

## بررسی عوامل مؤثر در دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی

سعید غفارپور جهرمی (نویسنده مسئول)، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی،  
Saeed\_ghf@srttu.edu

سپیده ذوالفقار، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

**چکیده:** یکی از موضوعات مهم در طراحی دیوارهای حائل، تخمین جابه‌جایی، دوران و پیش‌بینی رفتار آن تحت بار زلزله است. این موضوع از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و محققان با ارائه‌ی روش‌ها و نظریه‌های مختلف تلاش می‌کنند به تحلیل پایداری و تخمین تغییر مکان و دوران دیوار حائل بپردازند. در این بین روش‌های مبتنی بر نیرو شامل روش شبه‌استاتیکی و شبه‌دینامیکی و همچنین روش‌های مبتنی بر تغییر مکان که بر پایه‌ی نظریه‌ی بلوک لغزشی نیومارک قرار دارند، از جمله روش‌های اصلی تحلیل لرزه‌ای دیوارهای حائل محسوب می‌شوند. آنچه مسلم است تحلیل لرزه‌ای برای پیش‌بینی دوران و جابه‌جایی دیوار از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا تخمین آنها به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار دیوار، بسیار دشوار و گاهی دور از واقعیت است. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از روش عددی و مدلسازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، جابه‌جایی جانبی تحت بار لرزه‌ای در نقاط رأس بالا و پایین دیوار استخراج شوند و بر اساس این اطلاعات دوران دیوار تخمین زده شود. از عوامل مهم و تأثیرگذار بر نتایج این تحقیق می‌توان به اثر مقاومت اصطکاکی کف دیوار، مشخصات خاک ریز پشت دیوار و ارتفاع دیوار اشاره کرد. هرچند شدت و مدت زلزله نیز بسیار تأثیرگذار است. در ادامه‌ی این تحقیق، نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل دینامیکی، با آنچه که از روش‌ها و تئوری‌ها و نظریه‌های پیشین به دست آمده است، مقایسه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** دیوار حائل وزنی، رفتار لرزه‌ای، جابه‌جایی لرزه‌ای، دوران لرزه‌ای، روش عددی.

### ۱- مقدمه

کوچک است. تحلیل و طراحی دیوارهای حائل در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای (دینامیکی)، لازم است در دو مرحله شامل تحلیل پایداری (کنترل واژگونی و لغزش) و تحلیل تغییر مکان (جابه‌جایی و دوران) انجام شود. در این روش‌های تحلیل، تأثیر عوامل مختلفی چون مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، هندسه‌ی دیوار و مشخصات لرزه‌ای زلزله اجتناب‌ناپذیر است. بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی در ارزیابی لرزه‌ای نشان داده است مقادیر نسبی

دیوارهای حائل وزنی متشکل از مصالح سنگی، آجری یا بتن غیر مسلح از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین نوع المان‌های حائل شناخته می‌شوند. این دیوارها با توجه به شکل (دوزنقه‌ای یا پلکانی)، ابعاد هندسی و مصالح از وزن قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند که عامل اصلی پایداری آنها در مقابل فشار جانبی خاک می‌باشند. این دیوارها با توجه به ابعاد و مصالح معمولاً رفتاری صلب دارند و میزان خمش و تغییر شکل آنها در قیاس با دوران و جابه‌جایی بسیار

به شناخت دقیق این نیرو و محل نقطه اثر آن بستگی دارد. استفاده از تئوری کولمب و رانکین در تحلیل پایداری استاتیکی دیوارهای حائل از گذشته‌های دور مورد استفاده بسیاری از مهندسان بوده است. در این دو نظریه، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، هندسه‌ی خاکریز، هندسه‌ی دیوار و سربار روی خاکریز در تحلیل و طراحی فاز ژئوتکنیکی و فاز سازه‌ای دیوار حائل دخالت دارند [۱-۲]. در تحلیل لرزه‌ای، روش مونونوبه-اکابه که در سال ۱۹۲۹ از توسعه‌ی تئوری و نظریه‌ی کولمب ارائه شده است، همچنان به‌طور گسترده‌ای توسط مهندسان برای تحلیل لرزه‌ای دیوارهای حائل و تعیین فشار جانبی خاک در زمان زلزله استفاده می‌شود. بر اساس این تئوری، فشار جانبی محرک خاک در زمان زلزله در قیاس با قبل از زلزله، تابع شتاب افقی و شتاب قائم زلزله نیز می‌باشد. از جمله محدودیت‌های این روش عدم ارائه‌ی توزیع فشار جانبی خاک است [۳].

نیومارک و همکارانش برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵، روش بلوک لغزان را برای محاسبه‌ی تغییر مکان 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 توده‌ی خاک زیر آن از لحظه‌ای که شتاب زلزله از شتاب بحرانی گسیختگی بیشتر شود تا زمانی که دارای سرعت یکسانی شوند، روند افزایشی خواهد داشت [۴].

المس و ریچاردز در سال ۱۹۷۹ [۵] 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 بر مبنای کنترل تغییر مکان طراحی کرد از مهم‌ترین سؤالات مهندسی در آن زمان بوده است. اولین ایده برای کنترل میزان جابه‌جایی، ایجاد گیرداری اضافی در دیوار است که یا بسیار پرهزینه و یا اینکه عملاً غیرممکن می‌باشد. از طرفی

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. کارایی دیوار حائل پس از زلزله به مقدار زیادی تابع تغییر شکل‌های آن در خلال زلزله 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 هندسه‌ی غالب و رایج از دیوارهای حائل وزنی بتنی، به روش عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، ارزیابی لرزه‌ای رفتار دیوار در خاکریز دانه‌ای برای چند نوع زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی تأثیر عوامل مختلف شامل نوع زلزله، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز و خاک بستر و همچنین هندسه‌ی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- پیشینه‌ی تحقیق

