طراحی بهینه دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده برمبنای تغییر مکان تحت بارهای لرزه‌ای

پویا نقشین، هادی شهیر*؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۳/۲/۳ پذیرش ۹٤/۱/۱۸

چکیده

میخ‌کوبی خاک از روش‌های رایج برای پایدارسازی گودبرداری‌ها به‌صورت موقت و دائم است که در صورت استفاده از آن به‌صورت سازه دائم، بررسی لرزه‌ای این سازه‌ها اهمیت دارد. برای بررسی رفتار دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده تحت بار زلزله چند مدل‌سازی فیزیکی انجام شده و اطلاعات محدودی موجود است. برای بررسی اثرات انواع پارامترها بر پایداری و عملکرد دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده می‌توان از مدل‌سازی عددی استفاده کرد که در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است. در این تحقیق، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله فاصله، چیدمان و طول میخ‌ها و ارتفاع دیوار بر تغییر مکان لرزه‌ای دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف زلزله پرداخته شده است. برای بررسی اثر چیدمان و طول میخ‌ها در عملکرد این سازه‌ها، دو چیدمان یک‌نواخت و متغیر در ارتفاع استفاده شده است. برای بررسی تأثیر فاصلهٔ میخ‌ها و ارتفاع دیوار، فواصل ۲ و ۱/۵ متر، و ارتفاع ١٤، ۲۰ و ٢٦ متر در نظر گرفته شده است. تحلیل‌های لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار المان محدود دوبعدی Plaxis صورت گرفته است. برای محاسبهٔ طول میخ‌ها، ضریب اطمینان پایداری مدل‌های مختلف ثابت در نظر گرفته شده و از نرم‌افزار تعادل حدی GeoSlope بهره برده شده است. پس از تعیین طول میخ‌ها بر اساس ضریب اطمینان پایداری ثابت، تغییر شکل مدل‌ها تحت شتاب نگاشت‌های مختلف محاسبه شده و توصیه‌هایی در زمینه کاهش تغییر مکان لرزه‌ای دیوارهای میخ‌کوبی شده ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: دیوار خاکی میخکوبی شده، رفتار لرزه‌ای، مدل‌سازی اجزای محدود، تغییر مکان لرزه‌ای، تحلیل تاریخچه زمانی

* **نویسنده مسئول** shahir@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

مقدمه

با شتاب گرفتن ساخت‌وساز در شهرهای بزرگ به‌ویژه در زمینه ساختمان‌های بلند، راه‌آهن شهری، زیرگذرهای شهری و ... و وابسته بودن این فعالیت‌ها به انواع گودبرداری‌های عمیق و نیمه‌عمیق، مسئله روش‌های پایدارسازی گود از جمله تسلیح و احداث سازه نگهبان و... از مسائل مهم ساخت‌وساز شهری شده است تا هنگام عملیات خاک‌برداری، از ریزش جداره‌های قائم و یا نزدیک به قائم جلوگیری به‌عمل آید. یکی از روش‌های رایج تسلیح که برای پایدارسازی دائم و موقت ترانشه‌ها به‌کار می‌رود، میخ‌کوبی خاک است. به‌علت انعطاف‌پذیری زیاد تودهٔ خاکی میخ‌کوبی شده، این‌گونه سیستم‌ها دارای میرایی نسبتاً زیادی هستند، از این رو، میخ‌کوبی برای پایدارسازی سازه‌های خاکی در مناطق لرزه‌خیز روشی مناسب است. با توجه به‌کاربرد بسیار این سیستم در کشورهای لرزه‌خیز و عملکرد مناسب دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده در زلزله‌های گذشته، بررسی رفتار لرزه‌ای این دیوارها اهمیت دارد [۱]، [۲].

طی سه دههٔ اخیر پژوهش‌های موردی، آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی گسترده‌ای از دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده در حالت استاتیکی صورت گرفته است. در این پژوهش‌ها از مدل‌سازی آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی، روش‌های تحلیلی برای بررسی رفتار دیوارهای میخ‌کوبی شده از جمله تغییر مکان، مود تغییر مکان، توزیع نیرو در میخ‌ها و ضرایب اطمینان و تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد این سازه‌ها استفاده شده است. بر خلاف حالت استاتیکی، بررسی‌های دینامیکی محدودی روی این سازه‌ها صورت گرفته، که در ادامه به شرح مختصر پژوهش‌های دینامیکی پیشین پرداخته شده است.

ویوستیک و همکاران[1] (۱۹۹۳) با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ دینامیکی روی مدل‌های خاکی میخ‌کوبی شده، محتمل‌ترین مکانیزم گسیختگی و تأثیر طول و سختی خمشی میخ در مکانیسم گسیختگی را تحت لرزش‌های قوی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که گوه گسیختگی شامل دو بلوک لغزنده و سه سطح گسیختگی است [۳]، [٤]. چوکر و همکاران[2] (۱۹۹٦) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS دیواری خاکی میخ‌کوبی شده را با به‌کارگیری مدل رفتاری

1. Vucetic
2. Chokeir

دراگر پراگر با قانون سخت‌شوندگی برای شبیه‌سازی خاک و مدل رفتاری موهر-کولمب برای اندرکنش خاک-میخ مدل‌سازی کرده و نتایج تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که روش عددی نتایج خوبی ارائه داده و روشی اقتصادی برای طراحی است [۵]، [٦]. ژنگ و همکاران (۱۹۹۹) به‌صورت سه‌بعدی رفتار دینامیکی این سازه‌ها را مطالعه کرده و از دو فنر برای شبیه‌سازی اندرکنش خاک-میخ استفاده کردند [۷]. ولا[1] (۲۰۰۰) دیواری خاکی میخ‌کوبی شده را با نرم‌افزار تفاضل محدود دوبعدی FLAC مدل‌سازی کرده و با مقایسه نتایج تحلیل عددی با آزمایشگاهی نتیجه گرفت که ناحیه‌ای در اواسط ردیف‌ها وجود دارد که بیش‌ترین نیروی محوری در آن ردیف بسیج شده است که این ناحیه به تشکیل گوه گسیختگی وابسته است، هم‌چنین نتیجه گرفت که تئوری بلوک لغزنده جابه‌جایی کم‌تری نسبت به FLAC نشان می‌دهد [۸]. هانگ و همکاران[2] (۲۰۰۵) با استفاده از میز لرزان آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر زاویهٔ میخ، طول میخ و فرکانس لرزش بر مقاومت لرزه‌ای و مکانیسم گسیختگی انجام دادند [۹]. بابو و سینگ[3] (۲۰۰۸) دیواری خاکی میخ‌کوبی شده را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS و به‌کارگیری مدل رفتاری سخت‌شونده با کرنش کم در حالت دینامیکی و مدل موهر کولمب در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی مدل‌سازی و تحلیل کرده و نتایج حاکی از آن است که روش شبه استاتیکی نتایج محافظه کارانه‌تری نسبت به تحلیل دینامیکی دارد [۱۰].

