

## چکیده

پیش‌بینی میزان جابه‌جایی و دوران دیوارهای حائل در زمان زلزله همواره یکی از مراحل مهم در طراحی لرزه‌ای و یا طراحی بر اساس عملکرد در دیوارهای حائل وزنی محسوب می‌شود. در این مقاله تلاش شده است به روش عددی عملکرد لرزه‌ای دیوار حائل وزنی تحت بار هارمونیک در شرایط فرکانس تشدید و برای عوامل مختلف و تأثیرگذار مورد بررسی قرار گیرد. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق خاک بستر، خاک‌ریز، هندسه دیوار، شتاب ارتعاش و فرکانس ارتعاش می‌باشند. خاک بستر مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ شامل خاک نوع یک تا چهار، خاک‌ریز پشت دیوار شامل سه نوع خاک دانه‌ای، هندسه دیوار شامل دیوار ۳ و ۶ متری و همچنین باری ارتعاشی از نوع هارمونیک سینوسی و در فرکانس اساسی سیستم (مود اول ارتعاش) مورد مطالعه قرار گرفته است تا جابه‌جایی لرزه‌ای بالا و پایین دیوار و متناظر با آن دوران تعیین شود. با انجام مدل‌سازی مختلف جابه‌جایی لرزه‌ای و ماندگار دیوار حائل وزنی مورد ارزیابی پارامتریک قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد جابه‌جایی لرزه‌ای و ماندگار دیوار در فرکانس اساسی با ارتفاع دیوار و شتاب زلزله نسبت مستقیم دارد اما با مشخصات مکانیکی و سختی خاک‌ریز پشت دیوار و شتاب متناظر گسیختگی خاک‌ریز نسبت معکوس دارد.

**واژگان کلیدی:** دیوار حائل وزنی، جابه‌جایی لرزه‌ای، دوران لرزه‌ای، بار هارمونیک، فرکانس اساسی، تحلیل عددی.

## ارزیابی پارامتریک دوران و جابه‌جایی دیوار حائل وزنی در زمان زلزله

سعید غفارپور جهرمی (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران،  
saeed\_ghf@sr.ac.ir

### ساره بحرینی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی  
ژئوتکنیک و آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید  
رجایی، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

دیوار اتفاق می‌افتد. بررسی‌هایی که توسط محققین بر روی دیواره‌های دوران‌کننده حول پایه صورت گرفته نشان می‌دهد که نیروی وارد بر دیواره‌ها در حالات مقاوم و محرک که بر اساس تئوری‌های کلاسیک موجود بیان می‌شود تفاوت دارد؛ به بیان دیگر این بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان و نحوه توزیع فشار وارد بر دیواره‌ها برخلاف تئوری‌های کلاسیک موجود (کولمب و رانکین) همواره خطی نبوده و میزان فشار وارد بر دیواره‌ها بستگی به میزان دوران آنها دارد [۲]. پیش‌بینی جابه‌جایی و دوران ایجاد شده در اثر زلزله، یک نکته مهم در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل است، تغییر مکان‌های بیش‌ازاندازه نه تنها باعث خرابی خود دیوار بلکه باعث ایجاد آسیب‌های جبران‌ناپذیری به سازه‌های مجاور دیوار حائل می‌شود.

نیومارک [۳] در سال ۱۹۶۵ روش بلوک لغزان را برای

دیوارهای حائل سازه‌هایی هستند که به عنوان دیواره محافظ کنار جاده‌ها، بندرها، تونل‌ها، پایه‌های کناری پل‌ها، مرز سواحل و رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. همچنین از این دیوارها برای جلوگیری از لغزش شیب‌هایی که بیش‌ازحد تند بوده و نمی‌توانند به حالت ایستاده باقی بمانند استفاده می‌شود [۱]. پایداری و مقاومت این دیوارها در برابر نیروهای جانبی خاک و سایر نیروهای خارجی توسط مقاومت خمشی و عمق نفوذشان در خاک تأمین می‌شود. در شرایط دینامیکی رفتار دیوارهای حائل به ابعاد دیوار، پارامترهای مقاومتی خاک خاک‌ریز و خاک زیر دیوار، اندرکنش خاک و دیوار و همچنین مشخصات و طبیعت بارهای وارده بر دیوار بستگی دارد.

در دیوارهای حائل حالت‌های مختلفی از جمله دوران دیوار حول پایه، حول رأس، انتقال دیواره و یا دوران همراه با انتقال

نمود. از این روش می‌توان نیروهای فشار جانبی خاک بر دیوارهای حائل را چه در حالت استاتیکی و چه در حالت لرزه‌ای تعیین کرد. ترندافر و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹ بر اساس روش تعادل حدی تغییر مکان لغزشی و دورانی دیوار حائل وزنی و همچنین تغییر مکان دورانی خاک ریزهای مسلح را به دست آوردند و نشان دادند که تغییر مکان لرزه‌ای خاک ریز مسلح کمتر از دیوار حائل وزنی است.

تیزاندو و رودریگز-روا [۱۱] در سال ۲۰۱۱ با توجه به تغییر شکل خاک و حرکت‌های دیوار روش ساده‌ای برای محاسبه تغییر مکان جانبی و دوران دیوارهای حائل وزنی در مقابل زلزله‌های قوی ارائه دادند. آنها با انجام تحلیل اجزای محدود، استفاده از فاکتور طراحی منحصربه‌فرد  $F_d$ ، برگرفته از روش بلوک لغزان نیومارک و شبیه‌سازی فرایند ساخت و ساز دیوار حائل و خاک ریز در سه مرحله و چندین مرحله تحلیل دینامیکی با نرم‌افزار پلکسیس (Plaxis) جابه‌جایی افقی بالا و پایین دیوار را به دست آوردند و نمودار جابه‌جایی برحسب فاکتور طراحی  $F_d$  را رسم کردند. ابراهیم [۱۲] در سال ۲۰۱۵ برای تحلیل عددی کرنش مسطح از برنامه پلکسیس استفاده کرد که در آن جابه‌جایی به مرز پایین خاک اعمال شد. این مطالعه نشان می‌دهد که جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار به‌طور مستقیم با زاویه مثبت شیب سطح پشت دیوار، انعطاف‌پذیری خاک و حداکثر شتاب زلزله زمین متناسب است. هرچه شیب سطح پشت دیوار بیشتر باشد به دلیل افزایش جرم و اینرسی خاک ریز احتمال لغزش و دوران دیوار کم می‌شود. شی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۶ در ارزیابی دوران دیوارهای حائل وزنی در زمان زلزله، تأثیر فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در خاک ریز را مورد تحقیق و پژوهش قرار دادند. در این تحقیق با توسعه‌ی روش 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 آن صرف‌نظر کرد.

محاسبه‌ی تغییر مکان شیب‌های خاکی پیشنهاد داد. روش بلوک لغزان نیومارک<sup>۱</sup> توسط ریچاردز و المز [۴] برای طراحی دیوارهای حائل وزنی اصلاح و توسعه داده شد. زنگ و استیدمن [۵] در سال ۲۰۰۰ برای محاسبه جابه‌جایی دورانی دیوار حائل وزنی که تحت بار لرزه‌ای قرار دارد از روش بلوک دورانی استفاده کردند. این روش شبیه روش شبه‌استاتیکی بلوک لغزش نیومارک است که یک شتاب آستانه در دوران تعریف می‌کند و هرزمانی که شتاب چرخش از شتاب آستانه بیشتر شود؛ دوران ماندگار ایجاد می‌شود. ناکامورا [۶] در سال ۲۰۰۶ دیوار حائل وزنی را با آزمایش سانتریفیوژ مدل کرد و تحت ۱۰ مدل بار از نوع زلزله و هارمونیک با فرکانس‌های مختلف قرار داد و با روش مونونوبه-اوکابه مقایسه کرد. ناکامورا به این نتیجه رسید که رفتار لرزه‌ای دیوار حائل و خاک ریز بر اساس شرایط فرضی نظریه مونونوبه-اوکابه با رفتار واقعی لرزه‌ای مطابقت ندارد. دیپانکار و سانجی [۷] در سال ۲۰۰۷ از روش شبه‌دینامیکی برای محاسبه جابه‌جایی دورانی دیوار حائل صلب تحت بار زلزله استفاده کردند. در روش پیشنهاد شده توسط آنها زمان، اختلاف فاز و اثر تشدید در انتشار امواج اولیه و برشی در بین دیوار حائل و خاک ریز در نظر گرفته شده است.

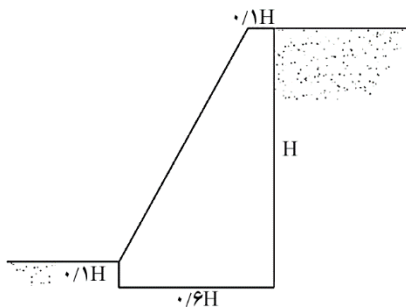
گلمغانی و حلییان [۸] در سال ۱۳۸۴ با بررسی دیوار حائل تحت بار زلزله در نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس، به این نتیجه رسید که روش مونونوبه-اوکابه برای خاک‌های ماسه‌ای با تراکم متوسط و نسبتاً سست جواب‌های قابل قبولی می‌دهد به طوری که با بزرگ‌تر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک جواب‌های روش مونونوبه-اوکابه کوچک‌تر از نیروهای حاصل از روش اجزای محدود است.