محاسبه‌ی فشار جانبی زلزله و نقطه اثر آن همواره یکی از موضوعات مهم در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. عدم توجه به تحلیل و طراحی مناسب دیوارهای حائل وزنی تحت بار زلزله، سبب شده است خسارات بسیاری به این دیوارها در زمان زلزله وارد شود لذا توجه محققان به توسعه روش‌های طراحی لرزه‌ای، اهمیت دو چندان پیدا کرده است. از خرابی‌های رایج این دیوارها پس از زلزله، 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 غیرقابل استفاده باشد. تا کنون روش‌های متعددی توسط محققان مختلف برای تخمین جابه‌جایی انتقالی و دورانی دیوارهای حائل در برابر بارهای زلزله، پیشنهاد و توسعه داده شده است. مهم‌ترین عامل در طرح و محاسبه‌ی 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 پنجه‌ی دیوار

روش‌های شبه استاتیکی مثل مونونوبه و اکابه، جواب‌گوی ایمنی کامل دیوارهای حائل در برابر زلزله نبودند. این دلایل برای ریچاردز و همکارانش کافی بود تا به دنبال روشی نوین در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل باشند. بر این اساس آنها با توسعه‌ی روش نیومارک، روش طراحی بر مبنای تغییر مکان محدود که بر اساس مفهوم تغییر مکان‌های تدریجی و ماندگار بلوک لغزان نیومارک می‌باشد را معرفی کردند.

ندیم و ویتمن در سال ۱۹۸۳ [۶] روش دیگری را جهت طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل ثقلی معرفی کردند که اساس آن تخمین جابه‌جایی دائم دیوار در حین زلزله با در نظر گرفتن اثر حرکت زمین است. بر مبنای این مطالعه، تشدید حرکت در خاک‌ریز پشت دیوار نقش مهمی را در مقدار تغییر مکان دائمی دیوار ایفا می‌کند.

ویتمن و لیائو در سال ۱۹۸۵ [۷] به ارزیابی روش بلوک لغزان معرفی شده توسط ریچاردز و همکارانش پرداختند که نتیجه‌ی این بررسی نشان داد در روش فوق خطاها و محدودیت‌هایی وجود دارد که شامل عدم لحاظ نمودن پاسخ دینامیکی خاک‌ریزی، عدم توجه به عوامل سینماتیکی، فراموش کردن مکانیسم چرخشی و عدم توجه به مؤلفه‌ی شتاب قائم در بروز جابه‌جایی‌های ماندگار بزرگ اشاره کرد. هنگامی که تأثیر مؤلفه‌ی شتاب قائم در نظر گرفته شد، به‌طور کلی مکانیسم چرخش دیوار در میزان جابه‌جایی و انتقال افزایش بیشتری در قیاس با روش ریچاردز و همکارانش داشت.

استیدمن در سال ۱۹۹۸ [۸]، رویکرد جدیدی برای طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل پیشنهاد کردند که در آن رفتار لرزه‌ای و میزان جابه‌جایی دیوارهای حائل حین زلزله نسبت به میزان تنش‌ها و مقادیر نیروها در تحلیل و طراحی دیوار ارجحیت بیشتری داشت؛ اما این روش شبه‌استاتیکی با رفتار واقعی دیوار و جابه‌جایی‌های دورانی آن در حین زلزله، انطباق خوبی نشان نداد.

یینگوی و شامشر در سال ۲۰۰۱ [۹] روشی را

پیشنهاد دادند که بر مبنای تحلیل تغییر مکان به طراحی دیوارهای حائل وزنی و صلب تحت بار زلزله پرداختند. این روش در حقیقت توسعه‌ی روش ویتمن و همکارانش در تحلیل جابه‌جایی دیوارهای حائل بود که در آن به روش تحلیلی بر مبنای روابط تعادلی دینامیکی و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، جابه‌جایی و دوران قابل محاسبه بود.

چودهاری و نیمبالکار در سال ۲۰۰۸ [۱۰] یک روش شبه دینامیکی برای محاسبه‌ی فشار فعال خاک در شرایط زلزله با لحاظ نمودن اثرات دینامیکی ارائه کردند. آنها در این پژوهش به روش شبه دینامیکی از روش تحلیلی استیدمن و همکارانش نیز استفاده نمودند. در این روش به ارزیابی دوران و جابه‌جایی دیوار توجه کافی نشده است.

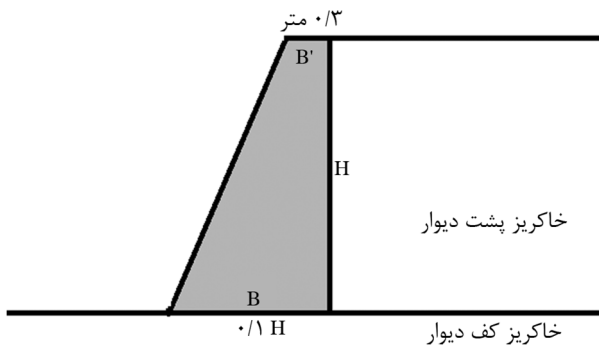
بازیار و رابطی مقدم در سال ۱۳۸۹ [۱۱] به‌منظور مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی، دو نمونه دیوار حائل را در مقیاس آزمایشگاهی با آزمایش سانتریفیوژ بررسی و نتیجه‌ی حاصل را به روش عددی در نرم‌افزار المان محدود FLAC 2D، مدل‌سازی کردند. نتایج این بررسی نشان داد تغییر مکان ماندگار دیوارهای حائل شامل لغزش، دوران، نشست کف دیوار و نشست خاک‌ریز با به‌کار بردن مدل رفتاری مناسب، انطباق قابل قبولی با شبیه‌سازی سانتریفیوژ دارد.

کاروبا و پوانلو در سال ۲۰۱۱ [۱۲] با استفاده از روش بلوک لغزشی نیومارک، نتایج حاصل از این روش در پیش‌بینی جابه‌جایی ۳۸ دیوار حائل وزنی (به‌صورت مطالعه‌ی موردی) را در زمان زلزله محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده پس از زلزله مورد مقایسه قرار دادند. نتیجه این تحقیق توسعه‌ی بلوک لغزشی نیومارک و ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی برای دیوارهای حائل وزنی بر اساس مشخصات هندسی دیوار و مشخصات زلزله بود.