با توجه به مجاورت ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها به محدودهٔ گودبرداری‌ها، باید برآورد مناسبی از میزان تغییر شکل دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده انجام شود تا مشکلی برای سازه‌های مجاور ایجاد نشود و از به‌وجود آمدن بارهای اضافی بر سازه مجاور جلوگیری شود، در نتیجه نیاز به بررسی اثر پارامترهای مختلف دیوار بر روی تغییرمکان این سازه‌ها تحت بارهای دینامیکی است. در پژوهش‌های پیشین تغییر مکان لرزه‌ای برای چند دیوار با مشخصات خاص بررسی شده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف بر تغییر مکان لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند و طراحی بهینه دیوار میخکوبی شده به گونه‌ای که تغییر مکان

1. Vela
2. Hong et al.
3. Babu and Singh

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

لرزه‌ای دیوار حداقل گردد، مدنظر است. پارامترهای مختلفی در تغییرمکان دیوار مؤثر است، که در این پژوهش اثر چند پارامتر مهم از جمله فاصلهٔ افقی و عمودی میخ‌ها، چیدمان مختلف و طول میخ‌ها، ارتفاع دیوار و پارامترهای مختلف لرزه‌ای بر مقدار و نحوهٔ تغییر مکان بررسی شده است. به‌منظور بررسی اثر پارامترهای ذکر شده در شرایط یک‌سان، در مدل‌های مختلف طول میخ‌ها بر اساس ضریب اطمینان یک‌سان برای پایداری کلی محاسبه شده است. برای این منظور توصیه‌های دستورالعمل FHWA مدنظر قرار گرفته و برای دیوارهای میخ‌کوبی شده دائمی مقدار ضریب اطمینان پایداری ۱/۱ انتخاب شده است. آنالیزهای پایداری روی تمامی مدل‌های مفروض، در نرم‌افزار تعادل حدی Geoslope صورت گرفته است. پس از تعیین طول میخ‌ها برای مدل‌های بررسی شده با ضرایب اطمینان ثابت، تحلیل‌های لرزه‌ای با نرم‌افزار المان محدود Plaxis انجام شده است.

معرفی مدل عددی و صحت‌سنجی نتایج آن

در این تحقیق برای تحلیل دینامیکی دیوار خاکی میخ‌کوبی شده، از تحلیل تاریخچهٔ زمانی با روش اجزای محدود استفاده شده است که روشی کامل بوده است و تغییرات پاسخ دیواره در طول مدت زلزله قابل پیش‌بینی است. برای انجام آنالیز از نرم‌افزار المان محدود دوبعدی Plaxis استفاده شده است.

۱. فرضیات مدل‌سازی

در این بررسی دیوار میخ‌کوبی شده به‌صورت کرنش صفحه‌ای در حالت زهکشی شده مدل‌سازی شده است. برای دقت محاسبات بیش‌تر، از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی استفاده شده است. خاک با مدل‌های الاستوپلاستیک موهر-کولمب و سخت شونده و میخ و رویه با مدل الاستیک خطی مدل‌سازی شده است. از المان صفحه برای مدل‌سازی میخ و رویه استفاده شده است. با توجه به آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی میخ که یین[1] و چو[2] (۲۰۰۵) برای اندازه‌گیری مقاومت سطح مشترک میـخ و خاک انجـام داده‌اند، در نظرگیری مقـدار ۱ برای ضریب کاهش

1. Yin
2. Chu

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

مقاومت (R_{int}) سطح مشترک خاک- میخ، منطقی است [۱۱]. شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل عددی با استفاده از تغییر مکان افقی با ضریب ۰/۰۱ متر به بستر هندسه مدل اعمال گردیده و برای جلوگیری از انعکاس امواج، ابعاد هندسه مدل طوری در نظر گرفته شده است که امواج ناشی از زلزله در اثر میرایی هندسی (شعاعی) زائل شده و تأثیری بر رفتار دیوار نداشته باشند. مرزهای جانبی در راستای افقی و مرز بستر در هر دو جهت افقی و عمودی محدود شده است. برای مدل‌سازی میرایی توده خاک علاوه بر میرایی هندسی از میرایی رایلی با ضرایب α و β نیز استفاده شده است. که ضرایب میرایی رایلی از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\xi = \left(\alpha\beta\right)^{0.5} \quad (۱)$$

$$\omega_{min} = \left(\alpha / \beta\right)^{0.5} \quad (۲)$$

در روابط ۱ و ۲، ξ میرایی خاک است و ω_{min} زاویهٔ دوران حداقل است.

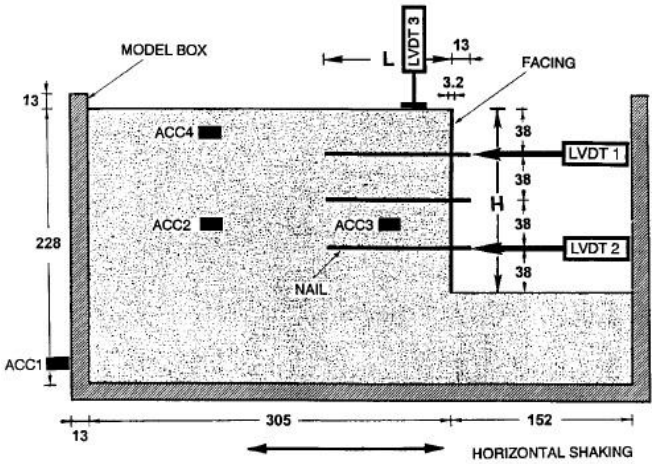
۲. صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

معمولاً در تحلیل‌های عددی برای ارزیابی صحت مدل‌سازی از نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از دو آزمایش کوچک مقیاس سانتریفیوژ دینامیکی و میز لرزان صحت فرضیات در نظر گرفته شده و مدل‌سازی ارزیابی شده است.

الف) آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی

آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی بررسی شده به‌وسیلهٔ توفنکجیان و ویوستیک (۱۹۹۰) بر مدل‌های مختلف برای بررسی گوهٔ گسیختگی محتمل صورت گرفته است. در آزمایش سانتریفیوژ مدل‌های ساخته شده در معرض شتاب زاویه‌ای با بزرگی ۵۰ برابر شتاب گرانش قرار گرفته‌اند، بنابراین ضریب مقیاس ۵۰ در نظر گرفته می‌شود. هندسهٔ آزمایش و محل ابزار دقیق در شکل ۱ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]



