ارزیابی عددی عوامل مؤثر بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار حائل وزنی در قیاس با روش‌های تحلیلی و تجربی

سعید غفارپور جهرمی[۱] و سپیده ذوالفقار[۲*]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ، ایران
[۲] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۸)

چکیده

سادگی در ساخت و سهولت اجرایی از مهمترین مزایای کاربرد دیوارهای حائل وزنی است. یکی از موضوعات مهم در طراحی دیوارهای حائل بر اساس عملکرد، تخمین جابه‌جایی، دوران و پیش‌بینی رفتار آن تحت بار زمین‌لرزه است. پیش‌بینی مقدار جابه‌جایی و دوران ایجادشده ناشی از زمین‌لرزه، یکی از پیچیده‌ترین مراحل طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی با مصالح بنایی در مهندسی ژئوتکنیک است. این موضوع از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و محققان با ارائه روش‌های مختلف تحلیل پایداری، تغییرمکان و دوران دیوار حائل را ارزیابی می‌کنند. هدف از این تحقیق مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با دیگر روش‌های تحلیلی و تجربی استفاده شده مهندسان در طراحی بر اساس عملکرد دیوارهای حائل وزنی است. در این تحقیق دیوار حائل وزنی ذوزنقه‌ای شکل که از مصالح بنایی ساخته شده است به روش عددی و با مدلسازی در نرم‌افزار آباکوس تحت تأثیر نیروی زمین‌لرزه قرار گرفته و تأثیر عوامل مختلف بررسی می‌شود. میزان و شدت تغییرمکان و جابه‌جایی دیوار ناشی از زمین‌لرزه در تراز بالادست و پایین‌دست امتداد قائم دیوار استخراج شده و متعاقب آن میزان و نحوه دوران لرزه‌ای دیوار ارزیابی و تخمین زده می‌شود. در ادامه نتایج این بررسی با داده‌ها و روابط تجربی و تحلیلی دیگر محققان مقایسه شده است. در این بررسی پارامترهای مختلف تحت زمین‌لرزه‌ای مشخص ارزیابی شده است که شامل تأثیر اصطکاک کف دیوار، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز پشت دیوار و همچنین هندسه دیوار شامل قاعده کف و ارتفاع دیوار است؛ هرچند شدت و مدت زمین‌لرزه نیز بسیار تاثیرگذار است.

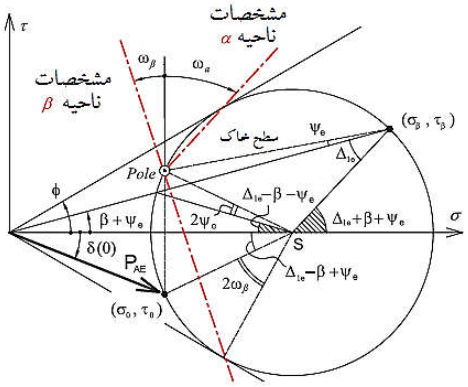
واژه‌های کلیدی: دیوار حائل وزنی، رفتار لرزه‌ای، جابه‌جایی لرزه‌ای، دوران لرزه‌ای، روش عددی، روش تحلیلی

* نگارنده رابط: Saeed_ghf@sru.ac.ir

۱ مقدمه

دیوار حائل نوعی دیوار است که تکیه‌گاه جانبی برای جداره‌های قائم و یا متمایل به قائم برای خاک ایجاد می‌کند. سادگی ساخت و سهولت اجرا از مزایای استفاده از دیوارهای حائل وزنی است. پیش‌بینی جابه‌جایی و دوران ایجاد شده در اثر زمین‌لرزه، نکته‌ای مهم در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی و طراحی بر اساس عملکرد است. پاسخ دینامیکی دیوارهای حائل حتی در ساده‌ترین نوع، پیچیده است و میزان جابه‌جایی دیوار و فشار وارد بر آن، به اندرکنش خاکریز پشت دیوار حائل، مشخصات خاک زیر پِی دیوار، سختی، مصالح دیوار و همچنین طبیعت جنبش زمین بستگی دارد. با توجه به محدودیت اطلاعات از رفتار واقعی دیوار حائل بر اساس اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات محلی، اکثر مطالعات بر روی مدل‌های آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. حرکت دیوارها به صورت جابه‌جایی (تغییرمکان) یا دوران است که مقدار نسبی هر یک به انعطاف‌پذیری دیوار بستگی دارد. هر یک از حالات مذکور ممکن است به تنهایی یا به‌صورت هم‌زمان رخ دهد. مقدار و نحوه توزیع فشار دینامیکی خاکریز پشت دیوار بر حسب نحوه ارتعاش حرکت دیوار نظیر تغییر مکان، دوران حول قاعده یا دوران حول بخش فوقانی متفاوت است. در این راستا نقطه اثر برآیند رانش خاک بر دیوار در خلال اعمال بارهای لرزه‌ای نسبت به حالت استاتیکی به سمت بالا و پایین حرکت می‌کند. رانش دینامیکی متأثر از اندرکنش دینامیکی دیوار و خاکریز پشت بوده و مقدار جابه‌جایی افقی دیوار در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم خاک و دیوار، با توجه به وقوع پدیده تشدید به مقدار مطلوبی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که جابه‌جایی مذکور ممکن است پس از یک دوره جنبش نیرومند زمین به‌صورت تجمعی بر دیوار حائل مدنظر باقی بماند که رانش ماندگار نامیده می‌شود.

برای تحلیل لرزه‌ای دیوار حائل می‌توان از روش نیرو شامل شبه‌استاتیکی و شبه‌دینامیکی و روش مبتنی بر تغییرمکان بر پایه تئوری بلوک لغزان نیومارک و یا روش‌های عددی استفاده کرد. دیوارهای حائل وزنی متشکل از مصالح سنگی، آجری یا بتن غیر مسلح از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین نوع سازه‌های حائل شناخته می‌شوند. این دیوارها با توجه به شکل، ابعاد هندسی و مصالح از وزن مطلوبی برخوردارند که عامل اصلی پایداری آنها در مقابل فشارجانبی خاک است. تحلیل و طراحی دیوارهای حائل در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (دینامیکی)، لازم است در دو مرحله تحلیل پایداری (کنترل واژگونی و لغزش) و تحلیل تغییرمکان (جابه‌جایی و دوران) انجام شود. در این روش‌های تحلیل، تأثیر عوامل مختلفی چون مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، هندسه دیوار و مشخصات لرزه‌ای زمین‌لرزه اجتناب ناپذیر است. بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی در ارزیابی لرزه‌ای نشان داده است مقادیر نسبی جابه‌جایی و دوران دیوار به عوامل فوق بستگی دارد که برای برخی دیوارها ممکن است یکی از آنها غالب باشد و برای برخی دیگر هر دو ممکن است غالب و بارز باشد. کارآیی دیوار حائل پس از زمین‌لرزه به مقدار زیادی تابع تغییرشکل‌های آن در زمان وقوع زمین‌لرزه است. برخی دیوارها، تغییر مکان‌های زیادی را می‌توانند تحمل کنند اما برخی دیگر ممکن است با تغییر مکان‌های کوچک دچار گسیختگی شوند. در این تحقیق با انتخاب چند هندسه غالب و رایج از دیوارهای حائل وزنی با مصالح بنایی و به روش عددی در نرم‌افزار المان محدود، ارزیابی لرزه‌ای رفتار دیوار در خاکریز دانه‌ای برای چند نوع خاک بررسی شده است. در این بررسی تأثیر عوامل مختلف شامل نوع زمین‌لرزه، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز و خاک بستر و همچنین هندسه دیوار ارزیابی شد.