مداح و همکارانش در سال ۱۳۹۳ [۱۳] با توسعه‌ی روش بلوک لغزشی نیومارک، به معرفی یک فاکتور منحصربه‌فرد در طراحی دیوار پرداختند که برای ارزیابی جابه‌جایی بالا و پایین دیوار در روش‌های عددی مناسب

### ۳- بیان مسئله

در این تحقیق هندسه‌ی دیوار حائل وزنی به شکل دوزنقه‌ای مطابق شکل (۱)، کاملاً صلب با رفتار خطی الاستیک و از جنس مصالح بنایی (آجر و سنگ) در نظر گرفته شد. به‌منظور ارزیابی اثر ارتفاع دیوار بر میزان دوران و انتقال، دیوار در سه ارتفاع مختلف ۳، ۵ و ۸ متری مدلسازی شد؛ هرچند ارتفاع دیوارهای حائل وزنی به‌ندرت از ۵ متر فراتر می‌رود.



شکل (۱): هندسه‌ی دیوار حائل وزنی و خاکریز در این تحقیق.

خاکریز پشت دیوار و کف دیوار از نوع خاک دانه‌ای (غیر اشباع) در نظر گرفته شده و برای ارزیابی تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک از چهار نوع خاک مختلف استفاده می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی محیط خاکریز از مدل رفتاری الاستو پلاستیک بر پایه‌ی معیار گسیختگی موهر-کولمب 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 زلزله از ابتدا تا انتهای زمان تحلیل ثابت فرض شده و موجب تغییر شکل‌های پلاستیک و ماندگار بزرگی خواهد شد. به همین دلیل استفاده از شتاب‌نگاشت واقعی زلزله، خطای کمتر و نتایج دقیق‌تری ارائه خواهد داد. بر این اساس و به‌منظور صحت‌سنجی، دقت‌سنجی و اعتبار سنجی مدلسازی عددی و رفتاری از نتایج یک تحقیق انجام یافته روی دیوارهای حائل وزنی زلزله سال ۱۹۸۵ شیلی

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 می‌یابد.

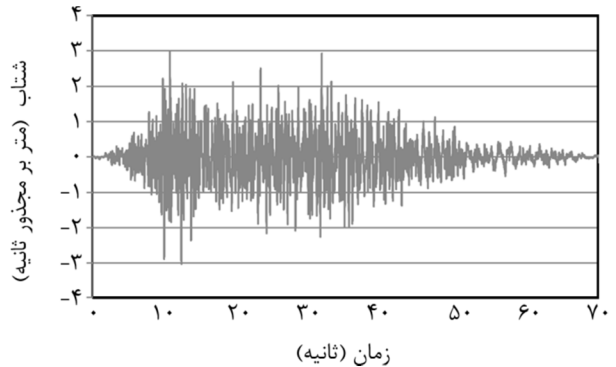
کمال محمد در سال ۲۰۱۴ [۱۴] با شبیه‌سازی بار لرزه‌ای در نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس، از یک تحلیل عددی در شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده کردند تا در آن جابه‌جایی دیوار در مرزهای پایین با خاک ارزیابی شود. با در نظر گرفتن اثرات انعکاس امواج و استفاده از معیار مور-کولمب به‌صورت الاستو پلاستیک برای خاک و به‌صورت الاستیک و صلب برای دیوار، تحلیل عددی دینامیکی غیرخطی و همچنین روش شبه استاتیکی انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد سختی خاک (ضریب یانگ) نیز روی میزان جابه‌جایی لرزه‌ای تاج دیوار تأثیر به‌سزایی دارد به‌طوری‌که با افزایش ضریب یانگ خاک، جابه‌جایی تاج دیوار کاهش می‌یابد.

شی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۱۵] در ارزیابی دوران دیوارهای حائل وزنی در زمان زلزله، تأثیر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در خاکریز را مورد تحقیق و پژوهش قرار دادند. در این تحقیق با توسعه‌ی بلوک لغزشی نیومارک بر مبنای تنش مؤثر و با لحاظ کردن فشار آب حفره‌ای، جابه‌جایی و دوران دیوار حائل وزنی در زمان زلزله مورد تحقیق قرار گرفت که 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.

پاین و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۱۶] تلاش کردند دوران ناشی از زلزله در دیوارهای حائل وزنی را به روش شبه‌دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه این تحقیق که بر روی خاکریزهای خشک انجام شده است نشان داد مشخصات زلزله‌ی ورودی تأثیر بیشتری بر دوران لرزه‌ای در مقایسه با مشخصات هندسی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز دارند.

گذشته برای دیوار حائل وزنی استفاده شد. در این بررسی، پایداری استاتیکی و تحلیل ژئوتکنیکی با کنترل لغزش، واژگونی و فشار وارد پنجه دیوار در تمامی دیوارها در حد مجاز و قابل قبول می‌باشد. به‌طوری‌که ضریب اطمینان در برابر لغزش بیش از ۱/۵، در برابر واژگونی بیش از ۲ و نسبت فشار پنجه به باربری مجاز خاک در پنجه کمتر از ۰/۷۵ می‌باشد. همچنین چهار نوع خاک درشت‌دانه‌ی ماسه‌ای با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مختلف مطابق جدول (۲) برای خاکریز پشت دیوار و کف دیوار استفاده شد. برای بررسی تأثیر هندسه‌ی 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.

استفاده می‌شود. در این تحقیق داده‌های تجربی و میدانی مناسبی برای ارزیابی دوران و انتقال دیوارهای حائل وزنی وجود دارد. شتاب‌نگاشت زلزله در شکل (۲) و مشخصات زلزله در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲): شتاب‌نگاشت زلزله‌ی شیلی در سال ۱۹۸۵.

همان‌گونه که اشاره شد در این تحقیق از سه مدل هندسه‌ی مختلف با تناسب‌های منطقی و بر اساس تجربیات

جدول (۱): مشخصات زلزله‌ی شیلی در سال ۱۹۸۵.