یزدانی و آزاد [۹] در سال ۱۳۸۶ برای تصحیح روش مونونوبه-اوکابه روشی را ارائه داد که می‌تواند تأثیرات عوامل مختلفی چون هندسه غیرخطی سطح زمین پشت دیوار، مقاومت چسبندگی مصالح و عمق ترک کششی و همچنین سطح آب زیرزمینی را که در روش مونونوبه-اوکابه قابل بررسی نیست، به‌راحتی در تعیین نیروهای رانش فعال و منفعل خاک ارزیابی

میزان جابه‌جایی و دوران دیوار ناشی از بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. در این بررسی تأثیر عوامل مختلف شامل فرکانس بارگذاری، هندسه دیوار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک ریز و خاک کف دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- بیان مسئله، هندسه دیوار و مشخصات مصالح

در این تحقیق جابه‌جایی و دوران روی دو نوع دیوار حائل وزنی با هندسه متفاوت از جنس مصالح بنایی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. ارتفاع دیوار ۳ و ۶ متر و جزئیات هندسه آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. معمولاً این نوع دیوارها از سنگ، آجر و مصالح بنایی ساخته می‌شوند اما در تحقیق حاضر جنس دیوار بتنی لحاظ شده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن در جدول (۱) ارائه شده است. در این تحلیل خاک قرار گرفته در بخش خاک ریز پشت دیوار از نوع خاک دانه‌ای (با دانه‌بندی ماسه) و به صورت غیر اشباع (با رطوبت طبیعی یا خشک) در نظر گرفته شده است. ارتفاع خاک ریز پشت دیوار هم‌تراز با ارتفاع دیوار و سطح آن افقی (غیر شیب‌دار) لحاظ شد که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن برای سه نوع خاک دانه‌ای متفاوت (B3, B2, B1) که در این بررسی مورد ارزیابی قرار گرفته است در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): هندسه و ابعاد دیوار.

جدول (۱): مشخصات مصالح دیوار.

مقدار	واحد	مشخصه
۲۴۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب	وزن مخصوص
۲۰	گیگا پاسکال	مدول الاستیسیته
۰/۲	بی بعد	نسبت پواسون

پاین و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶ به بررسی دوران ناشی از زلزله در دیوارهای حائل وزنی به روش شبه‌دینامیکی<sup>۲</sup> پرداختند. نتیجه این تحقیق که بر روی خاک‌های ریزدانه خشک انجام شده است نشان می‌دهد که مشخصات زلزله‌ی ورودی نسبت به مشخصات هندسی دیوار و مشخصات فیزیکی خاک، تأثیر بیشتری بر دوران لرزه‌ای دیوار حائل وزنی دارد. وو و پراکاش [۱۵] در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار روش طراحی دیوارهای حائل وزنی بر اساس کنترل تغییر مکان لرزه‌ای را مطرح کردند. در این تحقیق به روش عددی از رفتار غیرخطی خاک با لحاظ کردن سختی و میرایی برای تحلیل و طراحی استفاده شده است که بیانگر دقت مناسب این روش با مشاهدات تجربی در زلزله‌های اخیر بوده است. ابایدور و پریشاتی [۱۶] در سال ۲۰۱۷، توزیع فشار دینامیکی دیوارهای حائل را با روش شبه‌استاتیکی<sup>۳</sup> اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند که نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد نسبت میرایی خاک نقش مهمی در میزان و نحوه توزیع فشار دینامیکی خاک بر دیوار حائل دارد که متناسب با آن میزان جابه‌جایی دیوار نیز تحت تأثیر میرایی خاک قرار می‌گیرد. هان و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر اشباع بودن خاک ریز و فشار آب منفذی بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوارهای حائل پرداختند. نتیجه این بررسی نشان داد که فشار آب حفره‌ای در طول زلزله متناسب با شتاب افقی و شتاب قائم زلزله افزایش یافته و باعث تأثیر محسوس بر جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد شد.

جمع‌بندی مطالعات فوق نشان می‌دهد طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل بر اساس عملکرد و توجه به میزان جابه‌جایی و دوران آنها در طول زلزله یکی از موضوعات رایج و جدید محققان مختلف بوده است. در این راستا روابط تحلیلی و عددی مختلفی توسط محققان ارائه شده است که هر یک دارای محدودیت‌هایی در برآورد مقادیر جابه‌جایی لرزه‌ای می‌باشند و تأثیر تمامی عوامل را در تحلیل و طراحی لحاظ نمی‌کنند. لذا در این تحقیق با روش عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس پاسخ دیوارهای حائل صلب بتنی تحت بار سیکلی به صورت هارمونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ارتباط بین

### ۳- تعیین ضرایب میرایی رایلی

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

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

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 ( $\dot{u}$ ) و شتاب ( $\ddot{u}$ ) با زمان تغییر می‌نمایند. 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 که در رابطه (۲) آمده است:

$$M + \beta_R \cdot C = \alpha_R \quad (2)$$

در این رابطه  $\alpha_R$  و  $\beta_R$  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  $\eta_i$ ، برای هر فرکانس زاویه‌ای سیستم ( $\omega_i$ ) از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است:

جدول (۲): مشخصات خاک ریز پشت دیوار.

مشخصه	واحد	ماسه سست B1	ماسه متوسط B2	ماسه متراکم B3
وزن مخصوص	کیلوگرم بر متر مکعب	۱۷۰۰	۱۸۰۰	۱۹۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۲۵	۳۰	۳۵
چسبندگی	مگاپاسکال	۰	۰	۰
مدول یانگ	مگاپاسکال	۱۰	۳۰	۵۰
نسبت پواسون	بدون بعد	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۵
زاویه اتساع	درجه	۲	۵	۱۰
سرعت موج برشی	متر بر ثانیه	۱۲۵	۲۵۰	۴۰۰

برای بستر خاک کف که دیوار بر روی آن ساخته و مستقر شده است نوع زمین از نوع یک تا چهار مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) استفاده شده است. ملاک طبقه‌بندی ساختمان در آیین‌نامه ۲۸۰۰ مشخصات خاک، لایه‌بندی و سرعت موج برشی تا عمق حدود ۳۰ متر می‌باشد. به همین دلیل در این تحلیل با ملاک عمل قرار دادن سرعت موج برشی، خاک کف دیوار به گونه‌ای انتخاب شده است که با طبقه‌بندی زمین بر اساس آیین‌نامه تطابق داشته باشد. سفره آب زیرزمینی در اعماق پایین دست فرض شده و لایه خاک کف دیوار غیر اشباع در نظر گرفته شده است که مشخصات آن در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مشخصات ساختمان و خاک بستر کف دیوار.

نوع زمین	مواد متشکل ساختمان مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول یانگ (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی	زاویه اتساع
F1	سنگ‌های آذرین، سنگ‌های رسوبی سخت و بسیار مقاوم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر تا سطح زمین	۸۵۰	۲۲۰۰	۸۰	۰/۳	۴۵	۱۰
F2	سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست، خاک‌های سخت شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت	۵۶۵	۲۰۰۰	۴۰	۰/۳۵	۳۵	۷
F3	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس سخت	۲۷۵	۱۸۰۰	۳۰	۰/۴	۳۰	۵
F4	خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیر چسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا سفت	۱۲۵	۱۷۰۰	۲۰	۰/۴۵	۲۵	۲

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 مد نظر قرار گرفته است، لذا میرایی بحرانی متوسط خاک برابر ۵ درصد لحاظ شده است.

#### ۴- بررسی تحلیل و پایداری استاتیکی

در بررسی اولیه این تحلیل لازم است پایداری استاتیکی و تحلیل ژئوتکنیکی با کنترل لغزش، واژگونی و فشار وارد پنجه دیوار در تمامی دیوارها کنترل شود که بررسی‌های نشان داد در تمامی حالت‌ها، 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 است.

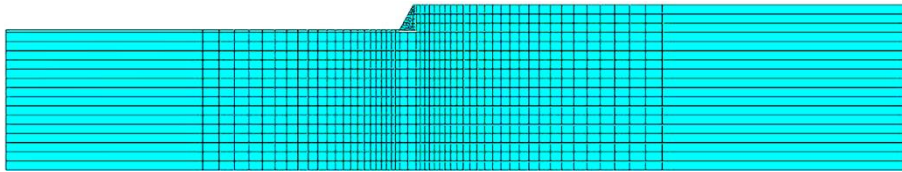
#### ۵- جزئیات و فرضیات مدل‌سازی، بارگذاری و شرایط مرزی

محیط خاک به صورت همگن، نیمه‌بی‌نهایت و همسان در نظر گرفته شده است. همچنین برای شبیه‌سازی محیط خاک از مدل الاستوپلاستیک<sup>۶</sup> بر پایه معیار گسیختگی مناسب استفاده شده است. برای خاک از المان‌های چهارضلعی چهار گره‌ای از نوع CPE4R استفاده شده است زیرا در نرم‌افزار آباکوس این نوع المان‌ها نسبت به المان‌های مثلثی توانایی بیشتری در بیان جابه‌جایی افقی و قائم گره‌ها دارد. طول دیوار معمولاً در ابعاد بزرگ اجرا می‌شود، در مدل نرم‌افزاری می‌توان از مدل دو بعدی کرنش مسطح برای ساده‌سازی تحلیل استفاده کرد که فرضی منطقی است. انتخاب اندازه مش به طول موج انتشاری وابسته است. در حالت کلی می‌توان گفت اندازه مش باید از یک‌هشتم تا یک‌دهم کوتاه‌ترین طول موج کوچک‌تر باشد. طول موج حاصل ضرب سرعت موج برشی خاک در بیشترین

$$\zeta_i \omega_i = 2\alpha + \beta\omega_i^2 \quad (۳)$$

$$\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i = \frac{1}{2\zeta_i} \quad (۴)$$