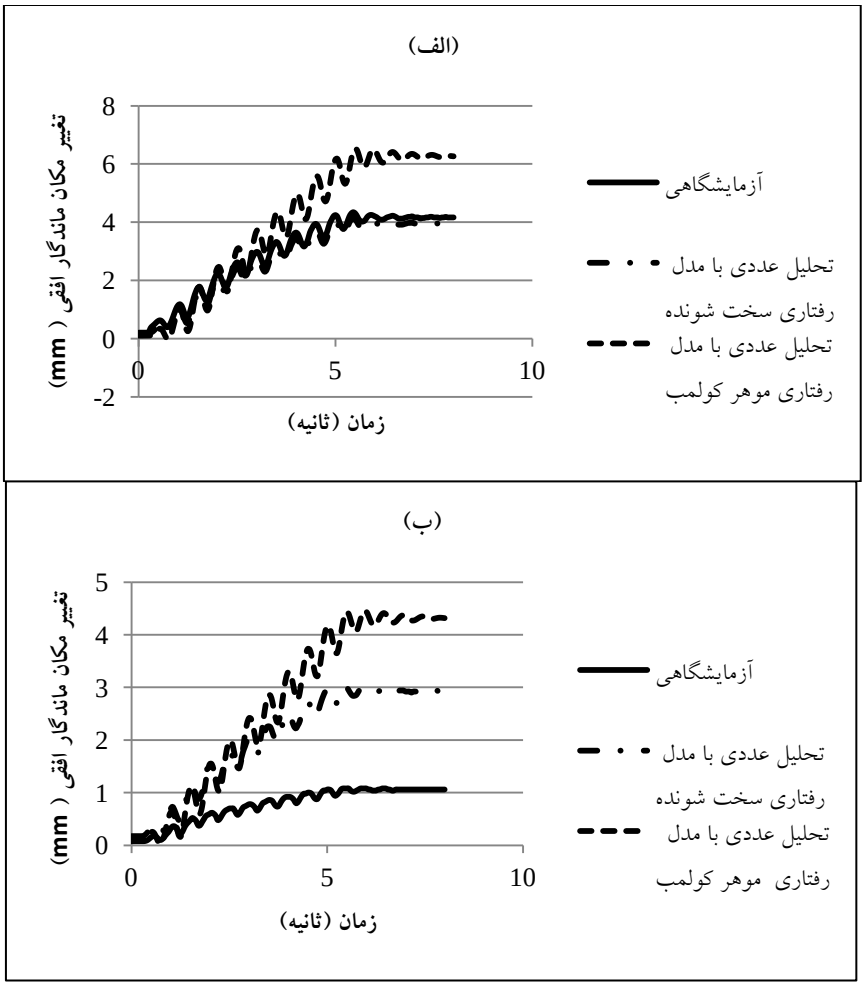
شکل ۱. هندسه آزمایش سانتریفیوژ [۳]

شتاب وارده به مدل، به‌صورت سینوسی با ۱۰ سیکل و شتاب حداکثر g ۰/۲۸ است. مشخصات مدل آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی عبارت‌اند از: ارتفاع دیوار مدل آزمایشی ۱۵۲ میلی‌متر معادل با دیواری به ارتفاع ۷/٦ متر، نوع خاک ماسه لای‌دار، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ۳٦ درجه، چسبندگی خاک kPa ۷/۲، مدول الاستیسیته خاک MPa ۲۰، وزن مخصوص خاک خشک kN/m3 ١٤، رطوبت خاک ۷/۵٪، وزن مخصوص مرطوب خاک kN/m3 ۱۵/۰۵، نسبت طول میخ به ارتفاع دیوار ۰/٦۷، ضرایب جرم و سختی میرایی رایلی به‌ترتیب ٤/٤ و ۰/۰۰٦.

آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی با ابعاد واقعی مدل‌سازی و تحلیل شده است. رفتار خاک با هر دو مدل رفتاری موهر-کولمب و سخت شونده مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش در شکل ۲ آورده شده است. در این شکل جابه‌جایی افقی در محل LVDT1 و LVDT2 و نشست در محل LVDT3 ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌گردد که برای جابه‌جایی افقی در محل میخ ردیف بالا نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی تقریباً در یک محدوده است ولی در محل میخ ردیف پایین نتایج تحلیل عددی بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. نتایج نشست نیز تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. هم‌چنین با مقایسه نتایج دو مدل رفتاری بررسی شده، نتیجه می‌شود که مدل رفتاری سخت

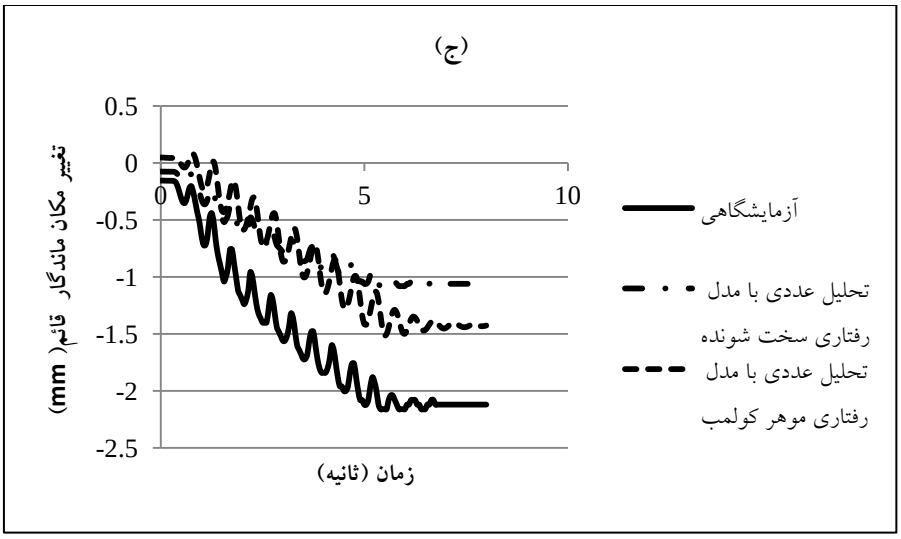
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

شونده برای شبیه‌سازی رفتار خاک نسبت به مدل موهر-کولمب مناسب‌تر است. مزیت مدل خاک سخت‌شونده نسبت به مدل موهرکولمب، وابستگی سختی به سطح تنش است. بدین‌صورت که این مدل، افزایش سختی را متناسب با میزان افزایش تنش در نظر می‌گیرد. با توجه به مزایای مدل سخت‌شونده برای خاک و تطابق بهتر این مدل رفتاری با نتایج آزمایشگاهی، در ادامه از مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است.



شکل ۲. الف) تغییر مکان میخ‌های ردیف بالا (LVDT1)، ب) تغییر مکان میخ‌های ردیف پایین (LVDT2)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]



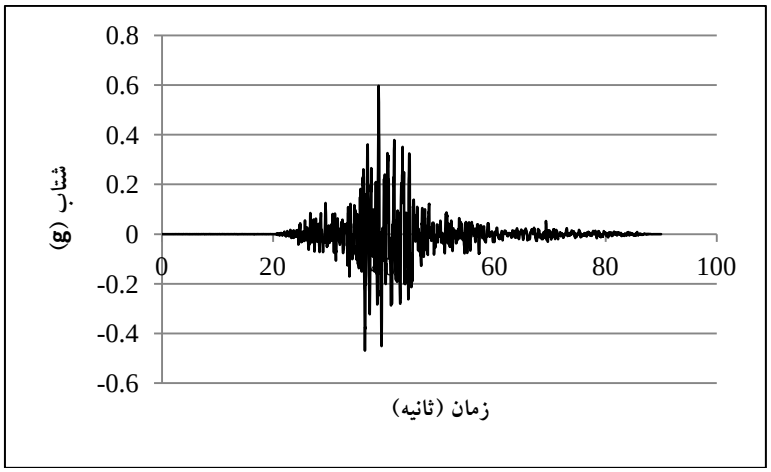
شکل ۲. الف) تغییر مکان میخ‌های ردیف بالا (LVDT1) ب) تغییر مکان میخ‌های ردیف پایین (LVDT2) ج) نشست بالای دیوار (LVDT3).