تاریخ وقوع	شدت	شتاب حداکثر (متر بر مجذور ثانیه)	سرعت حداکثر (متر بر ثانیه)	جابه‌جایی حداکثر (متر)	زمان
۳ مارس ۱۹۸۵	۷/۹ ریشتر	۰/۳۰۴	۰/۱۹۳۴	۰/۰۳۷۳	۷۰ ثانیه

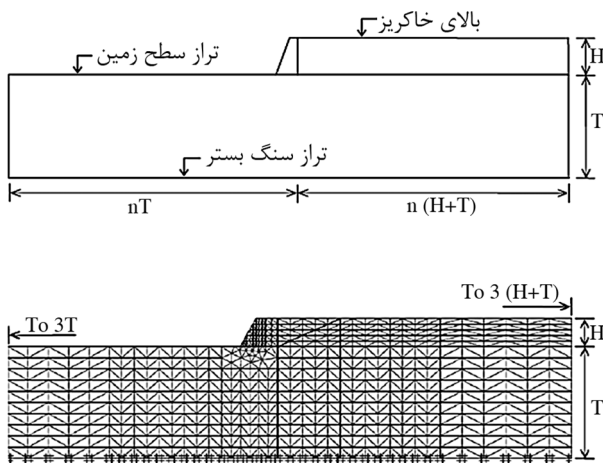
جدول (۲): مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکریز و خاک کف دیوار حائل.

مشخصات	مشخصه	واحد	ماسه ۱	ماسه ۲	ماسه ۳	ماسه ۴
چگالی دانه‌های جامد	$G_s$	بدون واحد	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۲/۷
وزن مخصوص	$\gamma$	کیلونیوتن بر متر مکعب	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
چسبندگی	$C$	کیلوپاسکال	۰	۰	۰	۰
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	$\phi$	درجه	۲۲	۲۷	۳۲	۴۰
زاویه‌ی اتساع	$\psi$	درجه	۲	۵	۷	۱۰
ضریب پواسون	$\nu_{ur}$	بدون بعد	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
ضریب فشار جانبی سکون	$k_0$	بدون بعد	۰/۴۵۷	۰/۴۲۶	۰/۳۹۸	۰/۳۵۷
توان وابستگی سختی به سطح تنش	$m$	بدون بعد	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
نسبت گسیختگی	$R_f$	بدون بعد	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
سختی بارگذاری سه‌محوری	$E_{50-ref}$	کیلوپاسکال	$۳/۵ \times 10^4$	$۳/۵ \times 10^4$	$۴/۵ \times 10^4$	$۴/۵ \times 10^4$
سختی بارگذاری ادنومتر	$E_{oed-ref}$	کیلوپاسکال	$۳/۵ \times 10^4$	$۳/۵ \times 10^4$	$۴/۵ \times 10^4$	$۴/۵ \times 10^4$
سختی باربرداری سه‌محوری	$E_{ur-ref}$	کیلوپاسکال	$۰/۹ \times 10^5$	$۱/۵ \times 10^5$	$۱/۲ \times 10^5$	$۱/۳۵ \times 10^5$
سختی اولیه‌ی حداکثر	$G_{0-ref}$	کیلوپاسکال	$۷/۲۲ \times 10^4$	$۷/۴۵ \times 10^4$	$۹/۵۷ \times 10^4$	$۹/۸۲ \times 10^4$
کرنش متناظر با ۷۰ درصد سختی اولیه	$\gamma_{0.7}$	بدون بعد	$۲ \times 10^{-۴}$	$۲ \times 10^{-۴}$	$۲ \times 10^{-۴}$	$۲ \times 10^{-۴}$

جدول (۳): اطلاعات مدلسازی مورد مطالعه در تحقیق.

هندسه دیوار			مشخصات مکانیکی دیوار		
ارتفاع (متر)	عرض قاعده (متر)	عرض تاج (متر)	زاویه اصطکاک داخلی خاک کف دیوار (درجه)	سختی خاک کف دیوار (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز پشت دیوار (درجه)
۳	۱/۸	۰/۳	۳۷	۴۰۰	۲۷
۵	۳	۰/۵			
۸	۴/۵	۰/۵			
۳	۱/۸	۰/۳	۲۲	۴۰۰	۲۷
			۲۷		
			۳۲		
			۴۰		
۳	۱/۸	۰/۳	۳۷	۳۰۰	۲۷
				۳۵۰	
				۴۰۰	
				۴۵۰	
۳	۱/۸	۰/۳	۳۷	۴۰۰	۲۲
					۲۷
					۳۲
					۴۰

در مدل عددی اندازه‌گیری‌شده در تحلیل باید از ۰/۱ طول موج (حاصل ضرب موج برشی خاک در بیشترین فرکانس ارتعاش) کوچک‌تر باشد که در این تحقیق لحاظ شده است. در مدلسازی مسائل ژئوتکنیکی معمولاً ناحیه ی مورد نظر باید به‌اندازه‌ای بزرگ باشد که بتوان آن را از نظر محاسباتی بینهایت فرض کرد. در مسائل استاتیکی، مرزهای محیط به‌اندازه‌ی کافی باید از مرکز اغتشاش (مثلاً محل



شکل (۳): مش‌بندی مدلسازی عددی دیوار حائل وزنی، خاک ریز و بستر.

#### ۴- روند مدلسازی

روش المان محدود به‌عنوان یک روش عددی در حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی یا غیرخطی کاربرد فراوانی دارد. در میان نرم‌افزارهای متعددی که از روش المان محدود برای تحلیل مسائل مهندسی استفاده می‌کنند، در این تحقیق از نرم‌افزار آباکوس که با قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود در تحقیقات دقیق و کاربردی صنعت و دانشگاه کاربرد وسیعی دارد، استفاده کرده است. از توانایی‌های مهم این نرم‌افزار قابلیت تحلیل بارگذاری‌های مختلف دینامیکی مانند زلزله، امواج و طوفان بر روی سازه‌های مختلف است. مش‌بندی مدلسازی دیوار مورد تحقیق در این مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است. روش اجزای محدود به معنی گسسته‌سازی یک محیط فیزیکی جهت تحلیل اتفاقاتی است که در آن محیط رخ می‌دهد. از آنجا که یکی از راهکارهای گسسته‌سازی محیط در نرم‌افزارهای عددی استفاده از مش‌بندی‌های متفاوت است، دقت جواب به نوع، شکل و ابعاد مش‌بندی وابستگی شدیدی دارد. به منظور افزایش دقت و صحت‌سنجی