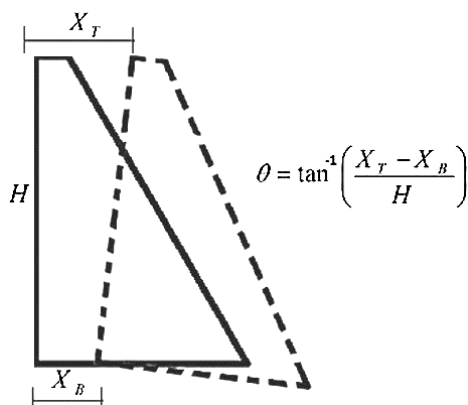
در این روابط  $\omega_i$  فرکانس طبیعی مود ارتعاشی نام (برحسب رادیان بر ثانیه) است. مطابق روابط فوق در فرکانس‌های پایین، جمله میرایی متناسب با جرم است و در فرکانس‌های بالا، جمله میرایی متناسب با سختی بوده و تأثیر بیشتر و نقش مهم‌تری را ایفا می‌کنند. با فرض ثابت بودن میرایی در فرکانس‌های مختلف و تعیین دو فرکانس طبیعی سیستم، با استفاده از رابطه (۴) می‌توان ضرایب  $\alpha_R$  و  $\beta_R$  را تعیین نمود. هر سیستم دینامیکی تحت فرکانس‌های طبیعی خود، ارتعاش درونی دارد و کمترین فرکانس طبیعی هر سیستم به‌عنوان فرکانس اصلی یا فرکانس اساسی<sup>۴</sup> 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 مدول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فرکانس طبیعی و شکل مدهای متناظر با آن، به هندسه سیستم، مشخصات مواد و مصالح سیستم و همچنین شرایط تکیه‌گاهی در سیستم بستگی دارند. در دو دهه‌ی گذشته، آنالیز مودال<sup>۵</sup> به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مختلف مهندسی و به‌خصوص سازه‌های ژئوتکنیک تبدیل شده است. آنالیز مودال، فرایند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مدها و به‌کارگیری آنها برای ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل 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 مدهای ارتعاشی، وابسته به دینامیک سیستم است و به وسیله خواص فیزیکی (جرم، سختی، میرایی) و نحوه توزیع فضایی آنها تعیین می‌شوند و در پیش‌بینی پاسخ یک سازه به ارتعاشات محیطی و یا بارهای خارجی کاربردهای زیادی



شکل (۲): جزئیات مش بندی و مدل شبکه بندی.

### ۶- نحوه محاسبه دوران دیوار

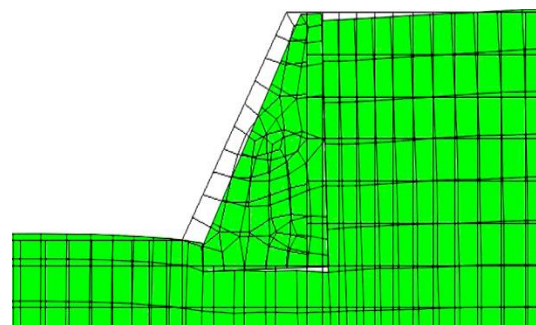
جابه جایی دیوار زمانی آغاز می شود که شتاب وارده بتواند گوه گسیختگی در پشت دیوار را فعال کند به عبارتی شتاب وارده باید از شتاب آستانه گسیختگی مطابق با روابط نیومارک بیشتر باشد. با شروع جابه جایی دیوار، تغییر شکل هر سیکل بارگذاری به تغییر شکل های قبلی افزوده و در نتیجه تغییر مکان ماندگار دیوار فزونی خواهد یافت. در هر سیکل بارگذاری، بخشی از جابه جایی برگشت پذیر است اما به دلیل اینرسی متفاوت دیوار و خاک ریز، برگشت پذیری کامل تحت بار هارمونیک نخواهیم داشت. جابه جایی تجمعی دیوار در پایان هر تحلیل به عنوان نتیجه نهایی گزارش می شود. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر یک متغیر روی نتایج تحلیل، بقیه متغیرها برای تمامی مدل ها، ثابت در نظر گرفته شده است. تغییر هر متغیر باعث تغییر در میزان جابه جایی بالای دیوار، جابه جایی پایین دیوار و در نتیجه تغییر در میزان دوران دیوار خواهد شد. محاسبه دوران مطابق شکل (۴) و رابطه آن استفاده شده است. در محاسبه دوران،  $X_T$  جابه جایی بالا،  $X_B$  جابه جایی پایین و  $H$  ارتفاع دیوار است.



شکل (۴): محاسبه زاویه دوران دیوار.

فرکانس ارتعاش در نظر گرفته می شود. مش بندی نواحی اطراف دیوار ریزتر و برای نواحی با تأثیر کمتر (قسمت های دور از دیوار)، بزرگ تر در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) مدل مش بندی دیوار نشان داده شده است.

در مدل کردن مسائل مربوط به ژئوتکنیک، معمولاً ناحیه مورد نظر به اندازه ای بزرگ است که می توان آن را از نظر محاسباتی به صورت بی نهایت در نظر گرفت. در تحلیل های دینامیکی از مرز جاذب دینامیکی یا مرز جاذب انرژی<sup>۷</sup> استفاده می شود. در این تحقیق برای جلوگیری از انتشار امواج از مرز جاذب دینامیکی از نوع مرز آرام<sup>۸</sup> استفاده شده است. به این صورت که در مرزهای کناری دیوار، المان به صورت بی نهایت در نظر گرفته شده است. همچنین در قسمت پایین مدل، سیستم در جهت افقی و قائم مقید شده است. بارگذاری به صورت هارمونیک از نوع سینوسی با ۱۲ چرخه و در فرکانس اساسی سیستم خاک و دیوار (اولین فرکانس طبیعی) با شتاب های  $0.2g$ ،  $0.4g$  و  $0.6g$  به زیر مدل اعمال شده است. لازم به ذکر است فرکانس اساسی هر مدل متفاوت می باشد که برای به دست آوردن فرکانس طبیعی هر مدل از تحلیل فرکانسی استفاده شده است. در شکل (۳) نمونه ای از مدل تغییر شکل یافته دیوار نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل تغییر شکل یافته دیوار.

داده‌های حاصل از آن تحقیق با روش عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار مورد مقایسه قرار گرفته است که می‌توان گفت هم‌خوانی نسبتاً مناسبی بین نتایج وجود دارد.

جدول (۴): خصوصیات مواد و مصالح دیوار و خاک ریز.

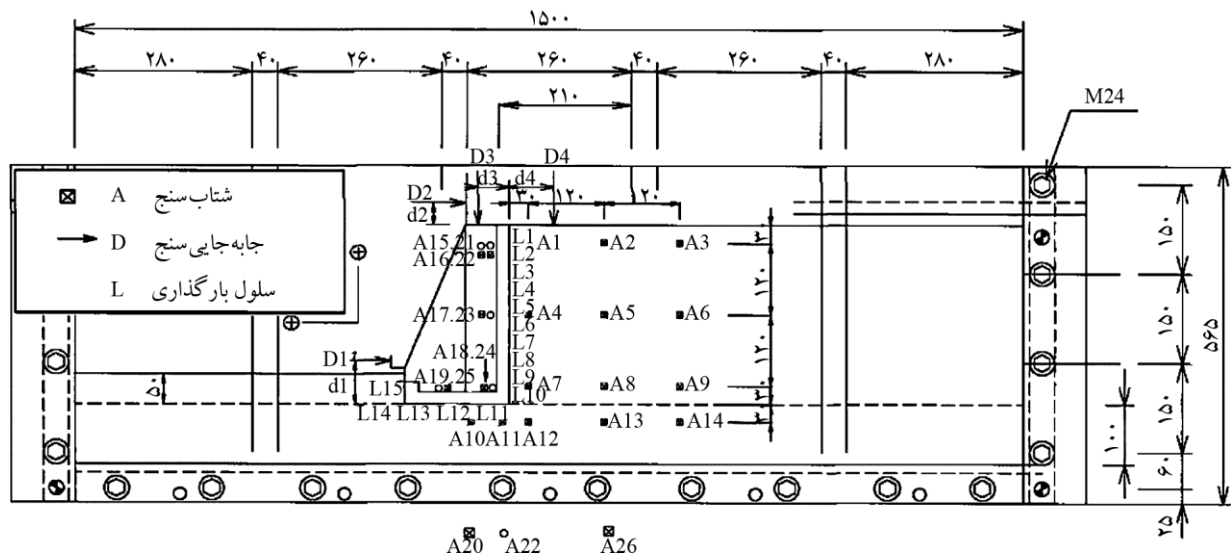
نوع مصالح	بتن	ماسه
وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۴۰۰	۱۶۴۵
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	$۲/۰۵۶ \times ۱۰^۴$	۴۰
ضریب پواسون	۰/۲	۰/۳۳
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	-	۴۲
زاویه اصطکاک با دیوار (درجه)	-	۲۸