شکل ۱. تانسور تنش‌های لرزه‌ای رانکین.

۲ بررسی تحقیقات گذشته

تا کنون روش‌های متعددی توسط محققان مختلف برای تخمین جابه‌جایی انتقالی و دورانی دیوارهای حائل در برابر بارهای زمین‌لرزه، پیشنهاد و توسعه داده شده است. مهمترین عامل در طرح و محاسبه دیوار حائل، شناسایی و برآورد مناسب نیروی ناشی از فشار جانبی خاک بر آن است. کنترل پایداری در برابر واژگونی، لغزش و فشار وارد بر پنجه دیوار، به شناخت دقیق این نیرو و محل نقطه اثر آن بستگی دارد. محاسبه فشار جانبی زمین‌لرزه و نقطه اثر آن همواره یکی از موضوعات مهم در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. بی‌توجهی به تحلیل و طراحی مناسبِ دیوارهای حائل وزنی تحت بار زمین‌لرزه، سبب شده است خسارات بسیاری به این دیوارها در زمان زمین‌لرزه وارد شود لذا توجه محققان به توسعه روش‌های طراحی لرزه‌ای، اهمیت دو چندانی پیدا کرده است. از خرابی‌های رایج این دیوارها پس از زمین‌لرزه، جابه‌جایی بسیار زیاد و غیر متعارف و همچنین دوران بیش از حد دیوار از امتداد قائم است که باعث شده در شرایط بهره‌برداری، دیوار ناپایدار و بی‌استفاده باشد.

از گذشته‌های دور، تئوری کولمب (۱۷۷۶) و رانکین (۱۸۵۷) در تحلیل پایداری استاتیکی دیوارهای حائل، توسط مهندسان بسیاری استفاده شده است. در این دو نظریه، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، هندسه خاکریز، هندسه دیوار و سربار روی خاکریز در تحلیل و طراحی فاز ژئوتکنیکی و فاز سازه‌ای دیوار حائل دخالت دارند. در تحلیل لرزه‌ای، روش مونونوبه (۱۹۲۹) از توسعه تئوری نظریه کولمب ارائه گردیده است، همچنان به‌طور گسترده‌ای توسط مهندسان برای تحلیل لرزه‌ای دیوارهای حائل و تعیین فشار جانبی خاک در زمان زمین‌لرزه استفاده می‌گردد. بر اساس این تئوری، فشار جانبی محرک خاک، در زمان زمین‌لرزه در قیاس با قبل از آن، تابع شتاب افقی و شتاب قائم زمین‌لرزه نیز هست. از جمله محدودیت‌های این روش ارائه نکردن توزیع فشار جانبی خاک است.

$$\omega_\beta \le \omega_{cr} = tan^{-1}\left(\frac{b_1}{H} + tan\,\omega_1\right), \qquad (۱)$$

$$\omega_\beta = \frac{\pi}{4} \quad \frac{\varphi}{2} \quad \frac{(\ _{1e}-\beta)}{2} \quad \frac{\Psi_e}{2}. \qquad (۲)$$

نیومارک و همکارانش (۱۹۶۵)برای نخستین بار، روش بلوک لغزان را برای محاسبه تغییرمکان و جابه‌جایی شیب‌های خاکی ارائه داد. وی با مطرح کردن مفهوم شتاب بحرانی گسیختگی و تسلیم بیان کرد که جابه‌جایی نسبی یک دیوار صلب و توده خاک زیر آن از لحظه‌ای که شتاب زمین‌لرزه از شتاب بحرانی گسیختگی بیشتر گردد تا زمانی‌که دارای سرعت یکسانی شوند، روند افزایشی خواهد داشت.

المس و ریچارد (۱۹۷۹) با پی بردن به اثر اینرسی دیوار در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی به این نتیجه رسیدند که حتی در حرکات آرام زمین، جابه‌جایی خاکریز پشت دیوار قطعی است. اینکه جابه‌جایی به چه میزان خواهد بود و چگونه می‌توان یک دیوار را بر مبنای کنترل تغییر مکان طراحی کرد از مهمترین سؤال‌های مهندسین در آن زمان بوده است. اولین ایده برای کنترل میزان جابه‌جایی، ایجاد گیرداری اضافی در دیوار است

که یا بسیار پرهزینه است، یا در عمل غیرممکن. از طرفی روش‌های شبه‌استاتیکی مثل مونونوبه و اکابه، جواب‌گوی ایمنی کامل دیوارهای حائل در برابر زمین‌لرزه نبودند. این دلایل برای المس و همکارانش کافی بود تا به دنبال روشی نوین در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل باشند. بر این اساس آنها با توسعه روش نیومارک، روش طراحی بر مبنای تغییرمکان محدود را معرفی کردند که بر اساس مفهوم تغییرمکان‌های تدریجی و ماندگار بلوک لغزان نیومارک استوار است.

ندیم و ویتمن (۱۹۸۳) روش دیگری را جهت طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل ثقلی معرفی کردند که اساس آن تخمین جابه‌جایی دائم دیوار در حین زمین‌لرزه، با در نظر گرفتن اثر حرکت زمین است. بر مبنای این مطالعه، تشدید حرکت در خاکریز پشت دیوار نقش مهمی را در مقدار تغییرمکان دائمی دیوار ایفا می‌کند. در ادامه این تحقیقات،ویتمن و لیائو (۱۹۸۵)به ارزیابی روش بلوک لغزان معرفی شده توسط المس و ریچارد پرداختند. نتیجه این بررسی نشان داد در روش فوق خطاها و محدودیت‌هایی وجود دارد که شامل لحاظ نکردن پاسخ دینامیکی خاکریزی، بی‌توجهی به عوامل سینماتیکی، فراموش کردن مکانیسم چرخشی و توجه نکردن به مؤلفه شتاب قائم در بروز جابه‌جایی‌های ماندگار بزرگ می‌شود. هنگامی که تأثیر مؤلفه شتاب قائم در نظر گرفته شد، به طورکلی مکانیسم چرخش دیوار در میزان جابه‌جایی و انتقال افزایش بیشتری در قیاس با روش ریچارد و همکارانش داشت.

اسکود و استیدمن (۱۹۹۸)، رویکرد جدیدی برای طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل پیشنهاد کرد که در آن رفتار لرزه‌ای و میزان جابه‌جایی دیوارهای حائل حین زمین‌لرزه، نسبت به میزان تنش‌ها و مقادیر نیروها در تحلیل و طراحی دیوار ارجحیت بیشتری داشت. اما این روش شبه‌استاتیکی با رفتار واقعی دیوار و جابجایی‌های دورانی آن در حین زمین‌لرزه، انطباق خوبی نشان نداد. همچنین محققان دیگری نظیر اینگ‌وی و شامشه (۲۰۱۱) روشی پیشنهاد دادند که در آن، به طراحی دیوارهای حائل وزنی و صلب تحت بار زمین‌لرزه بر مبنای تحلیل تغییر مکان پرداختند. این روش در حقیقت توسعه روش ویتمن و لیائو در تحلیل جابه‌جایی دیوارهای حائل بود که در آن به روش تحلیلی بر مبنای روابط تعادلی دینامیکی و با درنظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، جابه‌جایی و دوران محاسبه‌پذیر بود.