ب) آزمایش میز لرزان

دومین آزمایش دینامیکی که به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی عددی استفاده شده است، آزمایش میز لرزان است. ضریب بزرگ‌نمایی (λ) در این آزمایش برابر ۸/۵۷ است. برای ارزیابی مدل‌سازی، تحلیل با ابعاد واقعی دیوار انجام شده و با توجه به نتایج ارزیابی‌های آزمایش سانتریفیوژ، در این مدل‌سازی فقط از مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است. در آزمایش میزلرزان از شتاب‌نگاشت زلزله چی‌چی (شکل ۳) استفاده شده است. در این بررسی شتاب نگاشت زلزله چی‌چی به‌طور متوالی با شتاب حداکثر ۰/۰۹۸، ۰/۲۲۱، ۰/٤٧٤ و ۰/٦٤٥ برابر شتاب گرانش زمین به مدل اعمال شده است.

مشخصات مدل در آزمایش میز لرزان عبارت‌اند از: ارتفاع مدل ۰/۷ m معادل با دیواری با ارتفاع ٦ m ، وزن مخصوص خشک خاک (γ) ۱۵ kN/m^3، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (ϕ) ٤۱/۱ درجه، مدول الاستیسیته خاک (E) ٤۹/۵ MPa، نسبت میرایی خاک (ξ) ۷٪، سختی محوری میخ‌ها ۳۰۰۰۰۰ kN، فاصلهٔ افقی و عمودی میخ‌ها به‌ترتیب ۱۱۵ mm و ۱٤۰ mm. ضرایب میرایی رایلی α و β به‌ترتیب مقادیر ۳/٦٦ و ۰/۰۰۱۳ در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]



شکل ۳. شتاب نگاشت زلزله چی‌چی بدون اعمال ضریب بزرگ‌نمایی[۹]

نتایج تحلیل عددی و اندازه‌گیری تغییر مکان افقی ماندگار در ارتفاع دیوار به‌ازای سه مقدار شتاب ورودی در مقیاس واقعی در شکل ٤ مقایسه شده است. چنان‌که در شکل ٤ ملاحظه می‌شود تا سطح شتاب g ٤٤٧/. روند و مقادیر پیش‌بینی شده برای تغییر شکل دیوار، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. به‌ازای شتاب g ۰/٦٤٥ مقدار تغییر شکل در بالای دیوار به‌خوبی پیش‌بینی شده است ولی روند تغییر شکل پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در وسط دیوار متفاوت است.

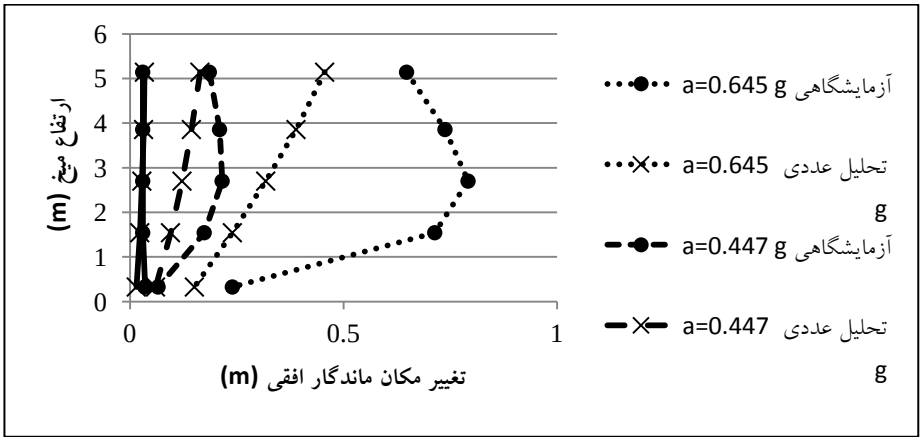
پس از مدل‌سازی و مقایسه نتایج تحلیل عددی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی دو آزمایش دینامیکی، نتیجه می‌شود که نتایج حاصل از تحلیل عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که دلیل بر صحت عملکرد مدل‌سازی است، هم‌چنین با مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با تحلیل عددی در آزمایش سانتریفیوژ نتیجه شده است که مدل رفتاری سخت‌شونده، رفتار خاک را دقیق تر از مدل موهر کولمب شبیه‌سازی می‌کند.

طراحی مدل‌ها

در این قسمت مدل عددی تشریح شده در بخش قبل که صحت نتایج آن با دقت خوبی تأیید شد، به‌منظور تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. برای این منظور تأثیر پارامترهای مختلفی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

از قبیل فاصله، چیدمان و طول میخ‌ها و ارتفاع دیوار بر تغییر مکان لرزه‌ای دیوار میخ‌کوبی شده بررسی شده است.



شکل ٤. نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی آزمایش میز لرزان

به‌منظور بررسی پارامترهای ذکر شده در شرایط یک‌سان، طول میخ‌ها بر اساس حداقل ضریب اطمینان لرزه‌ای برای پایداری کلی دیوارهای میخ‌کوبی شده دائم که در آئین‌نامه FHWA مقدار ۱/۱ ذکر شده است، آنالیزهایی روی تمامی مدل‌های مختلف مفروض، در نرم‌افزار تعادل حدی Geoslope انجام شده است. پس از تعیین طول میخ‌ها برای مدل‌های بررسی شده، تحلیل‌های لرزه‌ای با نرم‌افزار المان محدود Plaxis انجام شده است.

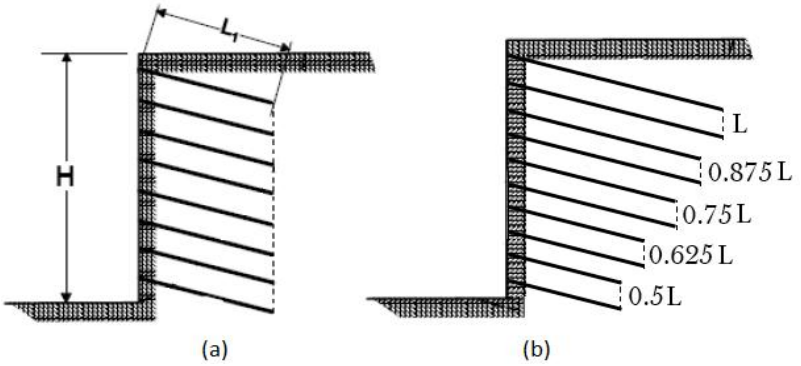
پارامترهای متغیر مدل‌ها

فاصله میخ‌ها: چیدمان میخ‌ها معمولاً به سه صورت مربع (مستطیل)، شطرنجی و یا نامنظم است. ولی به‌طورکلی تفاوتی از نظر مدل‌سازی و نتایج آن، بین دو چیدمان مربعی و شطرنجی وجود ندارد. در این تحقیق چیدمان مربعی است و از شبکه ۱/۵ m ×۱/۵ m و ۲ m ×۲ m استفاده شده است.