## ۸- تأثیر خاک بستر کف دیوار بر میزان جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای

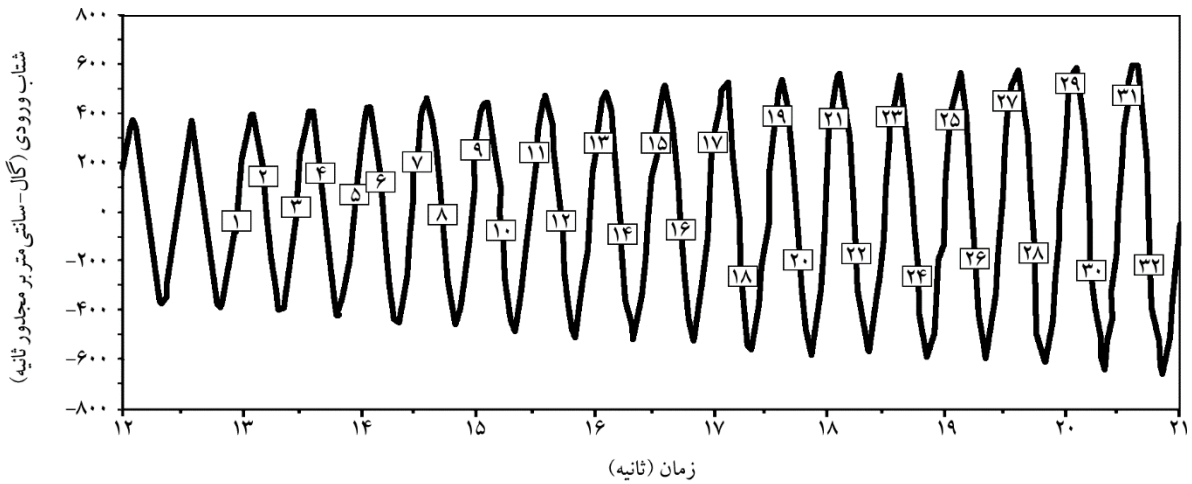
نتایج بررسی تأثیر ساختگاه و خاک کف دیوار بر رفتار لرزه‌ای دیوار حائل و میزان جابه‌جایی و دوران در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در این بررسی مشخصات مصالح در تمامی مدل‌ها به جز خاک کف دیوار ثابت در نظر گرفته شده است اما مشخصات ساختگاه مطابق با چهار نوع زمین به عنوان متغیر لحاظ شده است. شکل‌های (۸) و (۹) بیانگر تأثیر خاک بستر بر جابه‌جایی به ترتیب برای دیوار ۳ متری و ۶ متری را نشان می‌دهد.

## ۷- صحت‌سنجی و دقت مدل‌سازی عددی

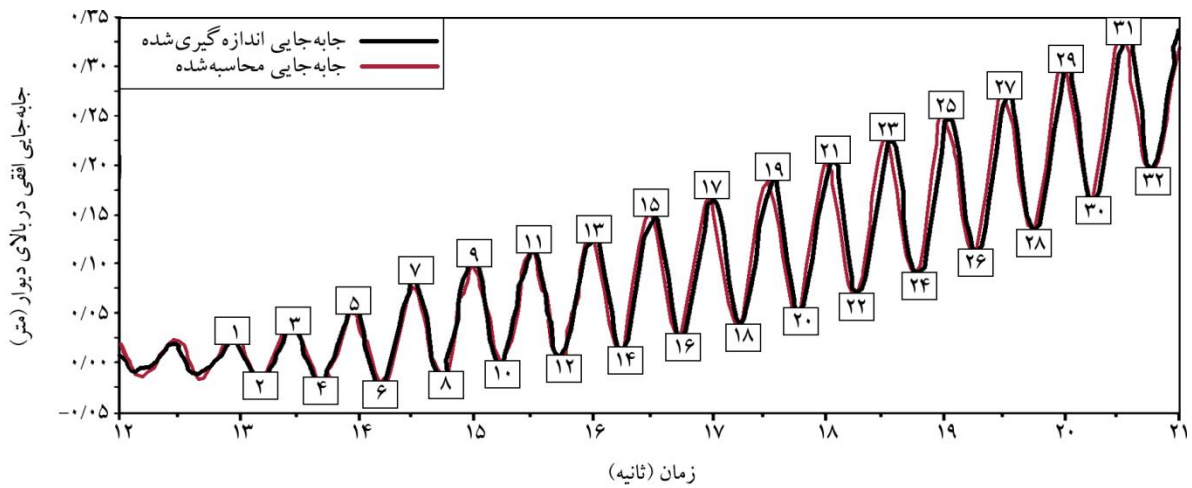
به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی عددی می‌توان نخست بدون وجود دیوار پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در شرایط آزاد را مدل نموده و با نتایج تحلیلی موجود مقایسه کرد و در ادامه با در نظر گرفتن دیوار، نسبت به بررسی پاسخ لرزه‌ای در فواصل مختلف اقدام نماید. از مقایسه این نتایج می‌توان صحت مدل‌سازی عددی مشخص شود اما در این تحقیق از نتایج آزمون‌های در مقیاس آزمایشگاهی برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و دقت‌سنجی روش عددی به کار گرفته شده در این تحقیق که با نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) انجام شده است، از نتایج تحقیق ناگومارا [۶] در سال ۲۰۰۶ استفاده شد. آنان در این پژوهش دیوار حائل وزنی را تحت آزمایش در سانتیفریوژ تحت ۱۰ نوع بارگذاری هارمونیک با فرکانس‌های مختلف قرار دادند و نتایج را با روش مونونوبه-اوکابه مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که رفتار لرزه‌ای دیوار حائل و خاک ریز تحت بار هارمونیک با نظریه مونونوبه-اوکابه مطابقت ندارد. هندسه مدل‌سازی فیزیکی در شکل (۵) و مشخصات مواد و مصالح به کار گرفته شده برای دیوار و خاک ریز در این تحقیق در جدول (۴) آورده شده است. همچنین شکل (۶) نحوه بارگذاری سیکلی به صورت هارمونیک را نشان می‌دهد [۶]. در شکل (۷) نتایج مقایسه



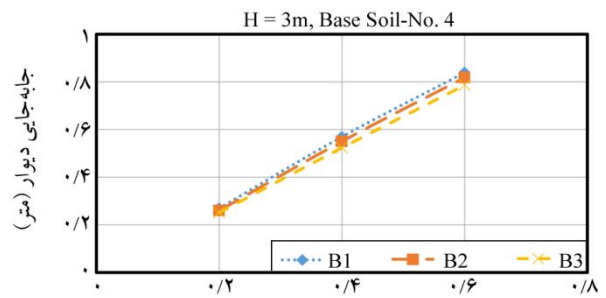
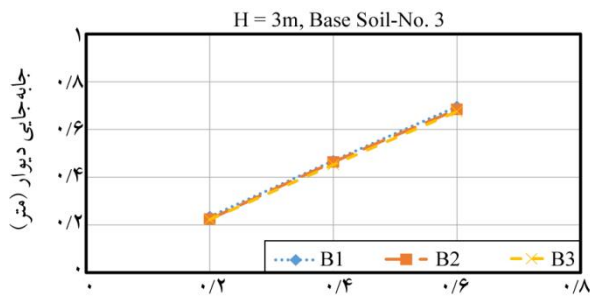
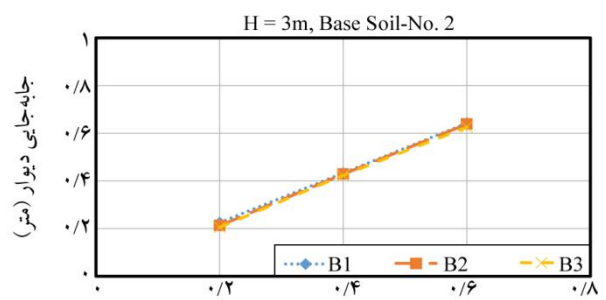
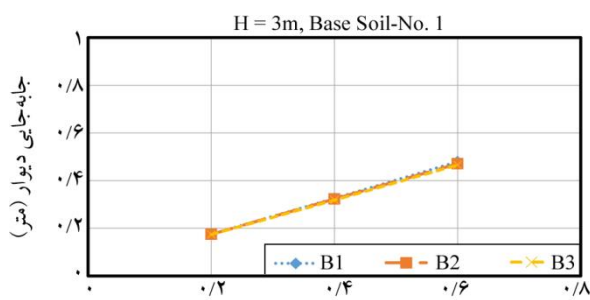
شکل (۵): مدل‌سازی فیزیکی دیوار حائل وزنی در سانتیفریوژ (ابعاد به میلی‌متر) [۶].



شکل (۶): بارگذاری مدل مقاله بررسی شده [۶].



شکل (۷): نمودار صحت سنجی جابہ جایی - زمان [۶].