در این رابطه  $\alpha_R$  و  $\beta_{RC}$  ضرایب رایلی را نشان می‌دهند که به ترتیب میرایی متناسب با جرم و میرایی متناسب با سختی هستند. برای یک سیستم چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی  $\zeta_i$ ، برای هر فرکانس زاویه‌ای سیستم  $\omega_i$  از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\zeta_i \omega_i = 2\alpha + \beta \omega_i^2 \quad (3)$$

$$\alpha / \omega_i + \beta \omega_i = 1/2 \zeta_i \quad (4)$$

در این روابط  $\omega_i$  فرکانس طبیعی مود ارتعاشی  $i$ ام (برحسب رادیان بر ثانیه) است. مطابق روابط فوق در فرکانس‌های پایین، جمله‌ی میرایی متناسب با جرم است و در فرکانس‌های بالا، جمله‌ی میرایی متناسب با سختی بوده و تأثیر بیشتر و نقش مهم تری را ایفا می‌کنند. با فرض ثابت بودن میرایی در فرکانس‌های مختلف و تعیین دو فرکانس طبیعی سیستم، با استفاده از رابطه (۴) می‌توان ضرایب  $\beta_{RC}$  و  $\alpha_R$  را تعیین نمود.

هر سیستم دینامیکی تحت فرکانس‌های طبیعی خود، ارتعاش درونی دارد و اولین (کوچکترین) فرکانس طبیعی هر سیستم به عنوان فرکانس اصلی یا فرکانس غالب سیستم شناخته می‌شود. همچنین مود ارتعاش در هر فرکانس طبیعی منحصر به فرد است. در یک مدل المان محدود، تعداد محدودی از فرکانس‌های طبیعی متناسب با درجات آزادی وجود دارد اما در تحلیل بسیاری از سیستم‌ها فقط چند مود اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فرکانس طبیعی و شکل مودهای متناظر با آن، به هندسه‌ی سیستم، مشخصات مواد و مصالح سیستم و همچنین شرایط تکیه‌گاهی در سیستم بستگی دارند.

در دو دهه‌ی گذشته، تحلیل مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مختلف مهندسی و به‌خصوص سازه‌های زئوتکنیک تبدیل شده است. تحلیل مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها و به‌کارگیری آنها برای ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل

دور باشند تا نتایج تحلیل دارای تقریب خوبی باشند؛ درحالی‌که در حل مسائل دینامیکی این مسئله به سادگی فوق نیست. وجود هرگونه مرز غیر واقعی در مسائل سبب خواهد شد امواج ایجاد شده پس از برخورد به این مرزها به داخل محیط برگشت نمایند و در محاسبات تأثیرگذار باشند زیرا این امواج می‌توانند در داخل محیط بی‌نهایت منتشر و جذب گردند و به محیط محاسباتی برگشتی نداشته باشند. برای حل این مشکل راهکارهای متفاوتی همانند تعریف میرایی در مرزهای محاسباتی و در فواصل دور قابل انجام است که تا حدی سبب بهتر شدن نتایج خواهد شد. البته این عمل زمان محاسبات را بالا خواهد برد. روش به‌کار رفته در این تحقیق شامل معرفی مرزهای جاذب در نواحی مرزی می‌باشد که سبب می‌شود انرژی امواج حجمی ورودی تقریباً به‌طور کامل جذب شوند و انعکاسی صورت نگیرد.

## ۵- تعیین ضرایب میرایی رایلی

در این تحقیق از رابطه‌ی حرکت یک جسم تحت تأثیر بار دینامیکی و وابسته به زمان به صورت رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$Mu'' + Cu' + Ku = F \quad (1)$$

در این رابطه  $M$  ماتریس جرم،  $u$  بردار تغییر مکان،  $C$  ماتریس میرایی،  $K$  ماتریس سختی و  $F$  بردار بار می‌باشد. تغییر مکان  $(u)$ ، سرعت  $(u')$  و شتاب  $(u'')$  با زمان تغییر می‌کنند. ذکر این نکته لازم است که در حقیقت میرایی مصالح از اصطکاک و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر (پلاستیسیته و ویسکوزیته) ناشی می‌شود. در مصالح با پلاستیسیته و ویسکوزیته بیشتر، انرژی ارتعاشی بیشتری مستهلک خواهد شد. در روش المان محدود، ضریب  $C$  اغلب به صورت تابعی از جرم و ماتریس‌های سختی (میرایی رایلی) بیان می‌شود که در رابطه‌ی (۲) آمده است:

$$M + \beta_{RC} = \alpha_R \quad (2)$$

## ۷- بررسی تأثیر هندسه‌ی دیوار حائل بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای

در این بخش از پژوهش، سه هندسه‌ی 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 دیوار حائل است مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب شتاب پیشینه‌ی زلزله به مقدار  $0.3g$  استفاده شد و سایر پارامترهای تأثیرگذار هم چون مدت وقوع زلزله و محتوای فرکانسی زلزله ثابت نگاه داشته شده و همچنین ضریب اصطکاک و ضریب یانگ خاک کف فونداسیون و ضریب اصطکاک خاک ریز 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 به ترتیب برابر ۳، ۵ و ۸ متر، مدلسازی‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفته و میزان جابه‌جایی آنها در بالا و پایین دیوار استخراج و میزان دوران دیوار محاسبه می‌شود. جدول (۴) و شکل (۴) نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. شکل (۵) نمونه‌ای از جابه‌جایی ماندگار دیوار در پایان زلزله را نشان می‌دهد.