چودهاری و نیمبلکار (۲۰۰۸) روشی شبه‌دینامیکی برای محاسبه فشار فعال خاک در شرایط زمین‌لرزه با لحاظ نمودن اثرات دینامیکی ارائه کردند. آنها در این پژوهش که به روش شبه‌دینامیکی بود، از روش تحلیلی اسکود و استیدمن نیز استفاده نمودند. در این روش به ارزیابی دوران و جابه‌جایی دیوار توجه کافی نشده است.

در بررسی این تحقیقات، بازیار و رابطی‌مقدم (۲۰۱۰) به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی، دو نمونه دیوار حائل را در مقیاس آزمایشگاهی با آزمایش سانتریفیوژ بررسی و نتیجه حاصل را به روش عددی در نرم‌افزار المان محدود FLAC 2D، مدلسازی کردند. نتایج این بررسی نشان داد تغییرمکان ماندگار دیوارهای حائل که شامل لغزش، دوران، نشست کف دیوار و نشست خاکریز است، با به‌کاربردن مدل رفتاری مناسب، انطباق اطمینان‌بخشی با شبیه‌سازی سانتریفیوژ دارد.

کروبا و پاوانلو (۲۰۱۱) با استفاده از روش بلوک لغزشی نیومارک، نتایج حاصل از این روش در پیش‌بینی جابه‌جایی ۳۸ دیوار حائل وزنی (به‌صورت مطالعه موردی) را در زمان زمین‌لرزه محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده پس از زمین‌لرزه مقایسه کردند. نتیجه این تحقیق توسعه بلوک لغزشی نیومارک و ارائه رابطه تجربی برای دیوارهای حائل وزنی بر اساس مشخصات هندسی دیوار و زمین‌لرزه بود.

مداح و همکارانش (۲۰۱۳) با توسعه روش بلوک لغزشی نیومارک، به معرفی فاکتور منحصر به فردی در طراحی دیوار پرداختند که برای ارزیابی جابه‌جایی بالا و پایین دیوار در روش‌های عددی مناسب است. در این تحقیق تأثیر ارتفاع دیوار بر میزان دوران لرزه‌ای یک دیوار حائل وزنی، در خاک ماسه‌ای بسیار محسوس گزارش شد به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع دیوار، دوران کاهش می‌یافت.

کمال محمد (۲۰۱۵) با شبیه‌سازی بار لرزه‌ای در نرم افزار اجزای محدود پلکسیس، از تحلیل عددی در شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده کرد تا در آن جابه‌جایی دیوار در مرزهای پایین با خاک ارزیابی شود. با درنظر گرفتن اثرات انعکاس امواج و استفاده از معیار مور-کولمب به‌صورت الاستوپلاستیک برای خاک و به‌صورت الاستیک و صلب برای دیوار، تحلیل عددی‌دینامیکی غیرخطی و همچنین روش شبه استاتیکی انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد سختی خاک (مدول یانگ) نیز بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای تاج دیوار تأثیر بسزایی دارد به‌طوری‌که با افزایش مدول یانگ خاک، جابه‌جایی تاج دیوار کاهش می‌یابد.

شی و همکارانش(۲۰۱۶)، در ارزیابی دوران دیوارهای حائل وزنی در زمان زمین‌لرزه، تأثیر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در خاکریز را تحقیق کردند. در این روش با توسعه بلوک لغزشی نیومارک بر مبنای تنش مؤثر و با لحاظ کردن فشار آب حفره‌ای، جابه‌جایی و دوران دیوار حائل وزنی، در زمان زمین‌لرزه بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که اثر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در خاک‌های اشباع، بسیار محسوس بوده و نمی‌توان از اثر آنها صرف‌نظر کرد. پین و همکارانش(۲۰۱۶) تلاش کردند دوران ناشی از زمین‌لرزه در دیواهای حائل وزنی را به روش شبه‌دینامیکی مطالعه کنند. نتیجه این تحقیق که بر روی خاکریزهای خشک انجام شده است نشان داد مشخصات زمین‌لرزه ورودی تأثیر بیشتری بر دوران لرزه‌ای در مقایسه با مشخصات هندسی و فیزیکی و مکانیکی خاکریز دارند.

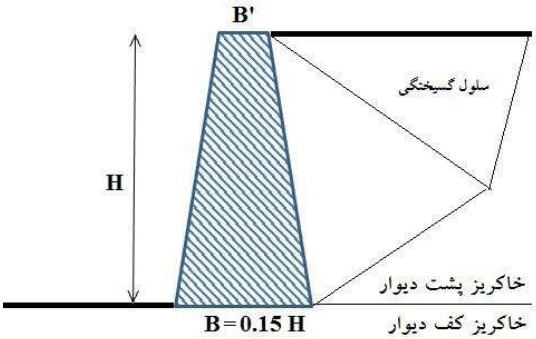
۳ بررسی روابط تحلیلی و تجربی

دیوارهای وزنی جزء قدیمی‌ترین سازه‌های نگهدارنده خاک هستند و طراحی آنها تحت بار ثقلی از منظر مهندسی نسبتاً کار راحتی است. مشاهدات پس از زمین‌لرزه و نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند پیش‌بینی جابه‌جایی‌های ماندگار و حالت شکست غالب تحت بار زمین‌لرزه هنوز دغدغه‌ای جدی برای روش‌های طراحی و تحلیلی حال حاضر است. در حالی که مهندسان می‌توانند با دانستن میزان جابه‌جایی‌های پسماند و دوران دیوار ثقلیِ ناشی از زمین‌لرزه، طراحی خود را در سطح عملکرد معین و با الگوهای شکست مطلوب، مانند مکانیزم شکست لغزشی انجام دهند. روش‌های ارزیابی جابه‌جایی ماندگار دیوار وزنی، در لحظه گسیختگی دو دسته اصلی دارد:

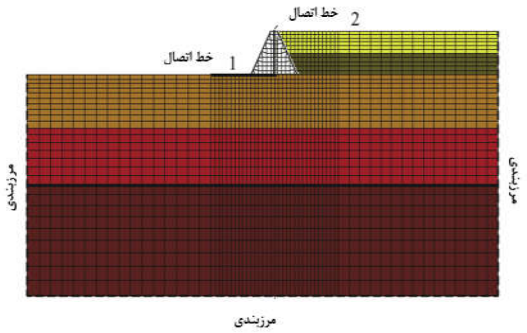
الف. جابه‌جایی بر اساس تکنیک تحلیل ساده استوار است. سیستم جابه‌جایی اجسام صلب را در امتداد سطوح شکست بالقوه پیش بینی می‌کند.

ب. جابه‌جایی بر اساس روش عددی است. بر اساس رفتار غیر خطی خاک، الگوی تنش و کرنش را از طریق المان محدود به دست می‌آورد.

روش اول به علت سهولت اجرا، بیشتر استفاده می‌شود. روش طراحی بر اساس جابه‌جایی مجاز، روش بلوک‌های لغزنده نیومارک و دیگر انواع بهبود یافته، از آن جمله‌اند. در ادامه تعدادی رابطه ساده شده برای تخمین میزان جابه‌جایی زمین‌لرزه آمده است.



شکل۲. هندسه دیوار حائل وزنی و خاکریز در این تحقیق.