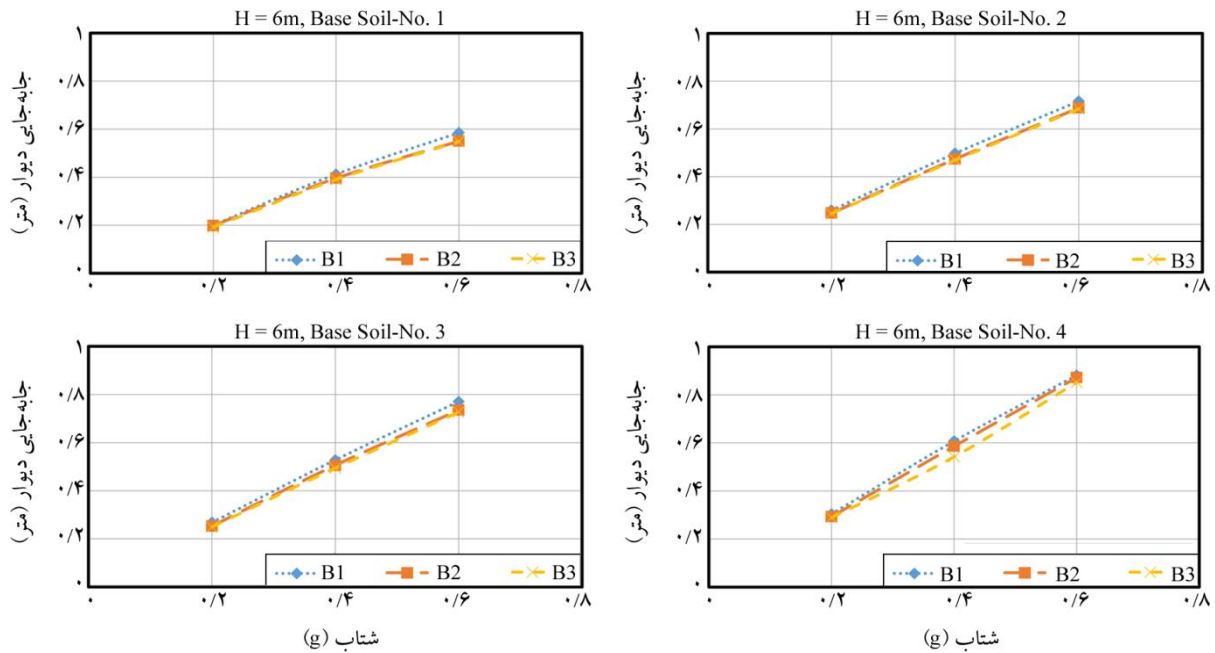


شتاب (g)

شتاب (g)

شکل (۸): نمودار تأثیر خاک بستر دیوار حائل ۳ متری بر جابہ جایی لرزه‌ای.





شکل (۹): نمودار تأثیر خاک بستر دیوار حائل ۶ متری بر جابه‌جایی لرزه‌ای.

می‌یابد. در حالت کلی می‌توان گفت که افزایش تراکم خاک دانه‌ای بیانگر افزایش زاویه اصطکاک داخلی، افزایش سختی و مدول الاستیسیته و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری خاک می‌باشد. این افزایش ظرفیت باربری باعث کاهش نشست خاک در پنجه دیوار تحت بارهای وارده می‌شود در نتیجه جابه‌جایی و دوران دیوار کاهش می‌یابد. تغییرات دوران دیوار تحت تأثیر نوع ساختگاه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج شکل (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند میزان دوران دیوار در ساختگاه نوع چهار (۵/۶۸ درجه) به میزان ۶۰ درصد بیش از مقدار مناظر در ساختگاه نوع اول (۲/۲۳ درجه) می‌باشد. این نتیجه نیز متأثر از تغییر مشخصات خاک در ساختگاه‌های متفاوت است به طوری که در خاک‌های نرم و سست، توزیع و نقطه اثر فشار دینامیکی وارد بر دیوار باعث افزایش اختلاف در جابه‌جایی بالا و پایین دیوار و متعاقب آن افزایش دوران دیوار می‌شود.

### ۹- تأثیر مشخصات خاک ریز دیوار حائل بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای

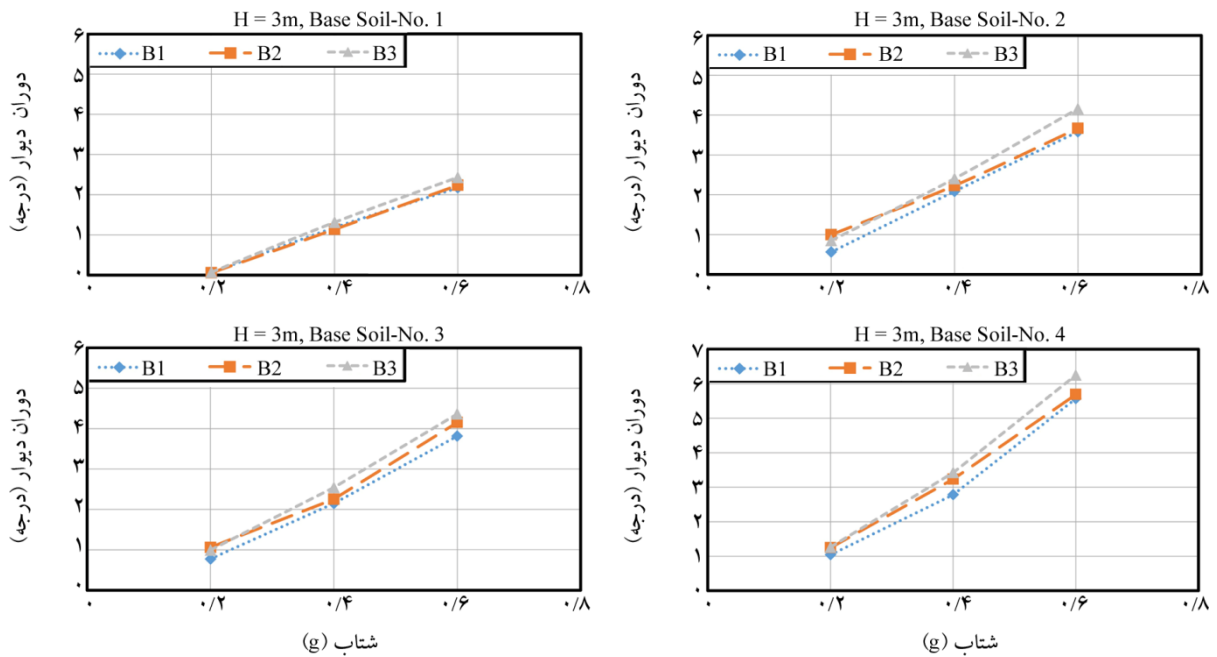
محققان مختلف بر تأثیر مشخصات خاک ریز پشت دیوارهای حائل بر رفتار لرزه‌ای دیوار اتفاق نظر دارند به طوری که بر جابه‌جایی و

بررسی نتایج در دیوار ۳ متری نشان می‌دهد مقدار جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار به نوع ساختگاه وابسته است به طوری که در ساختگاه نوع یک کمترین مقدار جابه‌جایی و در ساختگاه نوع چهار بیشتر مقدار جابه‌جایی رخ می‌دهد. جابه‌جایی در ساختگاه یک ۰/۳۵۷ متر بوده که کمتر از ساختگاه دو بوده (۰/۴۸۸ متر) که نسبت کاهش ۲۷ درصد را نشان می‌دهد. همچنین جابه‌جایی لرزه‌ای در ساختگاه دو کمتر از ساختگاه سه (۰/۵۲ متر) و نسبت کاهش ۸ درصد را نشان می‌دهد. در ساختگاه نوع چهار نیز میزان جابه‌جایی لرزه‌ای حداکثر می‌باشد (۰/۶۳۵ متر) که نسبت کاهش ۱۹ درصد را در مقایسه با ساختگاه نوع ۳ نشان می‌دهد. به عبارت دیگر درصد تغییر جابه‌جایی بالای دیوار حائل در خاک بستر نوع چهارم نسبت به خاک نوع اول به مقدار ۷۷ درصد دچار افزایش شده است. این روند افزایش جابه‌جایی در تمامی مدل‌ها مشخص است.