چیدمان و طول میخ‌ها: انتخاب طول میخ‌ها در دیواری میخ‌کوبی شده می‌تواند یک‌نواخت (در تمام ارتفاع دیوار از یک طول استفاده شود) یا متغیر باشد، به این معنی که در مناطق و ترازهای مختلف از طول‌های متفاوتی استفاده شود. در این تحقیق چیدمان یک‌نواخت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

(a) و چیدمان (b) که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بررسی شده است. طول میخ‌ها در چیدمان (b) از بالا به پایین با نسبت‌های ۱، ۰/۸۷۵، ۰/۷۵، ۰/۶۲۵ و ۰/۵ کاهش می‌یابد. در نرم‌افزار تعادل حدی GeoSlope، برای تمامی مدل‌ها ضریب اطمینان لرزه‌ای ۱/۱ برای پایداری کلی ملاک قرار داده شده و با توجه به تقسیم‌بندی طول میخ‌ها در چیدمان (a) و (b) با انجام آنالیز برای هر مدل، طول میخ‌ها به‌دست آمده‌اند.



شکل ۵. چیدمان مختلف طول میخ‌ها

ارتفاع دیوار: برای بررسی تأثیر ارتفاع دیوار در رفتار و عملکرد دیوار سه ارتفاع ۲۰،۱٤ و ۲٦ متری در آنالیزها در نظر گرفته شده است.

فرضیات مدل‌سازی

دیوار میخ‌کوبی شده به‌صورت دو بعدی (کرنش مسطح)، در نرم‌افزار Plaxis مدل‌سازی شده است. میخ‌ها با طول‌های متفاوت و زوایای ۱۵ درجه نسبت به افق هستند. در این مدل‌سازی قطر گمانه ایجاد شده برای نصب میخ‌ها ۱۰۰ mm در نظر گرفته شده که در وسط آن میل‌گرد فلزی با قطر ۳۲ mm قرار می‌گیرد. میخ‌های ردیف اول و آخر در فاصلهٔ یک متری از بالا و پایین دیوار قرار گرفته‌اند. طبق توصیهٔ آیین‌نامه FHWA، ضریب اطمینان سطح تماس خاک و دوغاب برابر ۱/۵، مقدار مقاومت باند ۲۰۰ kPa و ضریب اطمینان در برابر گسیختگی کششی میخ برای بارهای دینامیکی برابر ۱/۳۵ است.

با توجه به این‌که میل‌گردهای فولادی مفروض قطر ۳۲ mm دارد و مقاومت تسلیم آن‌ها ٤۰۰۰ kg/cm^2 است، ظرفیت کششی آرماتور فولادی ۳۲۲ kN به‌دست می‌آید. مشخصات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

خاک، میخ‌ها و پوشش شاتکریتی در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول پارامترهای EA و EI میخ بر اساس مدول الاستیسیته معادل محاسبه شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک، پوشش دیوار و میخ‌ها

خاک	پارامتر	
۱۹ KN/m^3	γ	وزن مخصوص
۷۰۰۰۰ KPa	E	مدول الاستیسیته
۰/۲	υ	نسبت پواسون
۲۵ KPa	c	چسبندگی
۳۶°	ϕ	زاویهٔ اصطکاک
۱۰°	ψ	زاویهٔ اتساع
رویه شاتکریت		
۲٤ KN/m^3	γ	وزن مخصوص
۲۱۰۰۰۰۰ KPa	E	مدول الاستیسیته
۲۱۰۰۰۰۰ KN/m	EA	سختی محوری
۱۷٤ KN m^2/m	EI	سختی خمشی
۰/۱ m	d	ضخامت رویه
۰/۲	υ	نسبت پواسون
میخ‌ها		قطر مجموعه میخ و دوغاب ۱۰ cm
۳۲ mm	d	قطر میخ
۲۰۰ GPa		مدول الاستیسیته میخ
۲۲ GPa		مدول الاستیسیته دوغاب
۳۱۵۹۰۰KN/m	EA	سختی محوری
۱۹۷ KN m^2/m	EI	سختی خمشی
۰/۲	υ	نسبت پواسون

با توجه به این که در تحلیل‌های اجزای محدود شتاب زلزله به‌صورت افقی وارد شده است، در آنالیزهای تعادل حدی نیز فقط ضریب شتاب افقی (K_h) منظور شده است. ضریب شتاب افقی با استفاده از رابطه‌های توصیه شده در آئین‌نامهٔ FHWA (رابطه‌های ۳ و ٤)، مقدار ۰/۲ محاسبه شده است.

$$A_m = (1.45 - a_{max}) \cdot a_{max} \quad (۳)$$

$$K_h = 0.5\, A_m \quad (٤)$$

پس از تعیین طول میخ‌ها، طرح مذکور در نرم‌افزار Plaxis مدل‌سازی و تغییرمکان جانبی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

دیوار محاسبه می‌شود. با ارزیابی مدل‌سازی در بخش ۲ نتیجه شد که مدل رفتاری سخت‌شونده برای شبیه‌سازی رفتار خاک نسبت به مدل موهر کولمب مناسب‌تر است، به‌همین دلیل برای بررسی تأثیر پارامترها، از مدل سخت‌شونده استفاده شده است. مشخصات خاک، میخ و رویه در جدول ۱ آورده شده است، هم‌چنین مقادیر ضرایب جرم و سختی میرایی رایلی به‌ترتیب ۰/۳۱٤ و ۰/۰۳۲ به‌دست آمده است. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی و تعمیم نتایج حاصل از تحلیل‌ها از شتاب‌نگاشت ۷ زلزله متفاوت دور و نزدیک استفاده شده است. مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های استفاده شده

	Kocaeli	Loma prieta	Chichi	Tabas	Kobe	Loma prieta	Kobe
مدت زمان زلزله[1] (s)	۲۷	٤۰	۱۰٥	۲٤	٤۱	۳۸	۷۸
شتاب حداکثر[2] (m/s^2)	۰/۳٥۸	۰/۳٦۷	۰/۳٦٤	۰/۳۲۸	۰/۳۷۱	۰/۲۳٦	۰/۱٤۸
بزرگی[3]	۷/٤	٦/۹	۷/٦	۷/٤	٦/۹	٦/۹	٦/۹
فرکانس[4] (Hz)	۳/٥	٥	۱/٥	٥	۳/٥	٥/٥	٦
شدت ارياس[5] (m/s)	۱/۳۲۹	۱/۳٤۸	۲/۰۳۳	۱/٤۲۳	۱/۳۲٤	۱/۲۱٤	۱/۱٥٦
فاصله تا گسل (Km)	۱۲/۷	۱۲/۷	۱٤/۹۳	۱۷	۱۱/۱	٦٤/٤	۹٤/۲

نتایج تحلیل‌ها

در جدول ۳ نتایج حاصل از همه آنالیزهای انجام شده (شامل ۸٤ حالت مختلف) به‌صورت نسبت تغییر مکان افقی ماندگار در بالای دیوار به ارتفاع دیوار ارائه شده و در ادامه به بررسی اثر پارامترهای مختلف پرداخته شده است.