شکل ۳. نمای مدلسازی در نرم افزار عددی.

$$d_{perm} = \frac{V_{max}^2}{2a_y}\frac{a_{max}}{a_y}, \quad (۳)$$

$$d_{perm,5\%PE} = \frac{\alpha.a_{max}T^2}{4}\ 10^{\left(1-3.86\frac{a_y}{a_{max}}\right)}, \quad (۴)$$

$$d_{perm} = \frac{0.087\ V_{max}^2 a_{max}^3}{a_y^4}, \quad (۵)$$

$$d_{perm} = R_V R_Z \frac{37\ V_{max}^2}{a_{max}}\ exp\left(\frac{-9.4a_y}{a_{max}}\right), \quad (۶)$$

$$d_{perm} = \frac{V_{max}^2}{a_{max}} exp\left(9.4\left(0.66 \quad \frac{a_y}{a_{max}}\right)\right), \quad (۷)$$

$$d_{perm} = \frac{37V_{max}^2}{a_{max}}\ exp\left(\frac{-9.4a_y}{a_{max}}\right), \quad (۸)$$

$$d_{perm} = \frac{35\ V_{max}^2}{a_{max}} exp\left(\frac{-6.91a_y}{a_{max}}\right)\left(\frac{a_y}{a_{max}}\right)^{-0.38} \quad (۹)$$

که V_{max} و a_{max} بیانگر سرعت و شتاب حداکثر زلزله و a_y بیانگر شتاب متناظر با شروع حرکت و گسیختگی خاکریز دیوار می‌باشند.

۴ روش تحقیق و بیان مسئله

در این تحقیق هندسه دیوار حائل وزنی به شکل ذوزنقه‌ای دو طرفه (شکل ۲)، کاملاً صلب با رفتار مصالح خطی الاستیک و از جنس مصالح بنایی (آجر و سنگ) در نظر گرفته شد. به منظور ارزیابی اثر ارتفاع دیوار بر میزان دوران و انتقال، دیوار در سه ارتفاع مختلفِ سه، پنج و هشت متری مدلسازی شد؛ هرچند ارتفاع دیوارهای حائل وزنی به ندرت از پنج متر فراتر می‌رود. خاکریز پشت دیوار و کف دیوار از نوع خاک دانه‌ای (غیر اشباع) در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک از چهار نوع خاک مختلف استفاده می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی محیط خاکریز از مدل رفتاری الاستوپلاستیک بر پایه معیار گسیختگی مور-کولومب و در تحلیل‌های دینامیکی از میرایی رایلی استفاده شده است. آنچه مسلم است در تحلیل دینامیکی دیوار، استفاده از بارگذاری هارمونیک و سینوسی از واقعیت دور است و در نظر گرفتن این نوع بارگذاری باعث خواهد شد شتاب و نیروی زمین‌لرزه در طول مدت زمین‌لرزه ثابت فرض شود که این موضوع موجب بروز جابجایی‌های ماندگار بسیار بزرگ خواهد شد (شکل ۲). به همین علت استفاده از شتابنگاشت واقعی زمین‌لرزه، خطای کمتر و نتایج دقیقتری ارائه خواهد داد. بر این اساس و به منظور صحت سنجی، دقت سنجی و اعتبار سنجی مدلسازی عددی و رفتاری از نتایج تحقیق انجام شده روی دیوارهای حائل وزنی زمین‌لرزه سال ۱۹۸۵ شیلی استفاده می‌شود. در این تحقیق داده‌های تجربی و میدانی مناسبی برای ارزیابی دوران و انتقال دیوارهای حائل وزنی وجود دارد. شتابنگاشت زمین‌لرزه در شکل ۴ و مشخصات زمین‌لرزه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه شیلی در سال ۱۹۸۵.

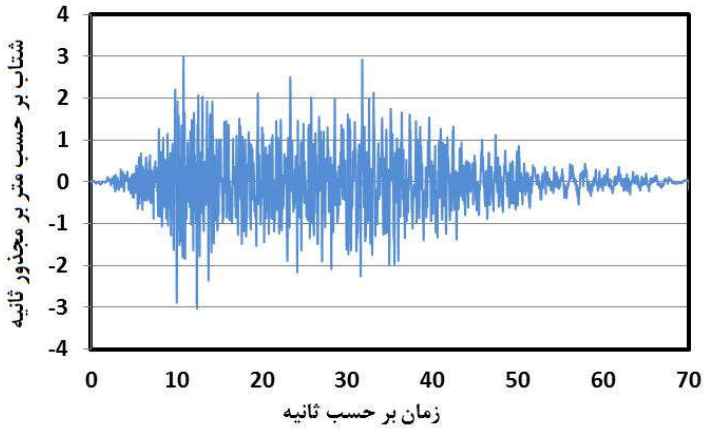
تاریخ وقوع	شدت زمین‌لرزه	شتاب حداکثر	سرعت حداکثر	جابه‌جایی حداکثر	مدت زمان
۳ مارس ۱۹۸۵	۷/۹ ریشتر	۳۰۴/۰	۱۹۳۴/۰	۰۳۷۳/۰	۷۰ ثانیه

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز و خاک کف دیوار حائل.

مشخصه	واحد	خاک نوع ۱	خاک نوع ۲	خاک نوع ۳	خاک نوع ۴
G_s	بدون واحد	۲/۷	۲/۷	۲/۶	۲/۷
Γ	kN/m^3	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
C	kPa	۰	۰	۰	۰
φ	درجه	۲۲	۲۷	۳۲	۴۰
ψ	درجه	۲	۵	۷	۱۰
v_{ur}	بدون بعد	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
k_0	بدون بعد	۰/۴۵۷	۰/۴۲۶	۰/۳۹۸	۰/۳۵۷
m	بدون بعد	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
R_f	بدون بعد	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
$E_{50\ ref}$	kPa	$۳/۵ \times ۱۰^۴$	$۳/۵ \times ۱۰^۴$	$۴/۵ \times ۱۰^۴$	$۴/۵ \times ۱۰^۴$
$E_{oed\ ref}$	kPa	$۳/۵ \times ۱۰^۴$	$۳/۵ \times ۱۰^۴$	$۴/۵ \times ۱۰^۴$	$۴/۵ \times ۱۰^۴$
$E_{ur\ ref}$	kPa	$۰/۹ \times ۱۰^۵$	$۱/۵ \times ۱۰^۵$	$۱/۲ \times ۱۰^۵$	$۱/۳۵ \times ۱۰^۵$
$G_{0\ ref}$	kPa	$۷/۲۲ \times ۱۰^۴$	$۷/۴۵ \times ۱۰^۴$	$۹/۵۷ \times ۱۰^۴$	$۹/۸۲ \times ۱۰^۴$
$\gamma_{0.7}$	kN/m^3	۲×۱۰^{-۴}	۲×۱۰^{-۴}	۲×۱۰^{-۴}	۲×۱۰^{-۴}

جدول ۳. متغییرهای مطالعه شده در تحقیق.

هندسه دیوار			**مشخصات مکانیکی دیوار**	
ارتفاع دیوار (متر)	قاعده کف دیوار (متر)	تاج دیوار (متر)	زاویه اصطکاک داخلی خاک کف دیوار (درجه)	سختی خاک کف دیوار Mpa	زاویه اصطکاک داخلی خاکریز پشت دیوار (درجه)
۳، ۵، ۸	۱/۸، ۳، ۴/۵	۰/۳ و ۰/۵	۲۲، ۲۷، ۳۲، ۳۷، ۴۰	۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰	۲۲، ۲۷، ۳۲، ۴۰



شکل ۴. شتابنگاشت زمین‌لرزه سال ۱۹۸۵ کشور شیلی.

