



بررسی حداکثر تنش و شتاب جذب شده دیوار حائل وزنی تحت بار دینامیکی

سعید غفارپور جهرمی^{*}، ساره بحرینی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۰۴

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۹

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۲۴

کلمات کلیدی:

دیوار حائل وزنی

تنش قائم

شتاب جذب شده

بار هارمونیک

فرکانس اساسی

خلاصه: طراحی دیوار حائل نیازمند بررسی همه جانبه دیوار در شرایط استاتیکی و دینامیکی است به طوری که در تحلیل دینامیکی، مقدار و موقعیت نیروهای وارده بسیار پیچیده شده که می تواند باعث دوران، جابجایی و در نهایت ناپایداری دیوار شود. در این مقاله به روش عددی و با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS/CAE عملکرد لرزه های دیوار حائل وزنی تحت بارگذاری هارمونیک سینوسی و تحت فرکانس اساسی و تشدید مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق متغیرهای مختلف شامل مشخصات ساختگاه، نوع خاک ریز، هندسه دیوار، شتاب و فرکانس ارتعاش مورد کنکاش و بررسی قرار گرفته اند. نتایج این پژوهش نشان می دهند که با افزایش شتاب بارگذاری، شتاب وارد بر دیوار به صورت خطی افزایش می یابد اما تاثیر مشخصی بر تنش قائم ندارد که می توان چنین استنباط کرد حداکثر تنش قائم دیوار مستقل از شتاب بارگذاری در شرایط تشدید می باشد. همچنین نتایج نشان می دهند با افزایش ارتفاع دیوار و تراکم خاک ریز، تنش قائم و شتاب وارد بر دیوار کاهش می یابد که می تواند در طراحی اقتصادی مورد توجه مهندسان قرار گیرد.

۱- مقدمه

فاز سازه های دیوار حائل دخالت دارند [۲ و ۳]. در تحلیل لرزه ای، روش مونتونوبه-اوکابه که در سال ۱۹۲۹ از توسعه ی تئوری و نظریه ی کولمب ارائه شده است، همچنان به طور گسترده ای توسط مهندسان برای تحلیل لرزه ای دیوارهای حائل و تعیین فشار جانبی خاک در زمان زلزله استفاده می شود. بر اساس این تئوری، فشار جانبی محرک خاک در زمان زلزله در قیاس با قبل از زلزله، تابع شتاب افقی و شتاب قائم زلزله می باشد. از جمله محدودیت های این روش عدم ارائه ی توزیع فشار جانبی خاک است [۴].

دوران دیوار حول پایه، دوران حول رأس، انتقال کلی دیوار و یا دوران همراه با انتقال یکی از پدیده هایی است که معمولاً در شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی محققین نشان می دهد که نیروی وارد بر دیوار در حالات مقاوم و محرک بر اساس تئوری های رایج با وضعیت واقعی بسیار تفاوت دارد. به بیان دیگر میزان و نحوه توزیع فشار وارد بر دیواره ها برخلاف تئوری های کولمب

کاربرد دیوارهای حائل در حفاظت جاده ها، بنادر، تونل ها، کوله پل ها، مرز سواحل و رودخانه ها بسیار زیاد است. پایداری این دیوارها در برابر فشار خاک و سایر نیروهای خارجی یکی از موضوعات مهم مورد بررسی توسط مهندسان در طراحی این دیوارهای می باشد [۱]. مهم ترین عامل در طرح و محاسبه ی 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 ی دیوار 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 گذشته های دور مورد استفاده ی بسیاری از مهندسان بوده است. در این دو نظریه، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، هندسه ی خاک ریز، هندسه ی دیوار و سربار روی خاک ریز در تحلیل و طراحی فاز ژئوتکنیکی و

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: Saeed_ghf@sru.ac.ir



چودهارى و نیمبالکار در سال ۲۰۰۸ یک روش شبه‌دینامیکی برای محاسبه‌ی فشار فعال خاک در شرایط زلزله با لحاظ نمودن اثرات دینامیکی ارائه کردند [۱۰]. آن‌ها در این پژوهش به روش شبه‌دینامیکی از روش تحلیلی استیدمن و همکارانش نیز استفاده نمودند. در این روش به ارزیابی دوران و جابه‌جایی دیوار توجه کافی نشده‌است [۱۲].

ینگ‌وی و همکارش (۲۰۱۲) برای اولین بار روش طراحی دیوارهای حائل وزنی بر اساس کنترل تغییرمکان 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 شده‌است که بیانگر دقت مناسب این روش با مشاهدات تجربی در زلزله‌های اخیر بوده‌است [۱۳]. پریشتی و همکارانش (۲۰۱۷) توزیع فشار دینامیکی دیوارهای حائل را با روش شبه‌استاتیکی اصلاح‌شده 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 جابجایی دیوار نیز تحت تاثیر میرایی خاک قرار می‌گیرد [۱۴]. ژنگ و همکارانش (۲۰۱۷) به بررسی تاثیر اشباع بودن خاک‌ریز و فشار آب منفذی بر جابجایی 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 تاثیر محسوس بر جابجایی و دوران دیوار خواهد شد [۱۵].