شکل (۴): تأثیر هندسه‌ی دیوار بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

جدول (۴): مقایسه‌ی نتایج تأثیر ارتفاع دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

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

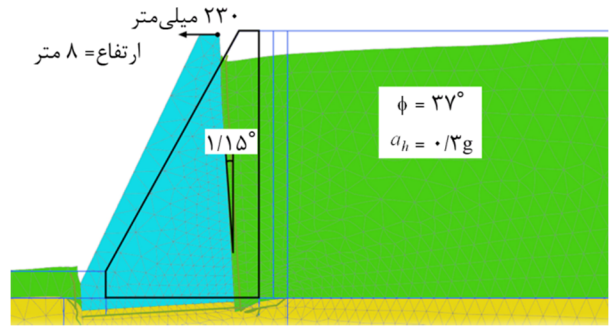
ریاضی به مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند که در این تحقیق نیز از این تکنیک استفاده می‌شود. شکل موده‌های ارتعاشی، وابسته به دینامیک سیستم است و به وسیله‌ی خواص فیزیکی (جرم، سختی، میرایی) و نحوه‌ی توزیع فضای آنها تعیین می‌شوند و در پیش‌بینی پاسخ یک سازه به ارتعاشات محیطی و یا بارهای خارجی کاربردهای زیادی دارد. در این مطالعه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی خاک و ساختگاه مورد نظر، از تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نظر به اینکه میرایی خاک با کرنش متناسب بوده و در ترازهای مختلف کرنش متفاوت است، در این پروژه رفتار پلاستیک مصالح لحاظ شده و عملکرد میرایی بیشتر برای مستهلک کردن بخشی از امواج لرزه‌ای منعکس شده از مرزهای مدل مدنظر قرار گرفته است، لذا میرایی بحرانی متوسط خاک برابر ۵ صدر لحاظ شده است.

## ۶- اعتبار سنجی و دقت سنجی مدل

در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای یک دیوار وزنی ساحلی واقع در بندر والپارایسو که در روند زلزله‌ی ۳ مارس ۱۹۸۵ شیلی دچار تغییر مکان افقی ماندگار شده بود مورد بررسی گرفته است. این دیوار با ارتفاع ۱۵ متر از جنس بتن در جریان زلزله دچار تغییر مکانی افقی در بالای دیوار معادل ۱۵۰ میلی‌متر به سمت دریا شده است. بر اساس خروجی نرم‌افزار تغییر مکان واقعی دیوار در بالا معادل ۱۶۸ میلی‌متر برآورد شده است که خطای قابل قبول ۱۲ درصد را نشان می‌دهد.



پاشنه‌ی دیوار می‌شود به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی از ۲۲ درجه به ۴۰ درجه، سبب کاهش ۴۴ درصدی میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۱ درصدی میزان جابه‌جایی تاج دیوار می‌شود. بررسی نتایج در جدول (۵) و شکل (۶) نشان می‌دهند که میزان زاویه‌ی 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 زاویه‌ی اصطکاک داخلی، ظرفیت باربری خاک افزایش قابل توجهی 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.

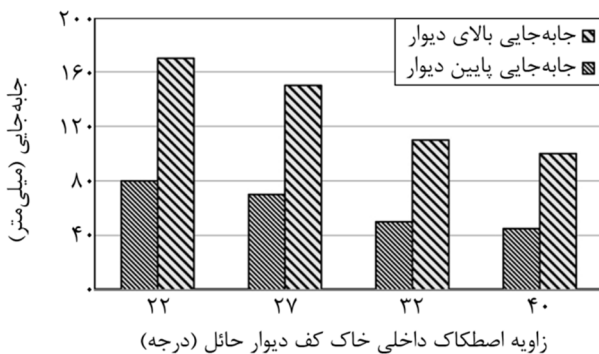


شکل (۵): نمونه‌ی تغییر شکل و جابه‌جایی دیوار.

بررسی نتایج بیانگر این مطلب است که میزان ابعاد دیوار به‌طور مستقیم بر روی میزان جابه‌جایی دیوار تأثیرگذار است به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار از ۳ متر به ۵ متر و به دنبال آن افزایش قاعده‌ی دیوار، باعث افزایش ۷۳ و ۸۰ درصد در میزان جابه‌جایی تاج دیوار و پایه‌ی دیوار می‌شود. همین‌طور این نتایج نشان می‌دهند که افزایش ابعاد دیوار سبب کاهش میزان دوران دیوار شده است هرچند میزان این کاهش چندان محسوس نیست ولی در هر دو مدل نسبت به مدل کوچک‌تر کاهش نشان می‌دهد. این نتیجه با روابط معرفی شده توسط ریچاردز و دیگر محققان همسو می‌باشد به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع دیوار، مؤلفه‌ی رانش دینامیکی نیز با توان دو افزایش می‌یابد که به‌طور مستقیم باعث افزایش لنگر محرک، جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد شد.

## ۹- بررسی تأثیر ضریب الاستیسیته (سختی) خاک کف دیوار

یکی دیگر از عوامل مورد بررسی در این تحقیق، ارزیابی تأثیر ضریب الاستیسیته‌ی خاک کف دیوار حائل بر میزان دوران و جابه‌جایی دیوار است. بدین‌منظور با هندسه‌ی یکسان



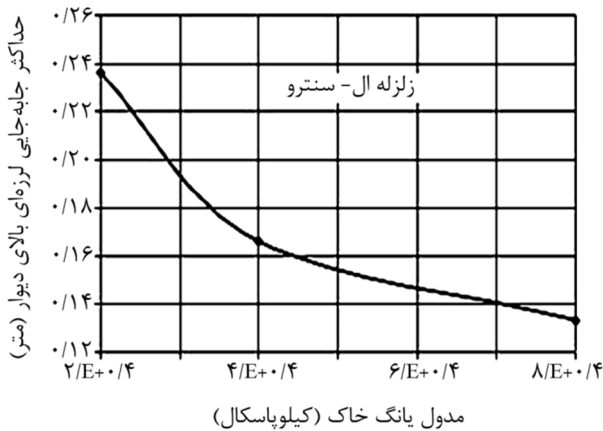
شکل (۶): تأثیر زاویه اصطکاک داخلی کف دیوار حائل بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

## ۸- بررسی تأثیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک کف دیوار

بررسی نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی در خاک بستر کف دیوار حائل، سبب کاهش میزان جابه‌جایی‌ها چه در تاج و چه در