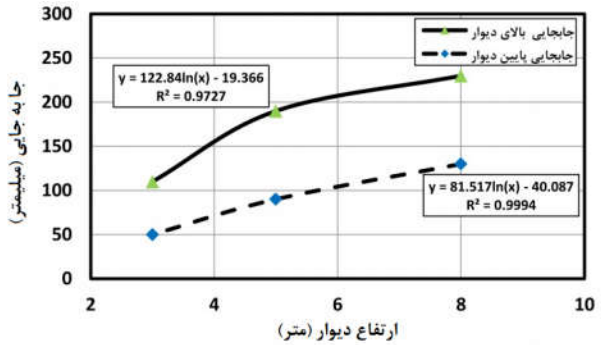
همانگونه که اشاره شد در این تحقیق از سه مدل هندسه مختلف با تناسب‌های منطقی و براساس تجربه‌های گذشته، برای دیوار حائل وزنی استفاده شد. در این بررسی، پایداری استاتیکی و تحلیل ژئوتکنیکی با کنترل لغزش، واژگونی و فشار واردِ پنجه دیوار، در تمامی دیوارها در حد مجاز و پذیرفتنی است. به‌طوری‌که ضریب اطمینان در برابر لغزش بیش از ۱/۵، در برابر واژگونی بیش از ۲ و نسبت به فشار پنجه به باربری مجاز خاک در پنجه، کمتر از ۰/۷۵ است. همچنین چهار نوع خاک درشت‌دانه با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مختلف مطابق جدول ۲ برای خاکریز پشت دیوار و کف دیوار استفاده شد. برای بررسی تأثیر هندسه دیوار، لایه‌بندی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز پشت دیوار و خاک زیر دیوار بر میزان سختی مدل اولیه، ضریب اطمینان پایداری دیوار، میزان جابه‌جایی در پاشنه و تاج دیوار و همچنین میزان دوران دیوار، مدلسازی دیوار به روش عددی در چهار حالت مختلف انجام شد که اطلاعات آن در جدول ۳ آمده است.

۵ بررسی تأثیر هندسه دیوار حائل بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای

در این بخش از پژوهش، سه هندسه مختلف برای دیوار با نسبت ارتفاع به عرض بیشتر از ۱/۴ در نظر گرفته شده است. اثر ارتفاع که یکی از عوامل مهم بر پاسخ لرزه‌ای دیوارحائل است بررسی شد. ضریب شتاب بیشینه زمین‌لرزه به مقدار g ۰/۳ استفاده گردید. سایر پارامترهای تأثیرگذار همچون مدت زمان وقوع و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه ثابت نگاه داشته شد، همچنین ضریب اصطکاک و مدول یانگ خاک کف پِی و ضریب اصطکاک خاکریز ثابت فرض شده‌اند و فقط با تغییر ابعاد دیوار به بررسی تأثیر این پارامتر در نتایج تحلیل عددی پرداخته شده است. در بررسی سه مدل مختلف، با ابعاد دیوار متغیر سه، پنج و هشت متر، مدلسازی‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفته است و میزان جابه‌جایی در آنها در بالا و پایین دیوار استخراج و میزان دوران دیوار محاسبه می‌گردد. جدول ۴ و شکل ۵ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه نتایج تأثیر ارتفاع دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

ارتفاع دیوار (متر)	قاعده دیوار (متر)	جابه‌جایی بالای دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد افزایش)	جابه‌جایی پایین دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد افزایش)	دوران (رادیان)	میزان تغییر (درصد کاهش)
۳	۰/۳	۱۱۲	۰	۵۲	۰	۱/۲۴	۰
۵	۰/۵	۱۹۰	۷۳	۹۰	۸۰	۱/۱۵	۷
۸	۰/۸	۲۳۰	۱۰۹	۱۳۱	۱۶۰	۱/۱۵	۷



شکل ۵. تأثیر هندسه دیوار بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

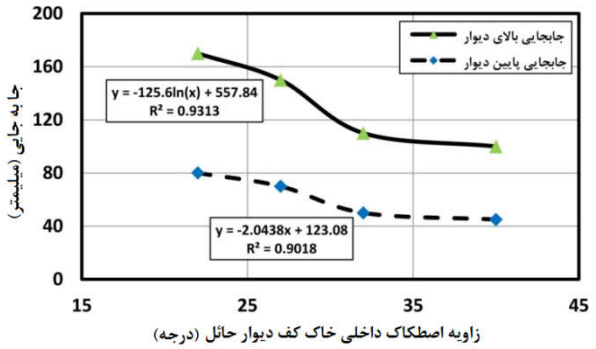
بررسی نتایج بیانگر این مطلب است که میزان ابعاد دیوار به طور مستقیم بر روی میزان جابه‌جایی دیوار تأثیرگذار است به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار از سه متر به پنج متر و به دنبال آن افزایش قاعده دیوار، باعث افزایش ۷۳ و ۸۰ درصدی در میزان جابه‌جایی تاج و پایه دیوار می‌شود. همین طور این نتایج نشان می‌دهند که افزایش ابعاد دیوار سبب کاهش میزان دوران دیوار شده است. هرچند میزان این کاهش چندان محسوس نیست، در هر دو مدل نسبت به مدل کوچکتر کاهش نشان می‌دهد. این نتیجه با روابط معرفی شده توسط ریچارد و دیگر محققان همسو است به‌طوری که با افزایش ارتفاع دیوار، مؤلفه رانش دینامیکی با توان دو افزایش می‌یابد. این اتفاق به‌طور مستقیم باعث افزایش لنگر محرک، جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد شد. این نتایج با تحقیقات آزمایشگاهی بازیار و رابطی تطابق دارد. در این تحقیق نیز تأثیر ارتباط مستقیم و غیرخطی ارتفاع دیوار بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای گزارش شده است.

۶ بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک کف دیوار

بررسی نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که افزایش زاویه اصطکاک داخلی در خاک بسترِ کف دیوار حائل، سبب کاهش میزان جابه‌جایی‌ها در تاج و پاشنه دیوار می‌گردد، به‌گونه‌ای که افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۲۲ درجه به ۴۰ درجه، سبب کاهش ۴۴ درصدی میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۱ درصدی میزان جابه‌جایی تاج دیوار می‌گردد. بررسی نتایج در جدول ۵ و شکل ۶ نشان می‌دهند که میزان زاویه اصطکاک داخلی در خاک کف دیوار حائل به‌طور مستقیم بر میزان جابه‌جایی دیوار تأثیرگذار است و سبب کاهش میزان دوران دیوار می‌شود. این نتیجه را می‌توان ناشی از این موضوع دانست که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، ظرفیت باربری خاک افزایش چشمگیری خواهد یافت که به دنبال آن نشست‌پذیری کاهش یافته و نشست پنجه دیوار کاهش می‌یابد، در نتیجه جابه‌جایی و دوران دیوار نیز کاهش خواهد یافت.