در این تحقیق با روش عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس، پاسخ دیوارهای حائل صلب بتنی تحت بار سیکلی به‌صورت هارمونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ارتباط بین میزان تنش قائم بیشینه و هم‌چنین شتاب وارد بر دیوار ناشی از خاک‌ریز (قسمتی از خاک‌ریز که در تماس با پشت دیوار قرار دارد) تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. در این بررسی تاثیر عوامل مختلف شامل فرکانس بارگذاری، هندسه دیوار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ریز و خاک کف دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

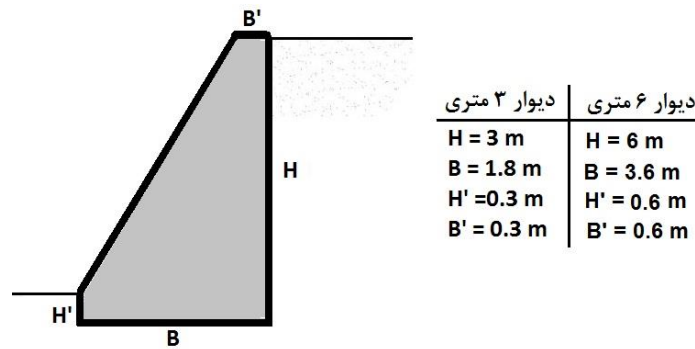
۲- هندسه و مشخصات مصالح دیوار

هندسه مورد بررسی در این تحقیق شامل دو نوع هندسه دیوار وزنی با ابعاد متعارف از جنس بتن می‌باشد. ارتفاع دیوار کوتاه ۳ متر و ارتفاع دیوار بلند ۶ متر در نظر گرفته شده‌است که جزئیات هندسه

و رانکین همواره خطی نبوده و میزان فشار وارد به میزان دوران دیوار وابستگی دارد [۵]. پیش‌بینی جابجایی و دوران ایجادشده در اثر زلزله، یک نکته مهم در طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل است، تغییرمکان‌های بیش از حد نه تنها باعث خرابی دیوار بلکه باعث ایجاد آسیب‌های جبران‌ناپذیری به سازه‌های مجاور نیز خواهد شد.

در تحقیقات اولیه نیومارک (۱۹۶۵) روش بلوک لغزان را برای محاسبه‌ی تغییرمکان شیب‌های خاکی معرفی کرد که مورد استقبال مهندسان و محققان قرار گرفت [۶]. بعدها ریچارد و المز با توسعه روش بلوک لغزان نیومارک، روشی را برای طراحی دیوارهای حائل وزنی معرفی کردند که هم‌اکنون نیز مورد استفاده مهندسان قرار می‌گیرد [۷]. استیدمن و همکارانش (۲۰۰۰) در تحقیق برای محاسبه جابه‌جایی دورانی دیوار حائل وزنی تحت زمین لرزه، از روش بلوک دورانی استفاده کردند. این روش بسیار شبیه روش شبه‌استاتیکی بلوک لغزش نیومارک است به‌طوری که با تعریف شتاب آستانه دوران بلوک، هر زمان شتاب چرخش از شتاب آستانه بیشتر شود دوران ماندگار در دیوار پدیدار می‌شود [۸]. ناکامورا (۲۰۰۶) دیوار حائل وزنی را در آزمون سانتریفیوژ مدل‌سازی کرد و تحت بارگذاری‌های مختلف لرزه‌ای و هارمونیک با فرکانس‌های مختلف قرار داد و نتایج را با روش مونونوبه-اوکابه مقایسه کرد. وی در این بررسی به این نتیجه رسید که رفتار واقعی و لرزه‌ای دیوار حائل با شرایط فرضی نظریه مونونوبه-اوکابه مطابقت ندارد [۹].

حلبیان و همکارانش (۱۳۸۴) با بررسی دیوار حائل تحت بار زلزله در نرم‌افزار اجزا محدود پلکسیس، به این نتیجه رسید که روش مونونوبه-اوکابه برای خاک‌های ماسه‌ای با تراکم متوسط و نسبتا سست جواب‌های قابل‌قبولی می‌دهد به‌طوری که با بزرگ‌تر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک جواب‌های روش مونونوبه-اوکابه کوچک‌تر از نیروهای حاصل از روش اجزا محدود است [۱۰]. آزاد و همکارش (۱۳۸۶) روش مونونوبه-اوکابه اصلاح‌شده را معرفی کرد که می‌تواند تاثیر عوامل مختلفی چون هندسه غیرخطی سطح زمین پشت دیوار، مقاومت‌چسبندگی مصالح و عمق ترک کششی و هم‌چنین سطح آب زیرزمینی را که در روش مونونوبه-اوکابه قابل‌بررسی نیست، به راحتی در تعیین نیروهای رانش فعال و مقاوم خاک ارزیابی نمود. از این روش می‌توان نیروهای فشار جانبی خاک بر دیوارهای حائل را چه در حالت استاتیکی و چه در حالت لرزه‌ای تعیین کرد [۱۱].



شکل ۱. هندسه و ابعاد دیوار

Fig. 1. Geometry and dimensions of the wall

جدول ۱. مشخصات مواد و مصالح دیوار و خاک ریز

Table 1. Wall and embankment materials

سرعت موج برشی (m/s)	زاویه اتساع (درجه)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته MPa	چسبندگی kPa	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص kN/m ³	نوع مصالح
۱۲۵	۲	۰/۲۵	۱۰	-	۲۵	۱۷	ماسه سست BF1
۲۵۰	۵	۰/۳	۳۰	-	۳۰	۱۸	ماسه متوسط BF2
۴۰۰	۱۰	۰/۳۵	۵۰	-	۳۵	۱۹	ماسه متراکم BF3
-	-	۰/۲	۲۰۰۰۰	-	-	۲۴	مصالح دیوار (بتن)

با ملاک عمل قرار دادن سرعت موج برشی، خاک بستر و ساختگاه اجرای دیوار به گونه‌ای انتخاب شده‌است که با طبقه‌بندی زمین بر اساس این آیین‌نامه تطابق داشته‌باشد. سطح سفره آب زیرزمینی در اعماق پایین دست فرض شده و خاک غیراشباع در نظر گرفته شده‌است که مشخصات آن در جدول ۲ آمده‌است.