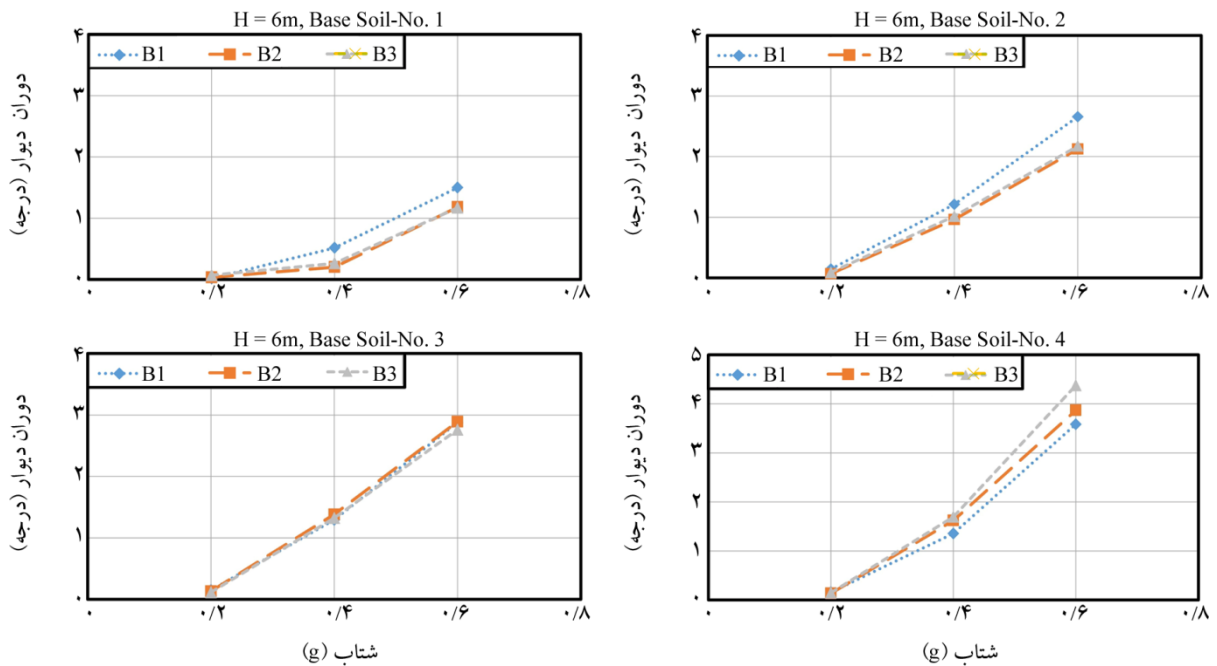
بررسی نتایج در شکل (۹) برای دیوار ۶ متری نیز بیانگر روند تأثیر نوع ساختگاه مشابه دیوار ۳ متری می‌باشد به طوری که میزان جابه‌جایی لرزه‌ای در ساختگاه نوع چهار حدود ۷۳ درصد بیش از ساختگاه نوع یک می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند با تغییر مشخصات خاک و افزایش تراکم خاک بستر، مقدار جابه‌جایی چه در قسمت تاج و چه در قسمت پاشنه دیوار کاهش

و هم خاک کف بستر سست و غیرتراکم باشند. با بررسی این نتایج در حالت کلی می‌توان گفت که با کاهش مشخصات مکانیکی خاک ریز یعنی کاهش زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته و وزن مخصوص، مقدار جابه‌جایی افزایش می‌یابد چراکه با کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز، ضریب فشار محرک استاتیکی و دینامیکی افزایش یافته و در نتیجه نیروی محرک نیز افزایش می‌یابد.

دوران لرزه‌ای دیوار اثر مستقیم دارد. نتایج این تحقیق در بررسی تأثیر مشخصات خاک ریز در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب برای دیوار ۳ متری و ۶ متری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود با تغییر مشخصات مکانیکی خاک ریز شامل افزایش تراکم، اصطکاک داخلی و سختی، جابه‌جایی دیوار کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار جابه‌جایی در شرایط اتفاق خواهد افتاد که هم خاک ریز



شکل (۱۰): نمودار تأثیر خاک بستر دیوار حائل ۳ متری بر دوران لرزه‌ای.

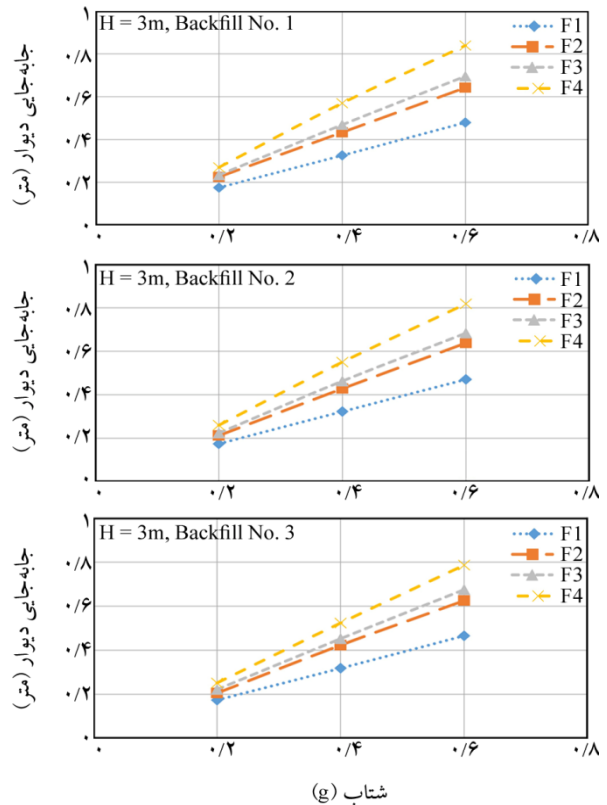


شکل (۱۱): نمودار تأثیر خاک بستر دیوار حائل ۶ متری بر دوران لرزه‌ای.

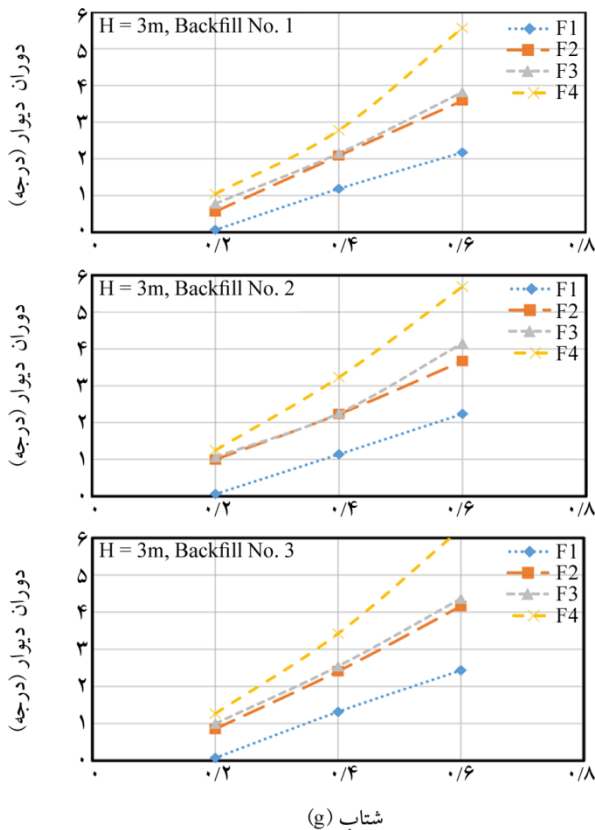
همچنین در خاک‌های سست نقطه اثر توزیع فشار دینامیکی در تراز بالاتری قرار گرفته و این افزایش نیروی محرک باعث افزایش لنگر محرک و به دنبال آن افزایش جابه‌جایی و دوران دیوار خواهد شد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نتایج تأثیر خاک‌ریز برای دوران لرزه‌ای دیوار حائل ۳ متری و ۶ متری را به ترتیب نشان می‌دهند. بررسی نتایج این شکل‌ها نشان می‌دهد تحت ارتعاش اساسی سیستم، مشخصات خاک‌ریز روند مشخصی در افزایش و یا کاهش دوران دیوار حائل ندارد و چنین استنباط می‌شود دوران دیوار حائل می‌تواند مستقل از نوع خاک و مشخصات خاک‌ریز در شرایط تشدید باشد.

### ۱۰- تأثیر ارتفاع دیوار بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای

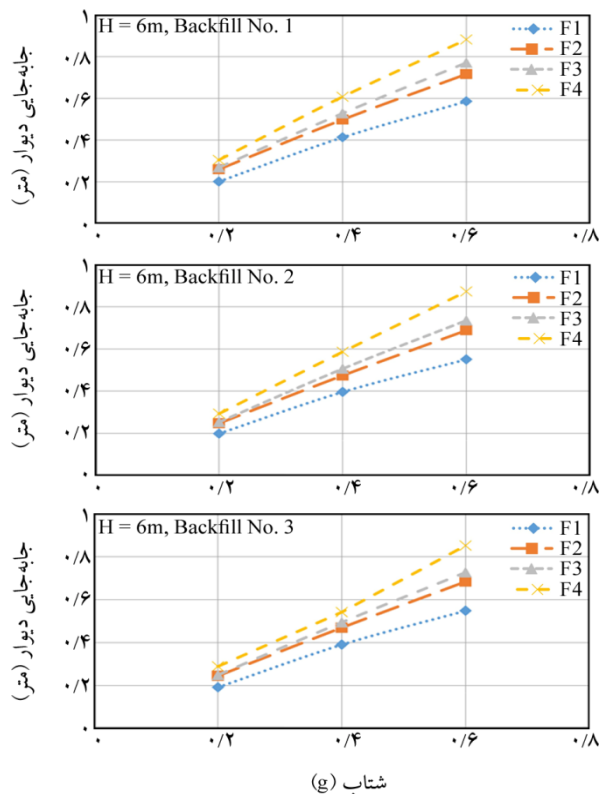
بررسی نتایج این تحقیق بیانگر این موضوع است که هندسه ابعادی دیوار به‌طور مستقیم بر میزان جابه‌جایی لرزه‌ای تأثیرگذار است به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار از ۳ متر به ۶ متر و به دنبال آن افزایش قاعده دیوار، باعث افزایش محسوس در میزان جابه‌جایی تاج دیوار و پایه دیوار تا ۴۲ درصد می‌شود.



شکل (۱۲): نمودار تأثیر نوع خاک‌ریز بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار حائل ۳ متری.