جدول ۵. مقایسه نتایج تأثیر زاویه اصطکاک داخلی کف دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

اصطکاک خاک کف دیوار حائل	جابه‌جایی بالای دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	جابه‌جایی پایین دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	میزان دوران (رادیان)	میزان تغییر (درصد کاهش)
۲۲	۱۷۲	۰	۸۱	۰	۱/۷۲	۰
۲۷	۱۵۰	۱۲	۷۱	۱۳	۱/۵۳	۱۱
۳۲	۱۱۲	۳۵	۵۲	۳۸	۱/۲۴	۲۸
۴۰	۱۰۲	۴۱	۴۵	۴۴	۱/۰۵	۳۹



شکل ۶. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی کف دیوار حائل بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

۷ بررسی تأثیر مدول الاستیسیته (سختی) خاک کف دیوار

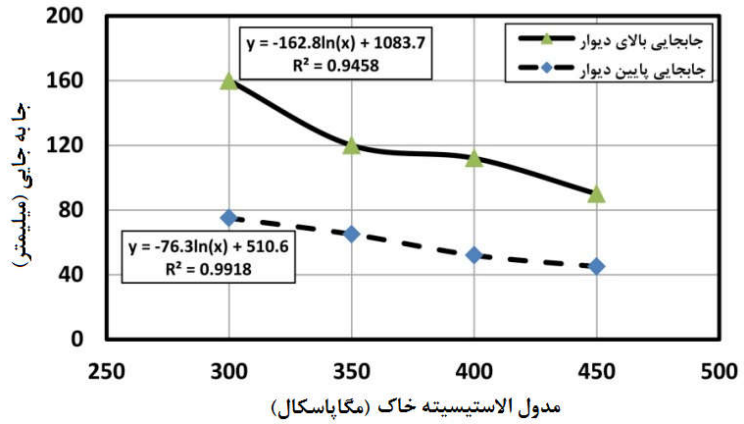
از دیگر عوامل بررسی شده در این تحقیق، ارزیابی تأثیر مدول الاستیسیته خاک کف دیوار حائل بر میزان دوران و جابه‌جایی دیوار است. بدین منظور با هندسه یکسان و مشخصات خاکریز مشابه، در تحلیل عددی، تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته به ترتیب ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درنظر گرفته می‌شود در حالی که هندسه دیوار و مشخصات مکانیکی خاکریز تغییر نکرده است. نتایج این بررسی در جدول ۶ و شکل ۷ نشان می‌دهند که افزایش مدول‌الاستیسیته و سختی خاک کف دیوار حائل، سبب کاهش میزان جابه‌جایی در تاج و پاشنه دیوار می‌گردد، به‌طوری که افزایش مدول الاستیسیته از ۳۰۰ به ۴۵۰، سبب کاهش ۴۰ درصدی جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۴ درصدی جابه‌جایی تاج دیوار می‌گردد. این نتایج بیانگر تأثیر مدول الاستیسیته و سختی خاک در میزان نشست کف دیوار حائل است چرا که در اغلب نظریه‌های محاسبه نشست پی، با افزایش سختی خاک، میزان نشست، کاهش می‌یابد. همچنین این نتایج با تحقیقات کمال محمد (۲۰۱۵) (شکل ۸) همخوان و هم‌راستا است.

۸ بررسی زاویه اصطکاک داخلی خاکریز

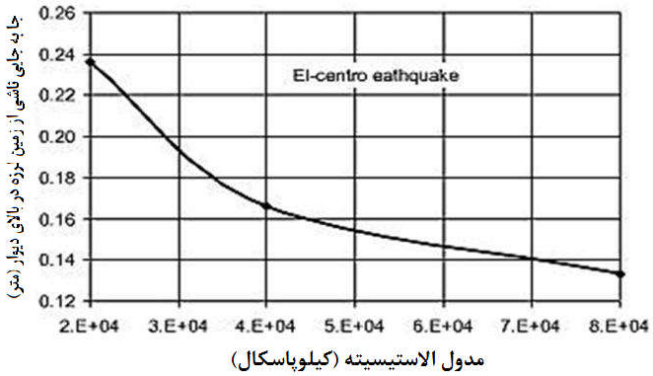
دیگر فاکتور نیازمند بررسی در این تحقیق، تأثیر مشخصات مکانیکی خاکریز پشت دیوار بر میزان دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی است. در این بررسی زاویه اصطکاک داخلی خاکریز به ترتیب ۲۲، ۲۷، ۳۲ و ۴۰ درنظر گرفته شد در حالی که مشخصات هندسی دیوار و دیگر مشخصات مکانیکی خاکریز و خاک کف پی ثابت درنظر گرفته شد. نتایج این بررسی که در جدول ۷ و شکل ۹ نشان داده شده است نشان می‌دهد که با

جدول ۶. مقایسه نتایج تأثیر سختی خاک کف دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

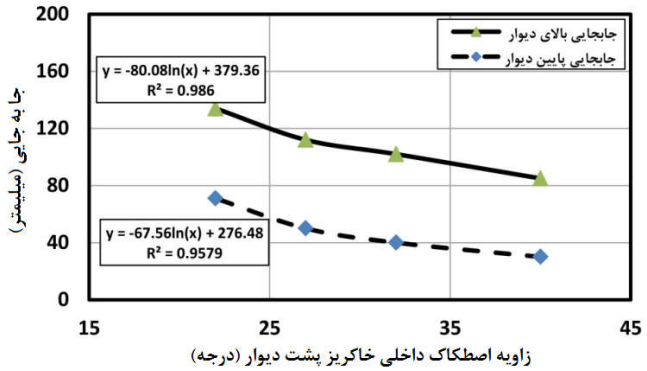
مدول الاستیسیته *MPa*	جابه‌جایی بالای دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	جابه‌جایی پایین دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	دوران (رادیان)	میزان تغییر (درصد کاهش)
۳۰۰	۱۶۰	۰	۷۵	۰	۱/۶۵	۰
۳۵۰	۱۲۰	۲۵	۶۵	۱۲	۱/۲	۳۰
۴۰۰	۱۱۲	۳۵	۵۲	۳۳	۱/۲۴	۲۵
۴۵۰	۹۰	۴۴	۴۵	۴۰	۰/۹	۴۵



شکل ۷. تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.



شکل ۸ حداکثر جابه‌جایی بالای دیوار نسبت به سختی خاک بر اساس تحقیقات کمال محمد ۲۰۱۵.



شکل ۹. تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاکریز بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

جدول۷. مقایسه نتایج تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاکریز پشت دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

زاویه اصطکاک داخلی خاکریز (درجه)	جابه‌جایی بالای دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	جابه‌جایی پایین دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	دوران (رادیان)	میزان تغییر (درصد کاهش)
۲۲	۱۳۴	۰	۷۱	۰	۱/۱۵	۰
۲۷	۱۱۲	۱۵	۵۰	۲۹	۱/۱۴	٪۱
۳۲	۱۰۲	۲۳	۴۰	۴۳	۱/۱۵	۰
۴۰	۸۵	۳۵	۳۰	۵۷	۱/۰۵	٪۹

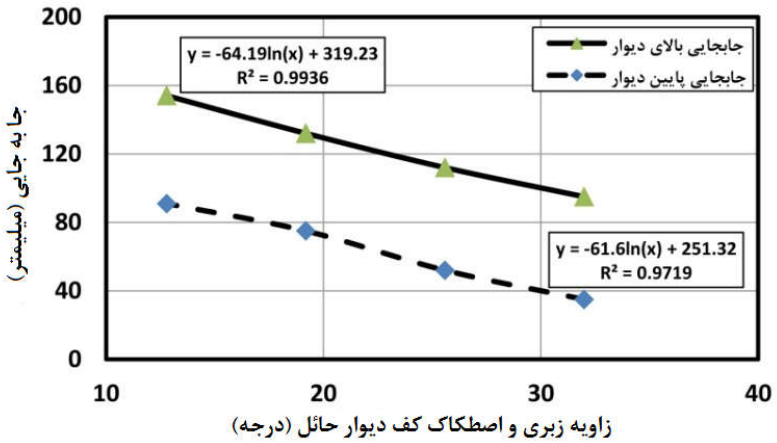
افزایش زاویه اصطکاک داخلی در خاکریز، میزان جابجایی‌ها در تاج و پاشنه دیوار کاهش می‌یابد به‌طوری که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاکریز از ۲۲ به ۴۰ درجه، کاهش ۵۷ درصدی در میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۳۷ درصدی در میزان جابجایی تاج دیوار مشاهده می‌شود. این نتیجه را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاکریز، ضریب فشار جانبی محرک در خاک کاهش یافته و به دنبال آن نیروی محرک نیز کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش لنگر محرک و کاهش میزان جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد بود.