بررسی اثر فاصله میخ‌ها

در همه مدل‌ها مشاهده شد با افزایش فاصله میخ‌ها، تغییر مکان کاهش می‌یابد و تغییر مکان رویه در میخ‌هایی با فاصله ۲ متر نسبت به فاصله میخ ۱/٥ متری یک‌نواخت‌تر شده است.

1. Duration
2. Peak acceleration
3. Magnitude
4. Frequency
5. Arias Intensity

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

مقایسهٔ یکی از مدل‌ها در شکل ٦ آورده شده است. دلیل کاهش تغییر مکان با افزایش فاصله میخ‌ها ناشی از آن است که در طراحی طول میخ‌ها با استفاده از نرم‌افزار تعادل حدی با ضریب اطمینان یک‌سان، با افزایش فاصلهٔ میخ‌ها، طول میخ‌ها افزایش یافته و در نتیجه طول بیش‌تری از میخ‌ها به پشت گوه گسیختگی نفوذ کرده است. این امر به‌خصوص در ترازهای بالا باعث مهار بیش‌تر قسمت فوقانی دیوار شده و تغییر مکان‌ها در ارتفاع دیوار یک‌نواخت‌تر نیز شده است.

جدول ۳. مقادیر نسبت تغییرمکان افقی ماندگار به ارتفاع دیوار.

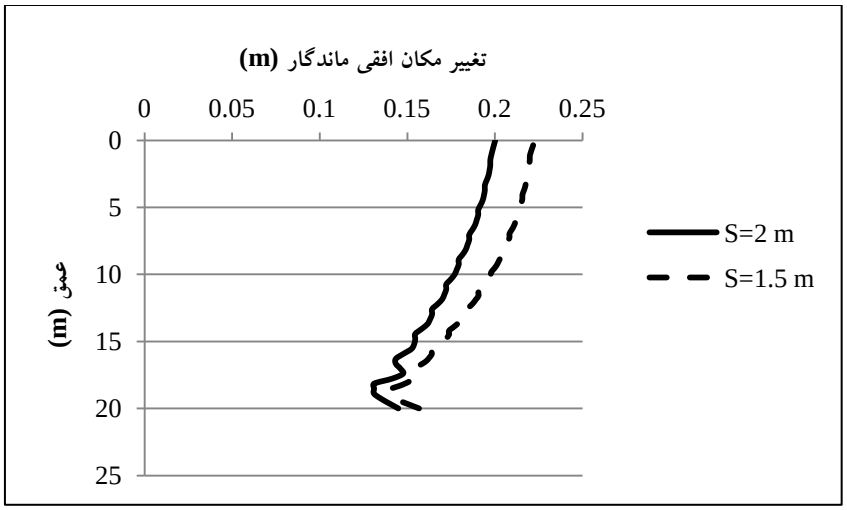
δ/H			Kobe دور	Loma prieta دور	Kobe نزدیک	Tabas	Chichi	Loma prieta نزدیک	Kocaeli
type	S (m)	H (m)							
a	۲	١٤	۰/۰۰۲۳۱٤	۰/۰۰٦۷۱	۰/۰۰۲٦٤	۰/۰۰۲۷۷۱	۰/۰۰٥٤٦۹	۰/۰۱۰۸۰۸	۰/۰۱۲۰۹
		٢٠	۰/۰۰۲۳۲۹	۰/۰۰۸۹٥	۰/۰۰۲۷٥	۰/۰۰۳٥٤۷	۰/۰۰۸۹۰٥	۰/۰۱۲۳۷۳	۰/۰۱٤۰۰
		٢٦	۰/۰۰۲٤۸٥	۰/۰۱۰۱٥	۰/۰۰۳	۰/۰۰٤۲	۰/۰۱۰۷٦٥	۰/۰۱۳۱۱۱	۰/۰۱٤۹۰
	۱/٥	١٤	۰/۰۰۲٥۷٤	۰/۰۰۷۱٤	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۲۰٤	۰/۰۰٦٤٦۳	۰/۰۱۱٥۲٥	۰/۰۱۲۱۲
		٢٠	۰/۰۰۲٦۱۸	۰/۰۰۹۳٥	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۹٦۹	۰/۰۱۱۰٥٤	۰/۰۱٤۳۸۷	۰/۰۱٤٥٦
		٢٦	۰/۰۰۲۹٤۳	۰/۰۱۱٤۲	۰/۰۰۳۷٦	۰/۰۰٥۳۳۱	۰/۰۱٤۹٦۲	۰/۰۱٦۱۳۱	۰/۰۱٦۱۱
b	۲	١٤	۰/۰۰۲۱٥٦	۰/۰۰٦۳٥	۰/۰۰۲٥۷	۰/۰۰۲۷۰۸	۰/۰۰٤۹٦٦	۰/۰۱۰۳٥۱	۰/۰۱۱٤۷
		٢٠	۰/۰۰۲۰۹٥	۰/۰۰۷٥	۰/۰۰۲٤	۰/۰۰۳۰۳۱	۰/۰۰٦۲۱۹	۰/۰۱۰۰۰٦	۰/۰۱۲۲۱
		٢٦	۰/۰۰۲۱۳۹	۰/۰۰۸٤۲	۰/۰۰۲٤۲	۰/۰۰۳٤۹۲	۰/۰۰۷۸۸	۰/۰۱۰۷۱٤	۰/۰۱۲۹۳
	۱/٥	١٤	۰/۰۰۲۲٦۹	۰/۰۰٦۹۲	۰/۰۰۲٦	۰/۰۰۲۷۲۳	۰/۰۰٥۰۷۳	۰/۰۰۹۷۲۱	۰/۰۱۱۲۳
		٢٠	۰/۰۰۲۲۹٦	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۳۳۳۳	۰/۰۰۷۳۹٥	۰/۰۱۱۱٤۱	۰/۰۱۲۸۷
		٢٦	۰/۰۰۲۳٤٤	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۷٤	۰/۰۰۳۷۷٥	۰/۰۰۹۳۳۲	۰/۰۱۱۹۲۷	۰/۰۱۳٦۱