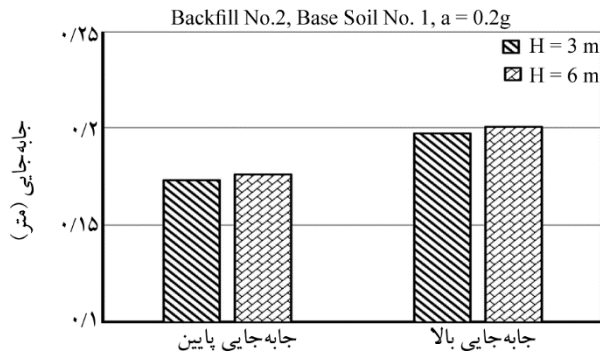


شکل (۱۴): تأثیر نوع خاک‌ریز بر دوران لرزه‌ای دیوار حائل ۳ متری.

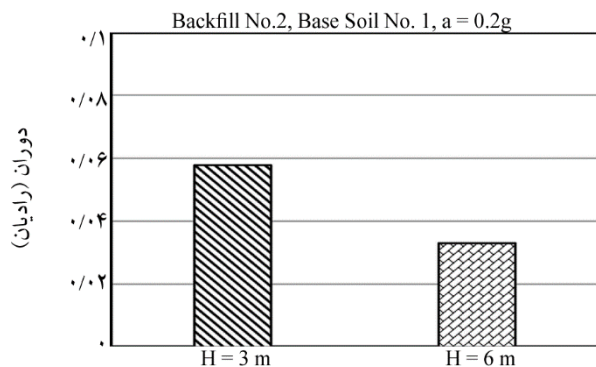


شکل (۱۳): نمودار تأثیر نوع خاک‌ریز بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار حائل ۶ متری.

موجب کاهش دوران دیوار می شود. این نتیجه در تحقیقات برخی محققان قبلی نظیر ابراهیم [۱۲] نیز گزارش شده است.



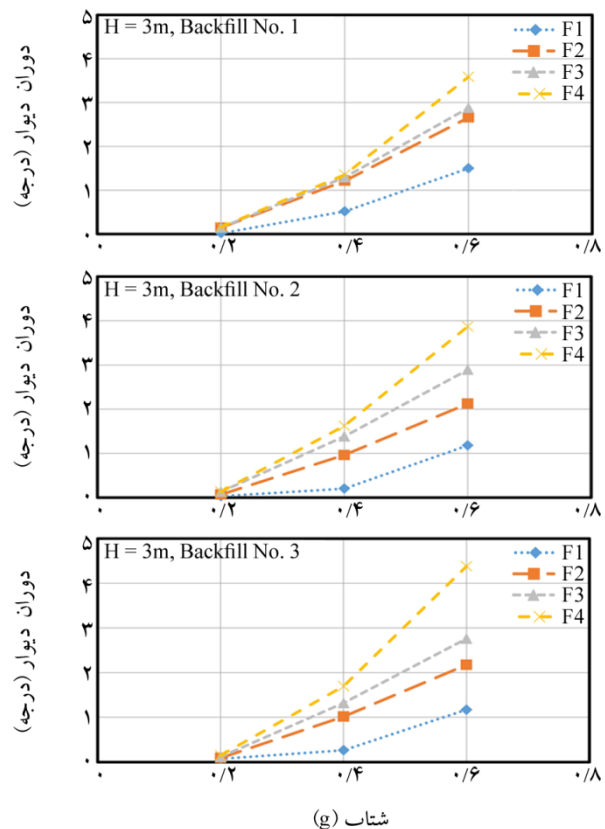
شکل (۱۶): تأثیر ارتفاع دیوار بر جابه جایی لرزه ای دیوار.



شکل (۱۷): تأثیر ارتفاع دیوار بر دوران لرزه ای دیوار.

## ۱۱- تأثیر شتاب بارگذاری بر جابه جایی و دوران

در این تحقیق از سه نوع شتاب متفاوت برای بارگذاری و بررسی پاسخ دیوار استفاده شده است. برای بررسی اثر شتاب بارگذاری بر رفتار لرزه ای دیوار، در تحلیل های انجام یافته ارتفاع دیوار، مشخصات خاک ریز و خاک بستر ثابت در نظر گرفته شده و تنها مقدار شتاب بارگذاری متغیر می باشد. در شکل های (۱۸) و (۱۹) به صورت نمونه تغییرات اثر شتاب بارگذاری بر جابه جایی و دوران دیوار ۳ متری در خاک ریز نوع ۲ و خاک بستر نوع ۳ نشان داده شده است. همان گونه که این شکل ها نشان می دهند با افزایش شتاب بارگذاری، مقدار جابه جایی و دوران دیوار افزایش می یابد، به طوری که مقدار جابه جایی افقی بالای دیوار در شتاب  $0.2g$  با مقدار  $0.25$  متر، با افزایش شتاب به  $0.4g$  به  $0.52$  متر و در شتاب  $0.6g$  به میزان  $0.73$  متر افزایش می یابد. در واقع جابه جایی دیوار با



شکل (۱۵): تأثیر نوع خاک ریز بر دوران لرزه ای دیوار حامل ۶ متری.

همین طور این نتایج نشان می دهند که افزایش ارتفاع دیوار سبب کاهش میزان دوران دیوار تا ۵ درصد شده است هر چند میزان این کاهش چندان محسوس نیست ولی در هر دو ارتفاع قابل مشاهده است. این نتیجه با روابط معرفی شده توسط ریچاردز و دیگر محققان همسو می باشد به طوری که با افزایش ارتفاع دیوار، مؤلفه رانش دینامیکی نیز با توان دو افزایش می یابد که به طور مستقیم باعث افزایش لنگر محرک و جابه جایی دیوار خواهد شد. همان طور که در شکل های (۱۶) و (۱۷) مشاهده می شود با افزایش ارتفاع دیوار مقدار جابه جایی افزایش و در مقابل مقدار دوران کاهش می یابد. علت کاهش دوران می تواند ناشی از تغییر هندسه (افزایش قاعده دیوار) و همچنین تغییر توزیع فشار جانبی و موقعیت نیروی برآیند وارد بر دیوار باشد. بر طبق رابطه مونونوبه-اوکابه افزایش ارتفاع دیوار موجب افزایش نیروی دینامیکی اعمالی به دیوار است؛ که این افزایش نیروی دینامیکی باعث افزایش لنگر محرک و همچنین موجب افزایش جابه جایی دیوار می شود. با افزایش ارتفاع دیوار، اختلاف جابه جایی بالا و پایین دیوار کاهش می یابد؛ این کاهش اختلاف جابه جایی،

جدول (۵): فرکانس اساسی بر حسب ارتفاع دیوار، نوع خاک ریز و خاک بستر (هرتز).

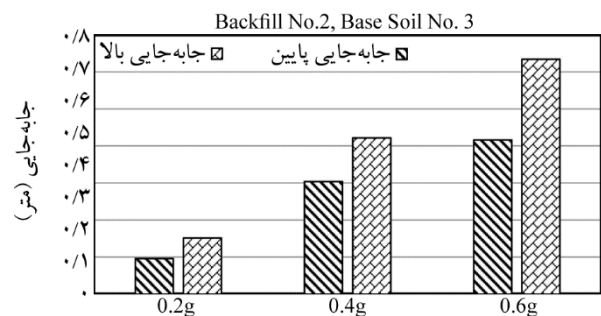
خاک ریز	خاک بستر	H= 6 m	H= 3 m
B1	F1	۱/۴۹۹۹۱	۱/۷۹۵۰۱
	F2	۱/۲۰۳۲۲	۱/۳۷۳۹۱
	F3	۱/۱۰۳۵۱	۱/۲۵۴۳۱
	F4	۰/۹۶۲۲۸	۱/۰۸
B2	F1	۱/۶۰۰۴۱	۱/۸۰۶۴۱
	F2	۱/۲۴۰۴۱	۱/۳۸۰۲۱
	F3	۱/۱۲۹۶۸	۱/۲۵۸۹۱
	F4	۰/۹۷۶۴۳	۱/۰۸۲۶۱
B3	F1	۱/۶۱۲۷۱	۱/۸۰۵۵۱
	F2	۱/۲۴۲۳۱	۱/۳۷۸۶۱
	F3	۱/۱۲۹۵۱	۱/۲۵۶۹۱
	F4	۰/۹۷۴۳۳	۱/۰۸۰۲۶

### ۱۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

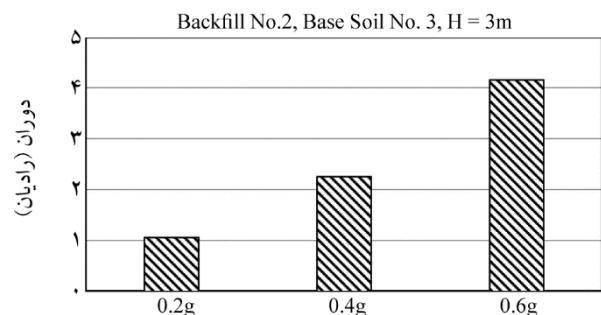
در این تحقیق همان‌گونه که اشاره شد تأثیر نوع و مشخصات فیزیکی و مکانیک خاک بستر و خاک ریز و همچنین هندسه دیوار حائل وزنی بر جابه‌جایی افقی و دوران لرزه‌ای در شرایط مختلف شتاب لرزه‌ای به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های عددی تحت بارگذاری هارمونیک از نوع سینوسی در فرکانس اساسی مدل (فرکانس طبیعی مود اول) مورد تحلیل قرار گرفتند که از داده‌ها و اطلاعاتی ورودی و خروجی این مدل‌سازی‌های عددی، جابه‌جایی تاج و پایین دیوار حائل وزنی مورد ارزیابی و مطالعه پارامتریک قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود.