۳- میرایی سیستم

در این مطالعه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی خاک و ساختگاه مورد نظر، از تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است. 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 گرفته‌است، لذا

آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌است. معمولاً دیوارهای حائل وزنی از مصالح سنگین وزن چون بتن، سنگ، آجر و دیگر مصالح بنایی ساخته می‌شوند که در تحقیق حاضر جنس دیوار بتنی لحاظ شده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن در جدول ۱ ارائه شده‌است. در این تحلیل خاک قرار گرفته در بخش خاک‌ریز پشت دیوار از نوع خاک دانه‌ای (ماسه) و به صورت غیراشباع با رطوبت طبیعی یا خشک در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین خاک‌ریز پشت دیوار افقی و هم‌تراز با ارتفاع دیوار لحاظ شد که از نظر تراکم نسبی به سه نوع متفاوت شامل سست (B1)، متوسط (B2) و متراکم (B3) تقسیم‌بندی شده و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده‌است.

ساختگاه مورد بررسی در این تحقیق مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و ملاک طبقه‌بندی مشخصات خاک، لایه‌بندی و سرعت موج برشی تا عمق حدود ۳۰ متر می‌باشد. در این تحلیل

جدول ۲. مشخصات ساختگاه و خاک بستر کف دیوار
Table 2. Site specifications and base soil properties

نوع زمین	مواد متشکل ساختگاه مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ ایران	سرعت موج برشی (m/s)	وزن مخصوص (kN/m ³)	مدول یانگ (Mpa)	نسبت بواسون	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	زاویه اتساع (درجه)
نوع یک T1	سنگ‌های آذرین، سنگ‌های رسوبی سخت و بسیار مقاوم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر تا سطح زمین سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست، خاک‌های سخت شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت	۸۵۰	۲۲	۸۰	۰/۳	۴۵	۱۰
نوع دو T2	سست، خاک‌های سخت شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت	۵۶۵	۲۰	۴۰	۰/۳۵	۳۵	۷
نوع سه T3	خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیر چسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	۲۷۵	۱۸	۳۰	۰/۴	۳۰	۵
نوع چهار T4	چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم	۱۲۵	۱۷	۲۰	۰/۴۵	۲۵	۲

بوده و تاثیر 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 ۲ می‌توان ضرایب α_R و β_R را تعیین نمود.

۴- جزئیات و فرضیات مدل‌سازی، بارگذاری و شرایط مرزی

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. لازم به ذکر است فشار جانبی خاک در تحلیل استاتیکی مطابق نظریه رانکین محاسبه شده‌است.

در مدل‌سازی عددی، محیط خاک به صورت همگن، نیمه‌بی‌نهایت و هم‌سان در نظر گرفته شده و برای شبیه‌سازی از مدل الاستوپلاستیک بر پایه معیار گسیختگی مور-کولومب استفاده شده‌است. هم‌چنین از المان‌های چهارضلعی چهار گره‌ای در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است چرا که این نوع المان نسبت به المان مثلثی توانایی بیشتری در بیان جابجایی افقی و قائم‌گه‌ها دارد. با توجه به طولی بودن دیوار،

میرایی بحرانی متوسط خاک برابر ۵ درصد لحاظ شده‌است [۱۰]. هر سیستم دینامیکی تحت فرکانس‌های طبیعی خود، ارتعاش درونی دارد و کمترین فرکانس طبیعی هر سیستم به‌عنوان فرکانس اصلی یا فرکانس اساسی شناخته می‌شود. هم‌چنین مود ارتعاش در هر فرکانس طبیعی منحصربه‌فرد 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 مدهای متناظر با آن، به هندسه سیستم، مشخصات مواد و مصالح سیستم و هم‌چنین شرایط تکیه‌گاهی در سیستم بستگی دارند. برای یک سیستم چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی ζ_i ، برای هر فرکانس زاویه‌ای سیستم ω_i از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه می‌باشد:

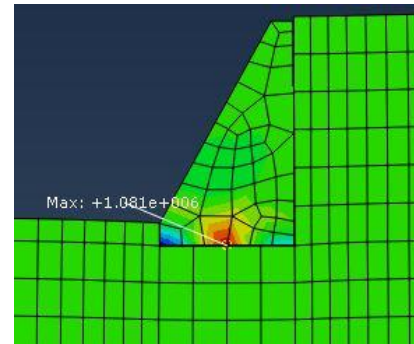
$$\zeta_i \omega_i = 2\alpha + \beta\omega_i^2 \quad (1)$$

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

در این روابط ω_i فرکانس طبیعی مود ارتعاشی نام (برحسب $\frac{rad}{sec}$) است. مطابق روابط فوق در فرکانس‌های پایین، جمله میرایی متناسب با جرم است و در فرکانس‌های بالا، جمله میرایی متناسب با سختی