۹ بررسی تأثیر اصطکاک کف دیوار

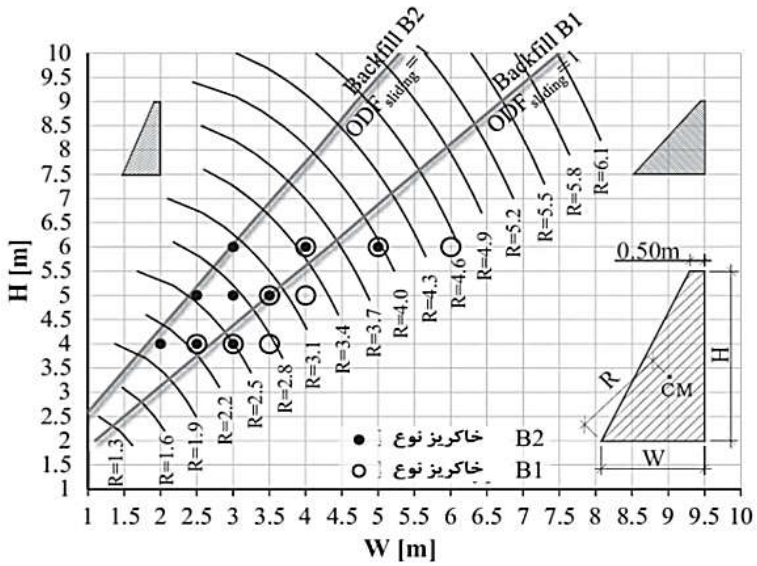
فاکتور نیازمند بررسی دیگر در این تحقیق، تأثیر ضریب اصطکاک کف دیوار حائل با خاک بر میزان دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی است. در این بررسی زاویه اصطکاک کف دیوار به میزان ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک کف دیوار حائل درنظر گرفته شد در حالی که مشخصات هندسی دیوار و دیگر مشخصات مکانیکی خاکریز و خاک کف پِی ثابت در نظر گرفته شد. این بررسی در دیوار سه متری انجام شده است. نتایج آن در جدول ۸ و شکل ۱۰ آمده است. با افزایش زاویه زبری کف دیوار، میزان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار کاهش می‌یابد به‌طوری که با افزایش زاویه زبری کف دیوار از ۱۲/۸ به ۳۲ درجه، کاهش ۳۸ درصدی در میزان جابه‌جایی و کاهش ۲۱ درصدی در میزان دوران دیوار مشاهده می‌شود. این نتیجه ناشی از تأثیر بسیار محسوس زاویه اصطکاک کف در افزایش شتاب لازم برای گسیختگی دیوار و شروع تغییر شکل‌های ماندگار آن طی دوره‌های زمین‌لرزه است. در ضمن نشان می‌دهد با افزایش زاویه اصطکاک کف دیوار می‌توان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار را محدود کرد که با رابطه معروف المس و ریچارد (۱۹۷۶) تطابق بسیار زیادی دارد.

جدول ۸ مقایسه نتایج تأثیر زاویه زبری کف دیوار حائل بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

زاویه زبری کف دیوار حائل (درجه)	جابه‌جایی بالای دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	جابه‌جایی پایین دیوار (میلیمتر)	میزان تغییر (درصد کاهش)	دوران (رادیان)	میزان تغییر (درصد کاهش)
۱۲/۸	۱۵۴	۰	۹۱	۰	۱/۴۵	۰
۱۹/۲	۱۳۲	۱۴	۷۵	۱۷	۱/۳۵	۷
۲۵/۶	۱۱۲	۲۷	۵۲	۴۲	۱/۲۲	۱۶
۳۲	۹۵	۳۸	۳۵	۶۱	۱/۱۵	۲۱



شکل ۱۰. تأثیر زاویه زبری کف دیوار بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.



شکل ۱۱. انتخاب هندسه و طراحی دیوار بر اساس فاکتور لغزش.

۱۰ مقایسه نتایج تحلیل با روابط تجربی و تحلیلی

در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تحلیلی و تجربی حاصل از بررسی دیگر محققان در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی ارزیابی می‌شود.

در بین روش‌های تحلیلی‌تجربی، روابط ریچارد بسیار معروف است. در این نظریه با پی بردن به اثر اینرسی دیوار در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی، این نتیجه حاصل می‌شود که حتی برای حرکات ملایم زمین، حرکات رو به بیرون از خاکریزِ دیوار قطعی است.

تأثیر ارتفاع بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار در این تحقیق با نتایج تحلیل ریچارد و همچنین تحقیقات آزمایشگاهی بازیار و همکارانش تطابق زیادی دارد به‌طوری که مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق عددی همچون نتایج این محققان نشان می‌دهد با افزایش دو برابری ارتفاع دیوار، جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای به‌صورت غیرخطی تا ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت.

مقایسه نتایج حاصل از تأثیر اصطکاک کف دیوار بر دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار در این تحقیق، با روش تحلیلی ریچارد نشان می‌دهد که در هر دو با افزایش زاویه اصطکاک کف دیوار تا دو برابر، دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای می‌تواند تا ۴۰ درصد کاهش یابد.

تأثیر مدول الاستیسیته و سختی خاک بر میزان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار حائل در این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیقات کمال محمد مقایسه شده است و هر دو نتایج مشابهی نشان می‌دهند به‌طوری که با افزایش مدول الاستیسیته تا دو برابر، جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد.

بر اساس آیین نامه اتحادیه اروپا EN-1997-1، مطابق شکل ۱۱ می‌توان برای برای یک دیوار ذوزنقه‌ای با عرض ثابت حدود نیم متر در بالا و عرض پایه و ارتفاع متغیر و همچنین با نوع خاکریز متفاوت در کف و پشت دیوار، جابه‌جایی لرزه‌ای را تخمین زد. نتایج تحلیل‌های عددی در این تحقیق در مقایسه با این آیین‌نامه نیز نتایج مشابهی نشان می‌دهند به‌طوری که با افزایش ارتفاع دیوار تا دو برابر، جابه‌جایی ماندگار دیوار تا ۵۳ درصد افزایش می‌یابد.

۱۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر هندسه دیوار و مشخصات مکانیکی خاکریز و خاک کف دیوار حائل در ارزیابی جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی ارزیابی شد و با نتایج تحلیلی و تجربی دیگر محققان مقایسه شد. با توجه به نتایج این تحقیق ملاحظه شد، افزایش ارتفاع دیوار به طور مستقیم بر جابه‌جایی لرزه‌ای تاثیر گذار است، به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار به دو برابر باعث افزایش ۷۰ درصدی جابه‌جایی تاج دیوار و ۸۰ درصدی در پایه دیوار می‌شود. مقایسه این نتایج با روابط تحلیلی دیگر محققان انطباق بسیار نزدیکی را نشان می‌دهد. همچنین افزایش ابعاد دیوار سبب کاهش میزان دوران دیوار شده است.

