munaf Y., Tatsuoka F., Tateyama M., Kojima K., Sato T., "Shaking and tilt table tests of geosynthetic-reinforced soil and conventional-type retaining walls", Geosynthetics International 5 (1–2) (1998) 73-96.

10. Kuhlemeyer R. L., Lysmer J., "Finite Element Method accuracy for wave propagation problems", Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 99(SM5) (1965) 421-427.

11. Ling H. I., Liu H., Mohri Y., "Parametric studies on the behavior of reinforced soil retaining walls under earthquake loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131 (10) (2005a) 1056-1065.

12. Ling H. I., Mohri Y., Leshchinsky D., Burke C., Matsushima K., Liu H., "Large scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131 (4) (2005b) 465-476.

13. Lata G. M., Krishna A. M., "Seismic response of reinforced soil retaining wall modes: Influence of backfill relative density", Geostextiles and Geomembranes. 26 (4) (2008) 335-349.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]

14. Nouri H., Fakher A., Jones C.J.F.P., "Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo- static acceleration on reinforced soil slops and walls using the limit equilibrium horizontal slices method", Geotextiles and Geomembranes 26(3) (2008) 263-278.

15. Nouri H., Fakher A., Jones C.J.F.P., "Development of horizontal slice method in stability analysis of reinforced slops", Geotextiles and Geomembranes 24 (3) (2006) 175-187.

16. Richardson G. N., Lee K. L., "Seismic design of reinforced earth walls", J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 01(2) (1975) 167-188.

17. Sabermahani M., Ghalandarzadeh A., Fakher A., "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls", Geotextiles and Geomembranes 27 (2008) 121-136.

18. Shekarian S., Ghanbari A., Farhadi A., "New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill", Geotextiles and Geomembranes. 26 (2008) 350-356.

19. Vagneron J. J., Adams B. D., "Reinforced earth retaining walls", J. Soil Mech. Fdns. Div., ASCE, Vol 99 (SM10), Oct., (1973) 958-966.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.5.4]