جدول ۳. خصوصیات مواد و مصالح دیوار و خاک ریز
Table 3. Wall and embankment properties

ماسه	بتن	نوع مصالح
۱۶/۴۵	۲۴	وزن مخصوص (kN/m^3)
۴۰	$2/0.56 \times 10^4$	مدول الاستیسیته (Mpa)
۰/۳۳	۰/۲	ضریب پواسون
۴۲	-	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲۸	-	زاویه اصطکاک با دیوار (درجه)



شکل ۲. محل حداکثر تنش در مدل

Fig. 2. Maximum stress in the model

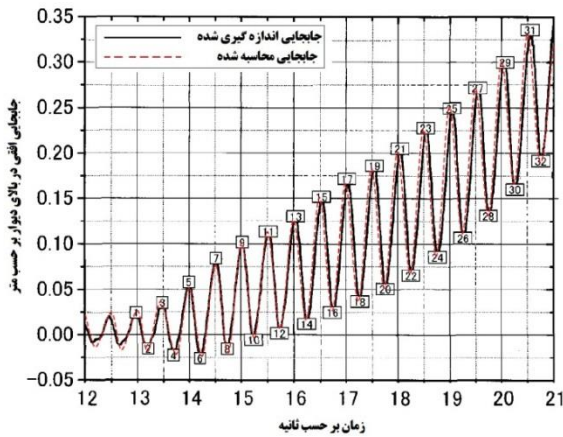
به دست آوردن فرکانس طبیعی هر مدل از تحلیل فرکانسی استفاده شده است. همچنین در این تحقیق از تاثیر شتاب قائم بارگذاری به دلیل اثر کم صرف نظر شد. برخی محققان تاثیر این شتاب را در فشار دینامیکی خاک کمتر از ۱۰ درصد گزارش کرده اند [۸]. در این مقاله به منظور بررسی تاثیر یک متغیر روی نتایج تحلیل، بقیه متغیرها برای تمامی مدل‌ها، ثابت در نظر گرفته شده است. تغییر هر کدام از پارامترها روی حداکثر تنش قائم ایجاد شده در دیوار و میانگین حداکثر شتاب جذب شده (شتاب وارد شده) قسمتی از خاک ریز که در تماس با دیوار قرار دارد مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم است اشاره شود حداکثر تنش قائم در راستای افقی در قسمت پایین دیوار ایجاد شده است (شکل ۲).

۵- صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و دقت‌سنجی روش عددی به کار گرفته شده در این تحقیق با نرم‌افزار ABAQUS از نتایج تحقیق ناکومارا و همکارانش در سال ۲۰۰۶ استفاده شد [۹]. در این تحقیق تئوری مونونوبه-اوکابه با استفاده از مدل‌سازی دیوار حائل وزنی در آزمون سانتریفیوژ مورد بررسی مجدد قرار گرفته است. مشخصات مواد و مصالح به کار گرفته شده برای دیوار و خاک ریز در آن تحقیق در جدول ۳ آورده شده است. همچنین شکل ۳ نحوه بارگذاری سیکلی به صورت هارمونیک را نشان می‌دهد [۹]. در شکل ۴ نتایج مقایسه داده‌های حاصل از آن تحقیق با روش عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار مورد مقایسه قرار گرفته است که می‌توان گفت همخوانی مناسبی بین نتایج وجود دارد.

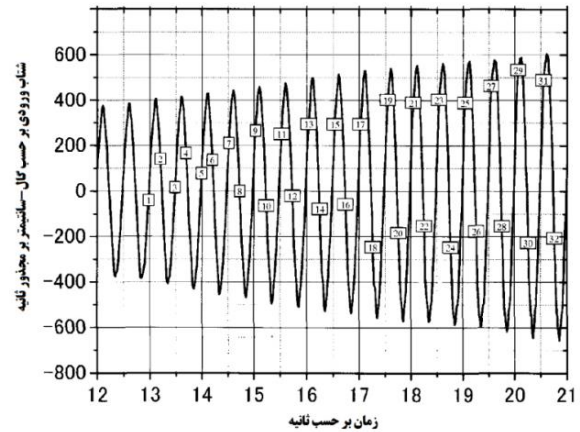
در مدل‌سازی از مدل دو بعدی کرنش مسطح برای ساده‌سازی تحلیل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است انتخاب اندازه و ابعاد مش به طول موج ارتعاش وابسته است که در حالت کلی ابعاد مش باید یک هشتم تا یک دهم کوتاه‌ترین طول موج باشد [۱۵]. طول موج حاصل تقسیم سرعت موج برشی خاک بر بیشترین فرکانس ارتعاش در نظر گرفته می‌شود. مش‌بندی نواحی اطراف دیوار ریزتر و برای نواحی با تاثیر کمتر (قسمت‌های دور از دیوار)، بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. برای اعمال اندرکنش بین خاک و دیوار از مدل‌سازی تماسی بین سطوح مشترک استفاده شده است. دو نوع تماس اصطکاکی و عمودی بین سطوح مشترک در نظر گرفته شده است.