با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک در کف پِی دیوار حائل مقدار تغییرمکان جانبی در تاج و پاشنه دیوار به شدت کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تا دو برابر، کاهش ۴۰ درصدی در جابه‌جایی پاشنه و تاج دیوار اتفاق می‌افتد. این نتیجه با تحلیل تجربی ریچارد تطابق بسیار مناسبی دارد.

سختی خاک کف دیوار حائل (کف پِی) بر جابه‌جایی و تغییرمکان افقی دیوار نیز تأثیرگذار است به‌طوری که با افزایش مدول الاستیسیته، کاهش جابه‌جایی‌ها در تاج و پاشنه دیوار اتفاق می‌افتد. با افزایش دو برابری مدول الاستیسیته تا ۴۰ درصد کاهش در جابه‌جایی پاشنه و تاج دیوار مشاهده می‌شود. این نتیجه با تحقیقات کمال محمد تطابق بسیار زیادی دارد.

با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاکریز میزان جابه‌جایی در تاج و پاشنه دیوار کاهش خواهد یافت، به‌گونه‌ای که افزایش زاویه اصطکاک داخلی تا دو برابر، سبب کاهش جابه‌جایی دیوار، بیش از ۵۰ درصدمی‌گردد. این نتیجه نیز با نتایج بررسی آزمایشگاهی بازیار و همکارانش نزدیکی بسیاری دارد.

منابع

بازیار، م.، و رابطی مقدم، م.، ۱۳۸۹، تحلیل عددی تغییرشکل ماندگار دیوار حایل- مطالعه موردی: چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، تهران، ایران.

مداح، م.، طاهریان، ح.، نیکخواه شهمیرزادی، م.، و جلیلی، م.، ۱۳۹۳، تخمین دوران لرزه ای دیوار حایل وزنی در خاک‌های ماسه‌ای: اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، تهران، دانشکده عمران دانشگاه شهید رجایی.

Carrubba, P., and Pavanello, P., 2011, Equivalent loading for seismic response analysis of Newmark's block: Rivista Italiana di Geotecnica, **32**(3), 32-45.

Choudhury, D., and Nimbalkar, S. S., 2008, Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudodynamic method: International Journal of Geomechanics, **8**(3), 169-175.

Coulomb, C. A., 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture: Memoires de l'Academie Royale pres Divers Savants, **7** (in France).

Elms, D. G., and Richards, R., 1979, Seismic design of gravity retaining walls: Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, **12** (3) 26-51.

European Committee for Standardization, EN 1997-1, 2004, E. Eurocode 7, Geotechnical design, Part 1: general rules, Brussels, CEN.

Kamal, M. H. I. I., 2015, Seismic displacement of gravity retaining walls: Housing and Building National Research Center Journal, **11**(2), 224-230.

Mononobe, N., Matsuo, H., 1929, On the determination of earth pressure during earthquake: World Engineering Congress, Tokyo, **4**(1), 177-185

Nadim, F., and Whitman, R., 1983, Seismically induced movement of retaining walls: Journal of Geotechniq Engineering, **109**(7), 915-931.

Newmark, N. M., 1965, Effects of earthquakes on dams and embankments: Geotechnique, **15**(2), 139–160.

Pain, A., Choudhury, D., and Bhattacharyya, S. K., 2016, Seismic rotational displacement of

retaining walls, a pseudo-dynamic approach: Innovative Infrastructure Solutions, **1**(22) 1-8.

Rankine, W., 1857, on the stability of loose earth: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, **147**.

Scott, R., and Steedman, A., 1998, Seismic design of cellular cofferdams: International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, University of Missouri, Rolla.

Shi, H., Jinxin, G., and Yanqing, Zh., 2016, Seismic rotational displacements of gravity quay walls considering excess pore pressure in backfill soils: Journal of Earthquake Engineering, **4**(2), 1-16.

Whitman, R. V., and Liao, S., 1985, Seismic design of retaining walls, Misc. Paper GL-85-1: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Yingwei, W., and Shamsher, P., 2011, Seismic displacements of rigid retaining walls: International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri University of Science and Technology.

Investigation of factors effective on seismic deflection and rotation of gravity retaining wall compared to the empirical approach

Saeed Ghaffarpour Jahromi[1*], and Sepideh Zolfaghar[2]

[1]*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran*
[2]*M. Sc., Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran*

(Received: 03 January 2017, Accepted: 30 October 2017)

Summary
Retaining walls are designed to withstand lateral earth and water pressures, the effects of surcharge loads, and the self-weight of the wall and, in special cases, earthquake loads in accordance with the general principles specified in this section. Retaining walls are constructed for a certain service life based on consideration of the potential long-term effects of material deterioration on each of the material components comprising the wall. Permanent retaining walls are designed for a minimum service life of 50 years. Temporary retaining walls should be designed for a minimum service life of 5 years. Gravity retaining walls rely on their self-weight to resist lateral earth pressures. Analysis of the seismic behavior of gravity retaining walls during earthquake loading is a quite complex task. Seismic wall movements can occur as sliding or rotational displacements. In some cases, only one of these displacements can be dominant and for some of them, both sliding and rotation can occur. Foundation soil deformability, backfill, wall stiffness, and input record motion as the main variables used in the analysis of walls are subjected to a strong earthquake. The analysis of the seismic stability of walls retaining back ll soil is based on the following assumptions: (1) the wall–soil system is long enough for ignoring the end effects (plane strain condition); (2) the soil is homogeneous, dry, and cohesion-less; (3) the retaining wall is subjected only to horizontal displacements; (4) the seismic action is uniform horizontally distributed in the whole mass of the system; and (5) the failure wedge is a plain. Furthermore, the upper bound limit analysis is based on the assumption that soil will be deformed according to the associated ow rule and the convexity of the soil yield condition. In the following analysis, we assumed that these conditions are met. For many decades, the seismic analysis of retaining walls has been based on the simple extension of Coulomb's limit equilibrium analysis, which has become widely known as the Mononobe-Okabe method. The method modified and simplified by Seed and Whitman has prevailed mainly because of its simplicity and the familiarity of engineers with the Coulomb method. Designing walls for stability against earthquake risks in seismic zones is done through the analysis of the seismic behavior of the soil-structure system. The methods established using newmark sliding block procedure are based on forces (pseudo-static and pseudo-dynamic) and allowable displacements. These methods are frequently used in the seismic design. Dynamic analysis of retaining walls can also be done by finite-element methods. ABAQUS is among the computer programs that suite for finite-element analysis. In this study, a series of finite elements were carried out in ABAQUS in order to find out typical wall movements including rotation and lateral top and base displacements. This research presents that many variables such as maximum acceleration, properties of foundation and backfill soils, and characteristics of the wall affect the seismic behavior. Design charts were derived from the numerical analyses to predict both lateral displacements at base and top. The proposed charts consider the most relevant factors in the system response. The result obtained can be used to develop an optimum design procedure for gravity retaining walls.

Keywords: gravity retaining wall, lateral earth pressure, seismic displacement, seismic rotation, finite elements methods, empirical approach

[*]Corresponding author: saeed_ghf@sru.ac.ir