جدول (۵): مقایسه‌ی نتایج تأثیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی کف دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای

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

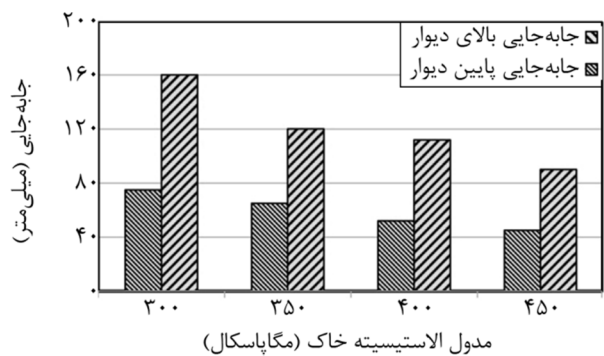


شکل (۸): حداکثر جابه‌جایی بالایی دیوار نسبت به سختی خاک بر اساس تحقیقات کمال محمد [۱۴].

### ۱۰- بررسی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز

یکی دیگر از فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق، بررسی تأثیر مشخصات مکانیکی خاک ریز پشت دیوار بر میزان دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی می‌باشد. در این بررسی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز به ترتیب ۲۲، ۲۷، ۳۲ و ۴۰ در نظر گرفته شد، درحالی‌که مشخصات هندسی دیوار و دیگر مشخصات مکانیکی خاک ریز و خاک کف پی ثابت در نظر گرفته شد. نتایج این بررسی که در جدول (۷) و شکل (۹) نشان داده شد نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی در خاک ریز، میزان جابه‌جایی‌ها چه در تاج و چه در پاشنه‌ی دیوار کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز از ۲۲ به ۴۰ درجه، کاهش ۵۷ درصدی در میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۳۷ درصدی در میزان جابه‌جایی تاج دیوار مشاهده می‌شود. این نتیجه را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که با

و مشخصات خاک ریز مشابه، در تحلیل عددی تأثیر تغییرات ضریب الاستیسیته به ترتیب ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ در نظر گرفته می‌شود درحالی‌که هندسه‌ی دیوار و مشخصات مکانیکی خاک ریز تغییر نکرده است. نتایج این بررسی در جدول (۶) و شکل (۷) نشان می‌دهند که با افزایش ضریب الاستیسیته و سختی خاک کف دیوار حائل، سبب کاهش میزان جابه‌جایی چه در تاج و چه در پاشنه‌ی دیوار می‌گردد به طوری که با افزایش ضریب الاستیسیته از ۳۰۰ به ۴۵۰، سبب کاهش ۴۰ درصدی جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۴ درصدی جابه‌جایی تاج دیوار می‌شود. این نتایج بیانگر تأثیر ضریب الاستیسیته و سختی خاک در میزان نشست کف دیوار حائل می‌باشد زیرا در اغلب نظریه‌ها محاسبه‌ی نشست پی، با افزایش سختی خاک، میزان نشست کاهش می‌یابد. همچنین این نتایج با تحقیقات کمال محمد در سال ۲۰۱۴ (شکل ۸) همخوان و هم‌راستا می‌باشد [۱۴] به طوری که با افزایش سختی به میزان ۵۰ درصد، جابه‌جایی و دوران حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل (۷): تأثیر ضریب الاستیسیته خاک بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

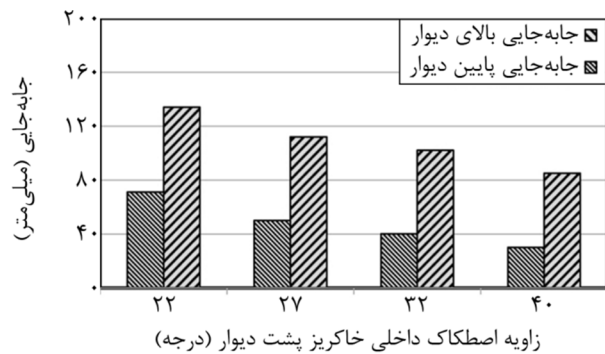
جدول (۶): مقایسه‌ی نتایج تأثیر سختی خاک کف دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

ضریب الاستیسیته (مگا پاسکال)	جابه‌جایی بالایی دیوار (میلی‌متر)	درصد تغییر	جابه‌جایی پایینی دیوار (میلی‌متر)	درصد تغییر	دوران (رادیان)	درصد تغییر
۳۰۰	۱۶۰	۰	۷۵	۰	۱/۶۵	۰
۳۵۰	۱۲۰	٪۲۵ کاهش	۶۵	٪۱۲ کاهش	۱/۲	٪۳۰ کاهش
۴۰۰	۱۱۲	٪۳۵ کاهش	۵۲	٪۳۳ کاهش	۱/۲۴	٪۲۵ کاهش
۴۵۰	۹۰	٪۴۴ کاهش	۴۵	٪۴۰ کاهش	۰/۹	٪۴۵ کاهش

جدول (۷): مقایسه‌ی نتایج تأثیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز پشت دیوار بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز (درجه)	جابه‌جایی بالای دیوار (میلی‌متر)	درصد تغییر	جابه‌جایی پایین دیوار (میلی‌متر)	درصد تغییر	دوران (رادیان)	درصد تغییر
۲۲	۱۳۴	۰	۷۱	۰	۱/۱۵	۰
۲۷	۱۱۲	٪۱۵ کاهش	۵۰	٪۲۹ کاهش	۱/۲۴	٪۸ افزایش
۳۲	۱۰۲	٪۲۳ کاهش	۴۰	٪۴۳ کاهش	۱/۱۵	۰
۴۰	۸۵	٪۳۵ کاهش	۳۰	٪۵۷ کاهش	۱/۰۵	٪۹ کاهش