در مدل کردن مسائل مربوط به ژئوتکنیک، معمولاً ناحیه مورد نظر به اندازه‌ای بزرگ است که می‌توان آن را از نظر محاسباتی به صورت بی‌نهایت در نظر گرفت. در تحلیل‌های دینامیکی از مرز جاذب دینامیکی یا مرز جاذب انرژی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای جلوگیری از انتشار امواج از مرز جاذب دینامیکی نوع آرام (Quiet Boundary) استفاده شده است. به این صورت که در مرزهای کناری دیوار، المان به صورت بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. همچنین در قسمت پایین مدل، سیستم در جهت افقی و قائم مقید شده است. به منظور امکان مدل‌سازی بارگذاری فرکانس اساسی، از بارگذاری هارمونیک در تحلیل عددی استفاده شده است. بارگذاری هارمونیک از نوع سینوسی با ۱۲ چرخه در فرکانس اساسی سیستم خاک و دیوار (اولین فرکانس طبیعی) و با شتاب‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ شتاب ثقل به زیر مدل اعمال شده است. لازم به ذکر است فرکانس اساسی هر مدل متفاوت می‌باشد که برای



شکل ۴. نمودار صحت‌سنجی جابجایی-زمان [۶]

Fig. 4. Displacement-time validation diagram [6]



شکل ۳. بارگذاری مدل مقاله بررسی شده [۶]

Fig. 3. Loading the model in the reference article [6]

جدول ۴. فرکانس اساسی بر اساس ارتفاع دیوار، نوع خاک ریز و خاک بستر - هر تیز

Table 4. Basic frequency based on wall height, embankment type and base soil (Hz)

نوع ساختگاه				ارتفاع دیوار	خاک ریز
T4	T3	T2	T1		
۰/۹۶۲۲۸	۱/۱۰۳۵۱	۱/۲۰۳۲۲	۱/۴۹۹۹۱	۶ متر	BF1
۱/۰۸	۱/۲۵۴۳۱	۱/۳۷۳۹۱	۱/۷۹۵۰۱	۳ متر	
۰/۹۷۶۴۳	۱/۱۲۹۶۸	۱/۲۴۰۴۱	۱/۶۰۰۴۱	۶ متر	BF2
۱/۰۸۲۶۱	۱/۲۵۸۹۱	۱/۳۸۰۲۱	۱/۸۰۶۴۱	۳ متر	
۰/۹۷۴۳۳	۱/۱۲۹۵۱	۱/۲۴۲۳۱	۱/۶۱۲۷۱	۶ متر	BF3
۱/۰۸۰۲۶	۱/۲۵۶۹۱	۱/۳۷۸۶۱	۱/۸۰۵۵۱	۳ متر	

دیوار حائل و میزان میانگین حداکثر شتاب جذب شده و حداکثر تنش قائم دیوار در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده‌است. میانگین شتاب جذب شده از خروجی نرم‌افزار در بخش تماس خاک ریز و وجه قائم دیوار در نظر گرفته شده‌است. در این بررسی مشخصات مصالح در تمامی مدل‌ها به جز خاک کف دیوار ثابت در نظر گرفته شده‌است اما مشخصات ساختگاه مطابق با چهار نوع زمین به‌عنوان متغیر لحاظ شده‌است. شکل‌های ۷ و ۸ بیانگر تاثیر خاک بستر بر میانگین حداکثر شتاب جذب شده قسمتی از خاک ریز که در تماس با پشت دیوار قرار دارد به ترتیب برای دیوار ۳ و ۶ متری را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج در دیوار ۳ متری نشان می‌دهد مقدار میانگین شتاب جذب شده دیوار به نوع ساختگاه وابسته است به طوری که در ساختگاه نوع یک بیشترین مقدار و در ساختگاه نوع چهار کمترین میانگین حداکثر شتاب جذب شده رخ می‌دهد. میانگین شتاب جذب شده در