- با افزایش مشخصات مکانیکی خاک ریز و به دنبال آن افزایش تراکم و سختی، فشار جانبی ناشی از ارتعاش لرزه‌ای خاک ریز بر دیوار حائل کاهش یافته و در نتیجه جابه‌جایی بالا و پایین دیوار کاهش می‌یابد.
- با افزایش مشخصات مکانیکی خاک بستر کف دیوار و به دنبال آن افزایش باربری خاک کف در پنجه دیوار، مقدار نشست و در نتیجه دوران دیوار کاهش می‌یابد. همچنین این موضوع بر فرکانس اساسی سیستم دیوار تأثیر گذاشته و باعث

افزایش شتاب لرزه‌ای به دو برابر، حدود ۱۰۰ درصد و با افزایش شتاب به سه برابر، حدود ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد که بیانگر یک رابطه خطی بین جابه‌جایی دیوار با شتاب لرزه‌ای است. همچنین مقدار دوران دیوار نیز تقریباً با یک فرآیند و نسبت خطی افزایش می‌یابد. این روند افزایش در جابه‌جایی و دوران ناشی از شتاب لرزه‌ای حرکت تقریباً در تمامی مدل‌ها وجود دارد به طوری که می‌توان گفت با افزایش نسبت شتاب بارگذاری، دوران و جابه‌جایی با روند خطی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۸): تأثیر شتاب بارگذاری بر جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار.



شکل (۱۹): تأثیر شتاب بارگذاری بر دوران لرزه‌ای دیوار.

### ۱۲- تأثیر فرکانس ارتعاش

در این پژوهش بارگذاری به صورت هارمونیک و سینوسی در فرکانس اساسی یا اولین فرکانس طبیعی در مدل‌سازی استفاده شده است که در شتاب‌های مختلف بر دیوار اعمال شده است. هدف از این انتخاب بدترین شرایط بارگذاری بوده و شرایط تشدید حاکم است. در این راستا بیشترین جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای احتمالی حاصل خواهد شد. برای به دست آوردن فرکانس طبیعی هر مدل از تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار استفاده شده است که نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است.

- mentary strategy in seismic design. *Transportation Research Journal*, **4**(2) 157-172 (in Persian).
10. Trandafir, A.C., Kamai, T., and Sidle, R.C. (2009) Earthquake-induced displacements of gravity retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(1), 428-437.
  11. Tiznado, J.C. and Rodríguez-Roa, F. (2011) Seismic lateral movement prediction of gravity retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(3), 391-400.
  12. Ibrahim, K.M.H.I. (2015) Seismic displacement of gravity retaining walls. *HBRC Journal*, **11**(2), 224-230.
  13. Shi, H., Jinxin, G., and Yanqing, Z. (2016) Seismic rotational displacements of gravity quay walls considering excess pore pressure in backfill soils. *Journal of Earthquake Engineering*, **4**(2), 1-16.
  14. Pain, A., Choudhury, D., and Bhattacharyya, S.K. (2016) Seismic rotational displacement of retaining walls. *Innovative Infrastructure*, **22**(1), 1-8.
  15. Wu, Y. and Prakash, S. (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.
  16. Obaidur, R. and Prishati, R. (2017) Seismic active earth pressure on bilinear retaining walls using a modified pseudo-dynamic method. *International Journal of Geo-Engineering*, **8**(6), 1120-1130.
  17. Han, Sh., Gong, J., and Zhang, Y. (2017) Seismic rotational displacements of gravity quay walls considering excess pore pressure in backfill soils. *Journal of Earthquake Engineering*, **21**(6), 985-1009.
- خواهد شد میزان جابه‌جایی دیوار نیز کاهش یابد.
- با افزایش شتاب زلزله، میزان جابه‌جایی لرزه‌ای دیوار در بالا و پایین دیوار و همچنین دوران لرزه‌ای افزایش می‌یابد به طوری که نسبت افزایش در بسیاری از مدل‌ها بیانگر یک روند خطی متناسب با نسبت افزایش شتاب می‌باشد.
- ابعاد و هندسه دیوار به خصوص ارتفاع آن تأثیر محسوسی بر جابه‌جایی و دوران لرزه‌ای دیوار حائل وزنی دارد. با افزایش ارتفاع دیوار مقدار جابه‌جایی افزایش و مقدار دوران کاهش می‌یابد. این افزایش جابه‌جایی به دلیل افزایش رانش دینامیکی و افزایش لنگر محرک ایجاد شده در دیوار می‌باشد.

### مراجع

1. Kamyarfard, A. and Piran, K. (1991) *Retaining Walls and Earthquake Effect on Them*. Khenya Publisher, Tehran (in Persian).
2. Broms, B.B. and Ingelson, I. (1971) Earth pressure against the abutments of a rigid frame bridge. *Geotechnique*, **21**(1), 15-28.
3. Newmark, N.M. (1965) Effects of earthquake on dams and embankments. *Geotechnique*, **15**(2), 139-157.
4. Richards, R. and Elms, D.G. (1979) Seismic behavior of gravity retaining walls. *Geotechnical Engineering Division*, **105**(4), 449-464.
5. Zeng, X. and Steedman, R.S. (2000) Rotating block method for seismic displacement. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(8), 709-717.
6. Nakamura, S. (2006) Reexamination of Mononobe-Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests. *Soils and Foundations*, **46**(1), 135-146.
7. Deepankar, C. and Sanjay, N. (2007) Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudo-dynamic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(1), 242-249.
8. Golmaghani, S. and Halabian, A.M. (2006) Dynamic analysis of retaining walls under the influence of harmonic dynamics and earthquake acceleration. *Second National Civil Engineering Congress*, Tehran, University of Science and Technology (in Persian).
9. Yazdani, M. and Azad, A. (2008) Reviewing the Mononobe-Okabe method and providing a comple-

### واژه‌نامه

- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| Newmark Method        | ۱- روش بلوک لغزان نیومارک |
| Pseudo-Dynamic        | ۲- شبه دینامیکی           |
| Quasi Static          | ۳- شبه استاتیکی           |
| Fundamental Frequency | ۴- فرکانس اساسی           |
| Modal Analysis        | ۵- آنالیز مودال           |
| Elasto-Plastic        | ۶- الاستوپلاستیک          |
| Energy Absorption     | ۷- مرز جاذب انرژی         |
| Quiet Boundary        | ۸- مرز آرام               |

## Parametric Evaluation of the Rotation and Displacement of the Gravity Retaining Wall during the Earthquake

Saeed Ghaffarpour Jahromi<sup>1\*</sup> and Sareh Bahreini<sup>2</sup>

1. Associate Professor, Department of Geotechnics and Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: Saeed\_ghf@sru.ac.ir
2. M.Sc. in Geotechnical Engineering, Department of Geotechnics and Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

The retaining wall is a wall that creates a lateral support for vertically or vertically oriented walls for the soil. Simplicity of construction and ease of use are the features of the use of gravity retaining walls. The prediction of the displacement and rotation caused by the earthquake is an important point in the seismic design of the gravity retaining walls. Excessive displacement does not only damage the walls itself, but also causes irreparable damage to adjacent retaining walls. The forces imposed on the wall by the earthquake depend on factors such as the behavior of the soil under the wall, the behavior of the embankment, the flexural behavior and the wall's inertia, and the nature of the entrance movements. One of the techniques for wall design is a power-based method and a performance-based method. In this paper, using the ABAQUS / CAE finite element software, the seismic performance of the gravity retaining wall is evaluated under harmonic load. Four types of subsoil according with the 2800 regulations and three types of backfill (sand behind the wall) are used. Two types of wall are 3 and 6 meters under sinusoidal load at the fundamental frequency of each model and the effect of backfill, subsoil and height of the wall on the top displacement, bottom displacement and rotation were investigated. The results of this research show that as the soil around the wall is denser, the wall displacement decreases. The amount of displacement increases with increasing wall height. The higher the density of the soil in the site, the lower the maximum vertical stress on the wall. By changing the soil profile and increasing soil bed density, the mean value of the average maximum absorbed acceleration increases.

Mechanical properties of the embankment such as density, internal friction and hardness, effect on the average maximum acceleration and maximum vertical stress. With increasing dynamic loading; the average maximum acceleration is increased. Under the basic vibration of the wall, the height and dimensions do not have any effect in maximum absorbed acceleration. By increasing the wall height, the vertical stress decreases. The result of this research show that dimension and physical characteristics of retaining wall and soil properties of embankment have effect on absorbed maximum acceleration and the maximum vertical wall stress in different conditions of seismic acceleration by numerical method. The numerical models were analyzed for sinusoidal harmonic loading at the fundamental frequency of the model (natural frequency of the first mode). The results of this research are summarized as follows.

- By increasing the wall height, the vertical stresses generated in the model are reduced. The increase in wall height does not have a significant effect on the average maximum absorbed acceleration.
- With increasing soil density around the wall (backfill and foundation) due to the increased hardness of the soil, the wall shows a good resistance to the forces involved and creates a lower stress in the wall.
- increasing the density of soil around the wall (backfill and foundation), followed by increasing density and hardness, the average maximum acceleration absorbed by the part of the backfill that is in contact with the back of the wall increases.

**Keywords:** Gravity Retaining Wall, Cyclic Loading, Displacement, Rotation, Numerical Analysis.