بررسی تأثیر چیدمان میخ‌ها

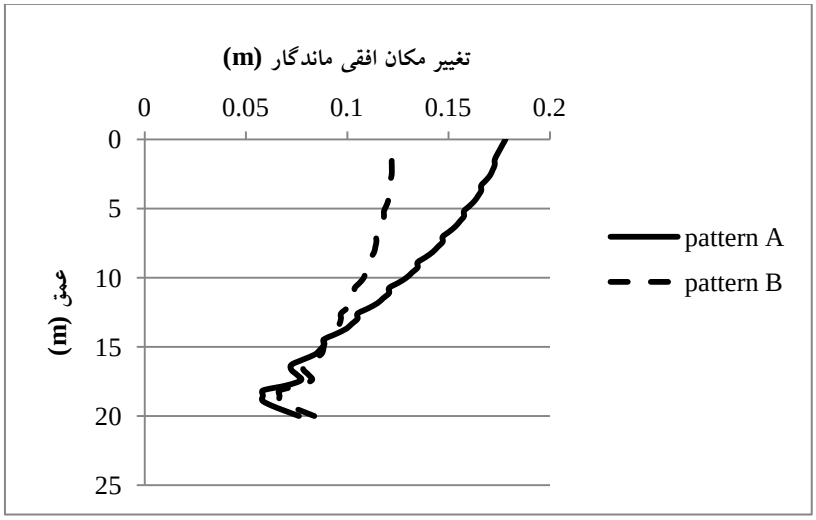
چنان‌که در شکل ۷ به‌عنوان نمونه مشاهده می‌شود، در همه مدل‌ها تغییر مکان در چیدمان (b) کم‌تر از تغییرمکان در چیدمان (a) است. دلیل این موضوع نیز به‌وضوح از نتایج حاصل برای طول میخ‌ها قابل استنتاج است. میخ‌های ردیف‌های بالا در دیوار با چیدمان (b) طول بیش‌تری داشته و در پشت گوه گسیختگی قرار می‌گیرند ولی در چیدمان (a) ردیف‌های فوقانی اکثراً داخل گوه گسیختگی قرار گرفته و نقش کمی در کاهش تغییر مکان دیوار دارند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

نتایج حاصل از آنالیزهای تعادل حدی (شکل ۸ و ۹) مؤید این مطلب است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که دیوار با چیدمان (a) تغییرمکان طره‌ای داشته و حول میخ‌های پایین دوران دارد ولی دیوار با چیدمان (b)، تغییرمکان یک‌نواخت‌تری دارد و این به‌دلیل عملکرد مهاری میخ‌های ردیف بالایی است که سبب دوران کم‌تر دیوار می‌گردد.

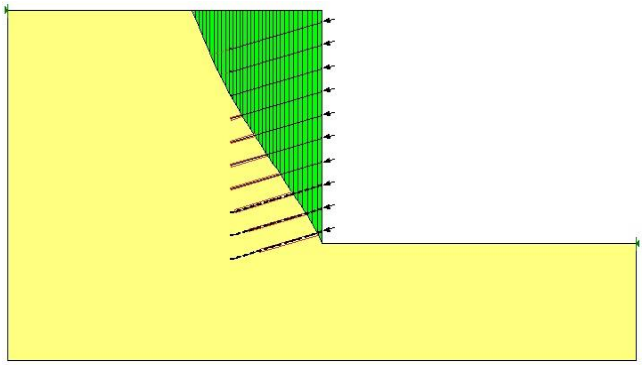


شکل ٦. نمودار تغییرمکان در عمق تحت زلزله لوماپریتا (دیوار ۲۰ متری با چیدمان (b))

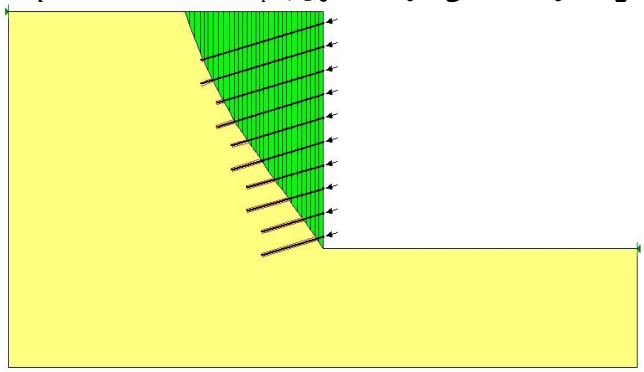


شکل ۷. نمودار تغییرمکان در عمق تحت زلزله چی‌چی (دیوار ۲۰ متر با فاصله میخ ۲ متر)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]



شکل ۸. گوه گسیختگی دیوار ۲۰ متری با چیدمان (a) و فاصله میخ ۲ متر

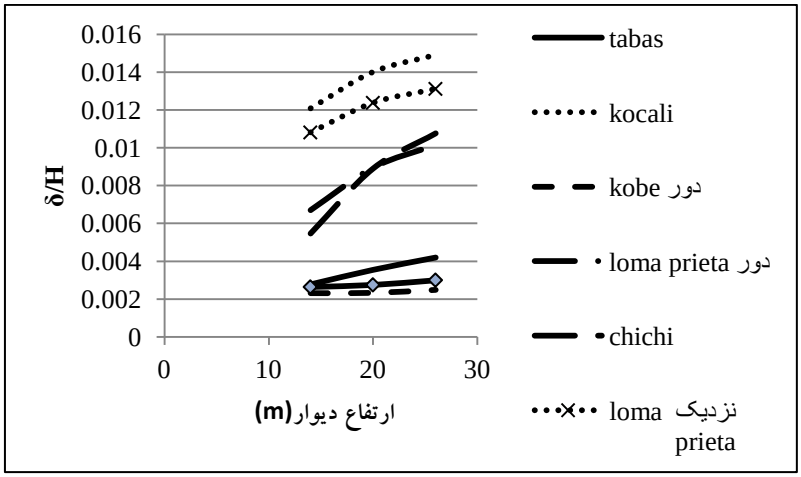


شکل ۹. گوه گسیختگی دیوار ۲۰ متری با چیدمان (b) و فاصله میخ ۲ متر

بررسی تأثیر ارتفاع دیوار

چنان‌که به‌عنوان نمونه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در همه مدل‌ها یعنی در هر چیدمان و فاصله میخ، با افزایش ارتفاع دیوار، نسبت تغییرمکان به ارتفاع دیوار (δ/H) افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در همه مدل‌ها، میزان تغییرمکان به‌ترتیب تحت زلزله‌های کجالی، لوماپریتا، چی‌چی، طبس و کوبه کاهش می‌یابد. با توجه به شتاب نگاشت‌های این زلزله‌ها، دلیل تفاوت تغییرمکان در زلزله‌های مختلف ناشی از تعداد تکرار شتاب در محدودهٔ شتاب حداکثر است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]



شکل ۱۰. نمودار تغییرمکان ماندگار نسبی نسبت به ارتفاع برای دیوارهایی با چیدمان (a) و فاصلهٔ میخ ۲ متر