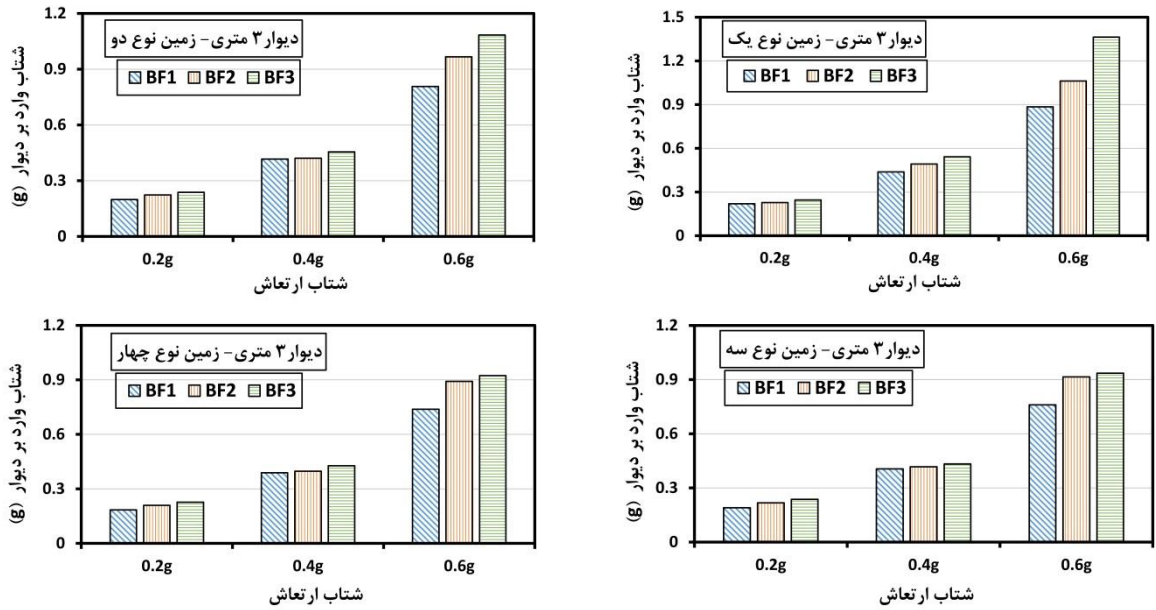
۶- تحلیل فرکانس اساسی ارتعاش

در این پژوهش بارگذاری به صورت هارمونیک سینوسی و با فرکانس اساسی (اولین فرکانس طبیعی) در شتاب‌های مختلف به سیستم دیوار و خاک اعمال می‌شود. در این راستا بیشترین شتاب جذب شده و تنش احتمالی قابل محاسبه خواهد بود. برای به دست آوردن فرکانس اساسی هر مدل از تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده‌است. هدف از اعمال بار در فرکانس اساسی این است که دیوار در بدترین شرایط تحت بارگذاری قرار گیرد و شرایط تشدید حاکم باشد.

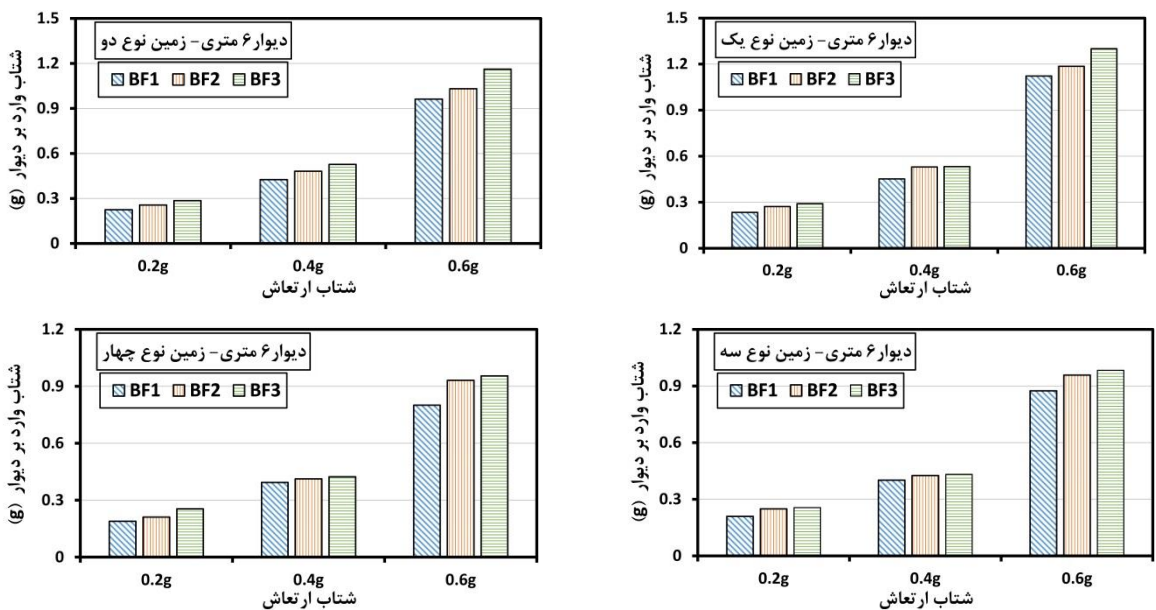
۷- ارزیابی، تحلیل و تفسیر نتایج

۷-۱- تاثیر نوع ساختگاه

نتایج بررسی تاثیر ساختگاه و خاک کف دیوار بر رفتار لرزه‌ای



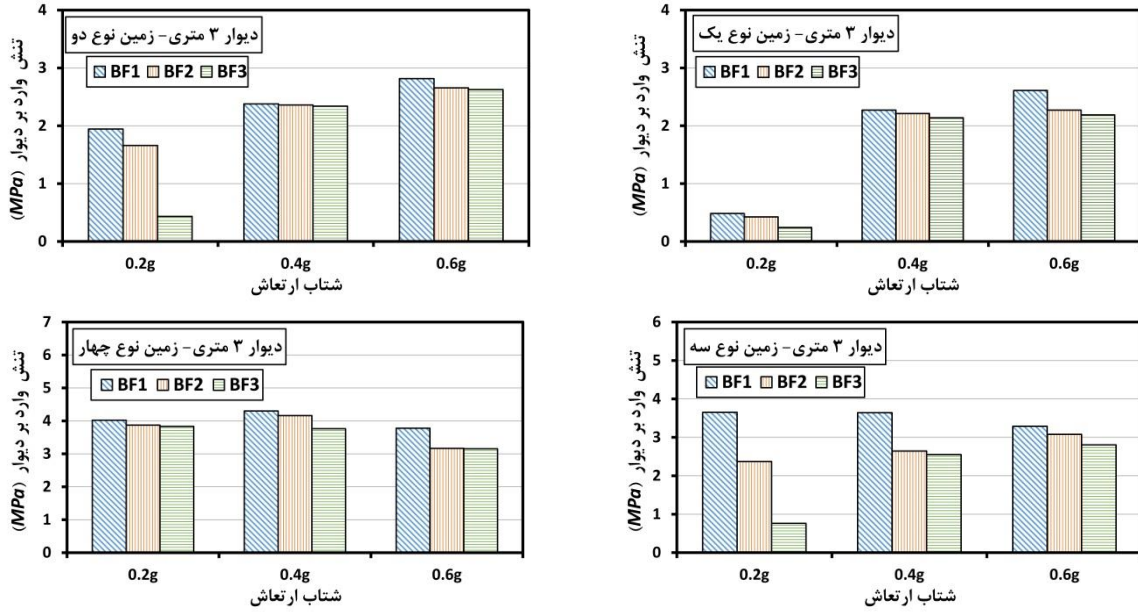
شکل ۵. تاثیر نوع ساختگاه بر حداکثر شتاب وارد بر دیوار ۳ متری
Fig. 5. Site effect on the maximum acceleration of the 3 m wall