دیوار و دیگر مشخصات مکانیکی خاک ریز و خاک کف پی ثابت در نظر گرفته شد. این بررسی در دیوار ۳ متری انجام شده است. نتایج این بررسی که در جدول (۸) و شکل (۱۰) آمده است که با افزایش زاویه‌ی زبری کف دیوار، میزان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش زاویه‌ی 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 زاویه‌ی اصطکاک کف در افزایش شتاب لازم برای گسیختگی دیوار و شروع تغییر شکل‌های ماندگار دیوار طی سیکل‌های زلزله می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد با افزایش زاویه‌ی اصطکاک کف دیوار می‌توان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار

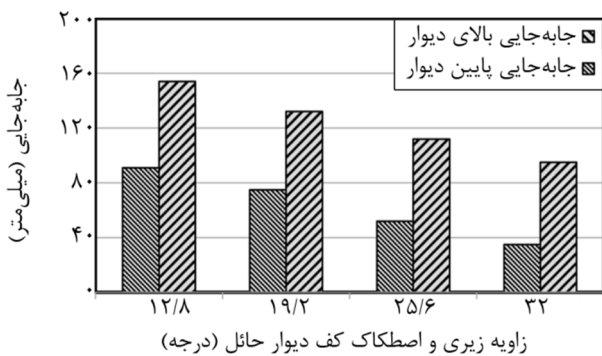


شکل (۹): تأثیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ریز، ضریب فشار جانبی محرک در خاک کاهش و به دنبال آن نیروی محرک نیز کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش لنگر محرک و کاهش میزان جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد بود.

## ۱۱- بررسی تأثیر اصطکاک کف دیوار

یکی دیگر از فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق، بررسی تأثیر ضریب اصطکاک کف دیوار حائل با خاک بر میزان دوران و جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی می‌باشد. در این بررسی زاویه‌ی اصطکاک کف دیوار به میزان ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ برابر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک کف دیوار حائل در نظر گرفته شد، در حالی که مشخصات هندسی



شکل (۱۰): تأثیر زاویه‌ی زبری کف دیوار بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.

جدول (۸): مقایسه‌ی نتایج تأثیر زاویه‌ی زبری کف دیوار حائل بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای.

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

تاج دیوار مشاهده می‌شود.

۴. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی در خاک ریز، کاهش میزان جابه‌جایی چه در تاج و چه در پاشنه‌ی دیوار رخ خواهد داد به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۲۲ درجه به ۴۰ درجه، سبب کاهش ۵۷ درصدی میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۳۷ درصدی میزان جابه‌جایی تاج دیوار می‌شود.

۵. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در محدود کردن جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوارهای حائل، زبری کف دیوار با خاک بستر می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش زبری کف از ۱۲ به ۳۲ حدود ۳۸ درصد جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

### مراجع

- Rankine, W. (1857) On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **147**.
- 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).
- Mononobe N. and Matsuo H. (1929) On the determination of earth pressure during earthquake. *Proceedings: World Engineering Congress, Tokyo, Vol. IX, Part 1, 177-185*.
- Newmark, N.M. (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, **15**(2), 139-160.
- 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).
- Nadim, F. and Whitman, R. (1983) Seismically induced movement of retaining walls. *Journal of Geotechniq Engineering*, **109**(7), 915-931.
- 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.

را محدود کرد و با رابطه‌ی معروف ریچاردز تطابق دارد [۵] به‌طوری‌که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک و کف دیوار به میزان دو برابر، جابه‌جایی حدود ۳۰ درصد و دوران حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

### ۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر هندسه‌ی دیوار و مشخصات مکانیکی خاک ریز و خاک کف دیوار حائل در ارزیابی جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوارهای حائل وزنی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در ارتفاع‌های مختلف دیوار شامل ۳، ۵، ۸ متر ملاحظه شد میزان ابعاد دیوار به‌طور مستقیم بر روی میزان جابه‌جایی‌های لرزه‌ای دیوار تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار از ۳ متر به ۵ متر باعث افزایش ۷۳ درصد جابه‌جایی تاج دیوار و ۸۰ درصدی در و پایه‌ی دیوار دارد. همچنین افزایش ابعاد دیوار سبب کاهش میزان دوران دیوار شده است.
- با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک فونداسیون دیوار حائل مشخص شد که مقدار تغییر مکان جانبی چه در تاج و چه در پاشنه‌ی دیوار کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی از ۲۲ به ۴۰ درجه، کاهش ۴۴ درصدی در میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۱ درصدی در میزان جابه‌جایی تاج دیوار اتفاق می‌افتد. همچنین افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی در خاک فونداسیون سبب کاهش میزان دوران دیوار شده است.
- سختی خاک کف دیوار حائل (کف پی) بر جابه‌جایی و تغییر مکان افقی دیوار نیز تأثیرگذار است به‌طوری‌که با افزایش ضریب الاستیسیته، کاهش جابه‌جایی‌ها چه در تاج و چه در پاشنه‌ی دیوار اتفاق می‌افتد. با افزایش ضریب الاستیسیته از ۳۰۰ به ۴۵۰، کاهش ۴۰ درصدی میزان جابه‌جایی پاشنه و کاهش ۴۴ درصدی میزان جابه‌جایی

8. Scott Steedman, R. (1998) Seismic design of cellular cofferdams. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, University of Missouri Rolla.
9. Yingwei W. and Shamsheer 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*.
10. Choudhury, D. and Nimbalkar, S.S. (2008) Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudodynamic method. *International Journal of Geomechanics*, **8**(3), 169-175.
11. Baziar M. H. and Rabetimoghaddam M. (2010) Numerical evaluation of seismic permanent deformation of retaining walls—case study. *4<sup>th</sup> International Conference of Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran (in Persian).
12. Carrubba P. and Pavanello P. (2011) Equivalent loading for seismic response analysis of Newmark's block. *Associazione Geotecnica Italiana*, **32**(3), 33-45.
13. Madah, M., Taherian, H., Nik Khah, M., and Jalili, M. (2013) Estimating the seismic rotation of retaining walls in sand soil. *First National Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran (in Persian).
14. Kamal, M.H.I.I. (2015) Seismic displacement of gravity retaining walls. *HBRC Journal*, **11**(2), 224-230.
15. 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.
16. Anindya 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.