بررسی اثر دانسیته میخ بر تغییر مکان افقی دیوار

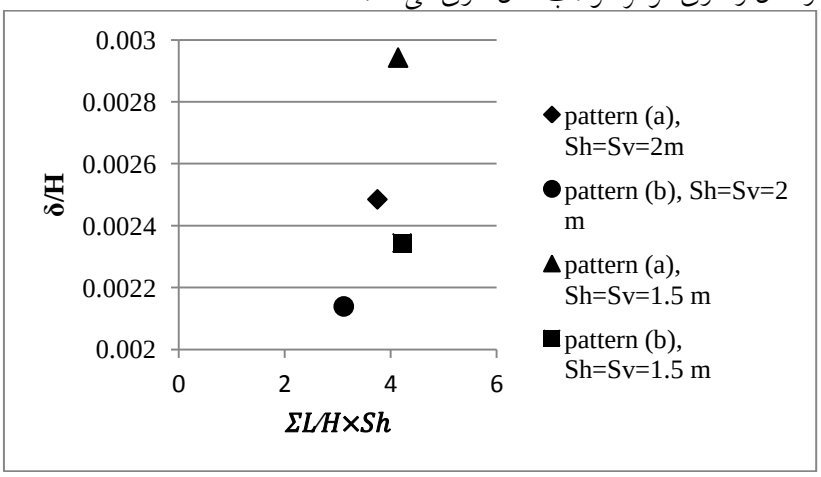
در این بخش به‌منظور بررسی اثر دانسیته میخ بر تغییرمکان افقی ماندگار در بالای دیوار و تعیین حالت بهینه نوع چیدمان و فاصلهٔ میخ، گراف‌هایی برای دیوارهایی با ارتفاع ۱۴،۲۰ و ۲۶ متری رسم شده که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۱۱ آورده شده است. در این گراف منظور از دانسیتهٔ میخ، مجموع طول میخ‌ها بر واحد مساحت ($\Sigma L/H \times S_h$) است. در همهٔ حالات که به‌عنوان نمونه گراف دیوار ۲۶ متری در این مقاله آورده شده است مشاهده شده که بهینه‌ترین حالت، دیوار با چیدمان (b) و فاصلهٔ میخ ۲ متر است و بدترین حالت از لحاظ اقتصادی (دانسیته میخ) و تغییرمکان نسبی، دیوار با چیدمان (a) و فاصله میخ ۱/۵ متر است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که برای هر دو نوع چیدمان با افزایش فاصله میخ دانسیته کاهش یافته و در نتیجه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

نتایج

مدل‌های کوچک مقیاس آزمایش سانتریفیوژ و میز لرزان، با ابعاد واقعی مدل‌سازی شده و مقایسهٔ نتایج تحلیل نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این تحلیل‌ها با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. در ارزیابی صحت مدل‌سازی از دو مدل رفتاری خاک استفاده شد، با مقایسهٔ نتایج

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

به‌دست آمده از این دو مدل رفتاری نتیجه می‌شود که مدل رفتاری سخت‌شونده، رفتار خاک را بهتر از مدل رفتاری موهر کولمب مدل‌سازی می‌کند.



شکل ۱۱. نمودار تغییرمکان نسبی دیوار نسبت به دانسیتهٔ میخ (دیوار ۲٦ متری تحت زلزله کوبه)

در این تحقیق برای بررسی اثر پارامترهای ارتفاع دیوار، فاصله میخ‌ها و نحوهٔ چیدمان میخ‌ها در تغییرمکان لرزه‌ای دیوار میخکوبی شده آنالیزهای متعددی با هفت شتاب نگاشت زلزله‌های مختلف انجام شد. تطابق نتایج حاصل از شتاب نگاشت‌های مختلف، بر جامع بودن نتایج دلالت دارد که نتایج بدین‌شرح است:

۱. با بررسی اثر فاصله میخ در مقدار تغییرمکان مشاهده می‌شود با افزایش فاصله میخ‌ها، تغییرمکان دیوار کاهش می‌یابد که دلیل این امر زیاد شدن طول میخ‌ها با افزایش فاصله آن‌ها و در نتیجه نفوذ بیش‌تر میخ‌ها به پشت گوه گسیختگی است.

۲. تغییر مکان دیوارهایی که طول میخ‌ها از بالا به پایین کاهش می‌یابد، کم‌تر از تغییر مکان دیوارهایی با طول میخ یک‌نواخت است که این امر نیز همانند بند ۱ به‌دلیل زیاد شدن طول میخ‌های ردیف فوقانی و در نتیجه نفوذ بیش‌تر میخ‌ها به پشت گوه گسیختگی در دیوار با چیدمان متغیر نسبت به دیوار با چیدمان یک‌نواخت است.

۳. نحوه تغییر مکان دیوارهایی با چیدمان یک‌نواخت به‌صورت طره‌ای است یعنی حول میخ‌های ردیف پایین دوران دارند درحالی که نحوهٔ تغییر مکان دیوارهایی با چیدمان متغیر در ارتفاع یک‌نواخت هستند. دلیل تغییر مکان یک‌نواخت دیوار با چیدمان متغیر این است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

که در این حالت میخ‌های ردیف بالا که به پشت گوه گسیختگی نفوذ کرده‌اند، مانع دوران دیوار می‌گردند.

٤. با بررسی تأثیر ارتفاع دیوار بر تغییر مکان مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع دیوار، نسبت تغییر مکان ماندگار دیوار به ارتفاع دیوار افزایش می‌یابد.

۵. با بررسی اثر دانسیته میخ مشاهده نتیجه می‌شود، بهینه‌ترین حالت میخ‌کوبی که هم تغییر مکان لرزه‌ای دیوار و هم دانسیتهٔ میخ‌کوبی حداقل باشد، استفاده از چیدمان متغیر (b) و فاصله میخ حداکثر ۲ متر است.

منابع

1. "Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls", Federal Highway Administration, Publication No.FHWA-SA-96-069R (1998).
2. "Demonstration Project 103-Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", 7 Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-99-026 (1999).
3. Vucetic M., Tufenkjian M.R., Doroudian M., "Dynamic Centrifuge Testing of Soil-Nailed Excavations", Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 2 (1993) 172-187.
4. Tufenkjian M.R., Vucetic M., "Seismic Stability of Soil-Nailed Excavations", Report No. ENG-97-169, Civil Engineering Department, University of California, Los Angeles (1993).
5. Chokeir M., "seismic Analysis of Reinforced Earth and Soil Nailed Structures", Ph.D. Thesis, New York Polytechnic University (1996).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]

6. Choukeir M., Juran I., Hanna S., "Seismic Design of Reinforced- Earth and Soil-Nailed Structures", Ground Improvement, Vol. 1 (1997) 223-238.
7. Zhang M., Song E., Chen Z., "Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)", Computers and Geotechnics, Vol. 25 (1999) 191-204.
8. Vela J.C., "Theoretical Modeling and Field Instrumentation of an Earth Retention System for Seismic Response", Ph.D. Thesis, Washington State University (2000).
9. Hong Y., Chen R, Wu C., Chen J., "Shaking Table Test and Stability Analysis of Steep Nailed Slopes, Canadian Jeotechnical Journal", Vol. 42 (2005) 1264-1279.
10. Sivakumar Babu G.L., Singh V.p. "Numerical Analysis of Performance of Soil Nail Walls in Seismic Conditions", Journal of Earthquake Technology, Paper No. 496, Vol.45, No. 1-2, March-June (2008) 31-40.
11. Chu L.M., Yin J.H., "Comparision of Interface Shear Strenght of Soil Nails Measured by Both Direct Shear Box Tests and Pull-out Tests", J. of Geotech and Geoenviron Eng, ASCE, Vol. 131, No. 9 (2005) 1097-1107.
12. Plaxis, "PLAXIS 2D: Reference Manual Version 8.0", Plaxis BV, Delft, The Netherlands (2002).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.7.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3517]