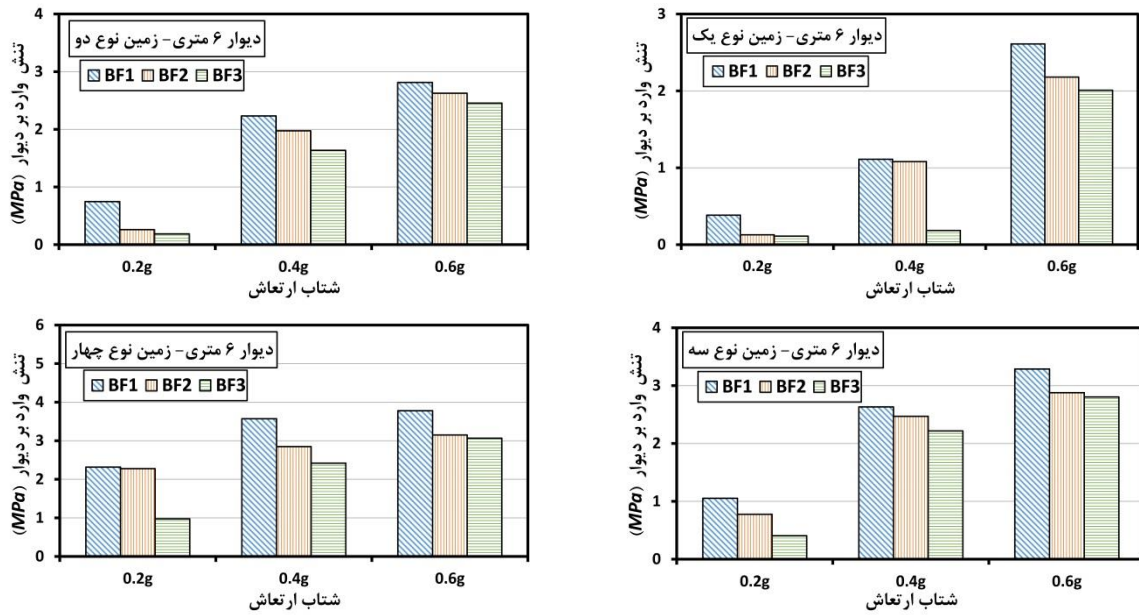
شکل ۶. تاثیر نوع ساختگاه بر میانگین حداکثر شتاب وارد بر دیوار ۶ متری
Fig. 6. Site effect on the maximum acceleration of the 6 m wall

میزان میانگین حداکثر شتاب جذب شده حداقل می‌باشد (0/۷۳g) که نسبت افزایش ۴ درصد را در مقایسه با ساختگاه نوع ۳ نشان می‌دهد. به عبارت دیگر درصد تغییر میانگین شتاب جذب شده قسمتی از خاک‌ریز که در تماس با پشت دیوار حائل است در خاک بستر نوع

ساختگاه یک 0/۸۸۴g بوده که بیشتر از ساختگاه دو بوده (0/۸g) که نسبت افزایش ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. همچنین میانگین شتاب جذب شده در ساختگاه دو بیشتر از ساختگاه سه (0/۷۶g) و نسبت افزایش ۵ درصد را نشان می‌دهد. در ساختگاه نوع چهار نیز



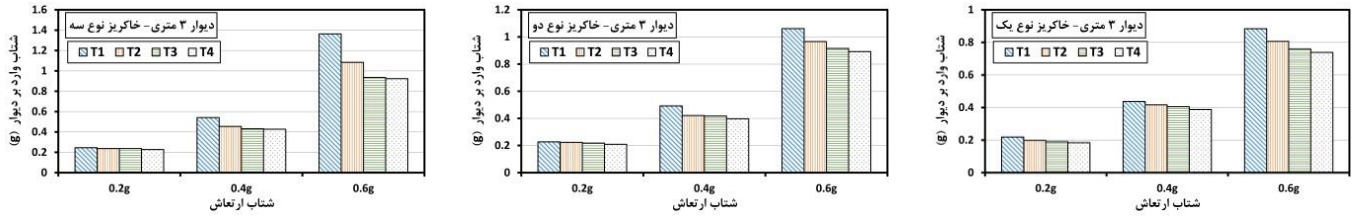
شکل ۷. تاثیر نوع ساختگاه بر حداکثر تنش وارد بر دیوار ۳ متری
Fig. 7. Site effect on the maximum stress of the 3 m wall



شکل ۸. تاثیر نوع ساختگاه بر حداکثر تنش وارد بر دیوار ۶ متری
Fig. 8. Site effect on the maximum stress of the 6 m wall

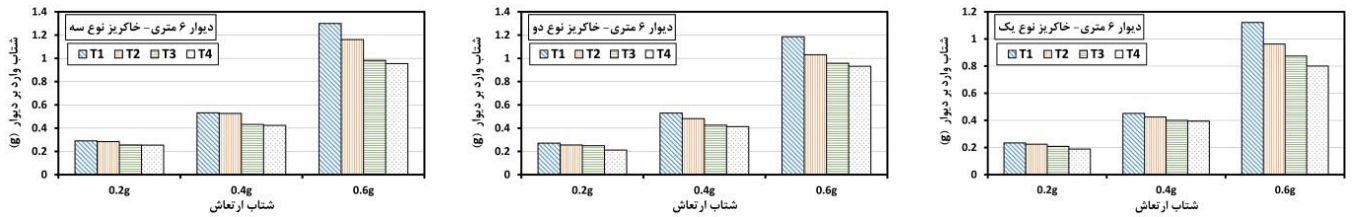
میانگین حداکثر شتاب جذب شده در ساختگاه نوع چهار حدود ۲۱ درصد کمتر از ساختگاه نوع یک می باشد. این نتایج نشان می دهند با تغییر مشخصات خاک و افزایش تراکم خاک بستر، مقدار میانگین حداکثر شتاب جذب شده افزایش می یابد. از طرف دیگر هرچه خاک

چهارم نسبت به خاک نوع اول به مقدار ۱۷ درصد دچار کاهش شده است. این روند کاهشی در کلیه مدل ها مشخص است. بررسی نتایج در شکل ۶ برای دیوار ۶ متری نیز بیانگر روند تاثیر نوع ساختگاه مشابه دیوار ۳ متری می باشد به طوری که میزان



شکل ۹. تاثیر نوع خاکریز بر حداکثر شتاب وارد بر دیوار حائل ۳ متری

Fig. 9. Effect of embankment type on the maximum acceleration of the 3 m wall



شکل ۱۰. تاثیر نوع خاکریز بر حداکثر شتاب وارد بر دیوار حائل ۶ متری

Fig. 10. Effect of embankment type on the maximum acceleration of the 6 m wall

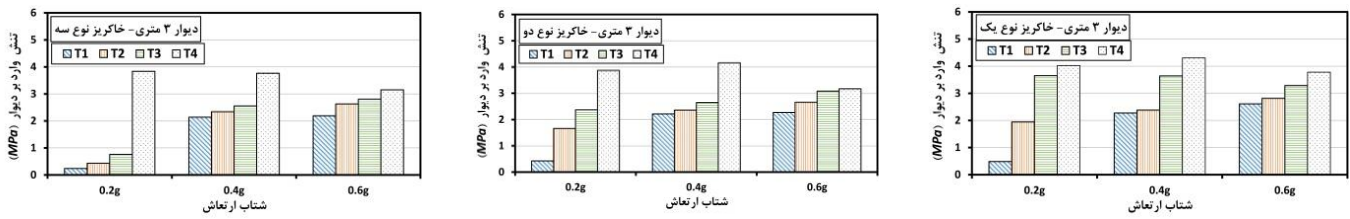
به ساختگاه نوع چهار می‌باشد. که نسبت به زمین‌های دیگر مقاومت کمتری دارد. مقاومت کم ذرات خاک بستر باعث ایجاد مقدار زیادی تنش قائم در دیوار می‌شود. هم‌چنین هرچه خاک سختی زیادی داشته باشد در برابر نیروهای وارده بر خود مقاومت خوبی نشان می‌دهند و باعث ایجاد تنش کمتر در دیوار می‌شود.

۲-۷- تاثیر نوع، تراکم و مشخصات خاکریز

نتایج این تحقیق در بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای دیوار ۳ و ۶ متری نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود با تغییر مشخصات مکانیکی خاکریز شامل افزایش تراکم، اصطکاک داخلی و سختی، میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده در شرایطی اتفاق خواهد افتاد که خاکریز متراکم باشد. با افزایش مشخصات مکانیکی خاکریز یعنی افزایش زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته و وزن مخصوص، مقدار جابجایی کاهش و میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده افزایش می‌یابد چرا که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاکریز، ضریب فشار محرک استاتیکی و دینامیکی کاهش یافته و در نتیجه نیروی محرک نیز کاهش می‌یابد. این کاهش نیروی محرک باعث کاهش لنگر محرک و به دنبال آن افزایش میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده و کاهش جابه‌جایی دیوار را باعث خواهد شد. هرچه مقدار

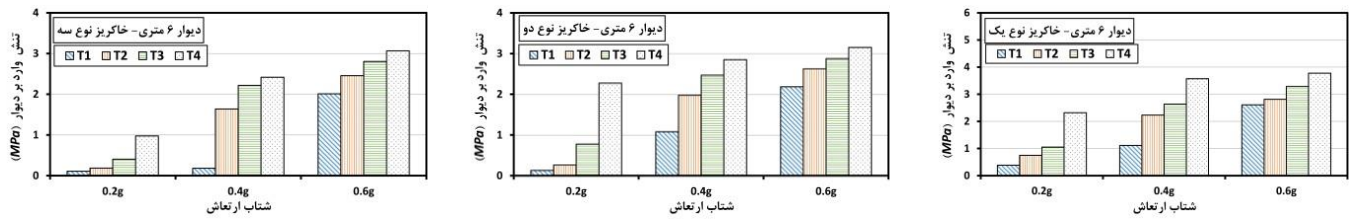
تراکم بیشتری داشته‌باشد مقدار جابجایی کمتر است. می‌توان گفت که افزایش تراکم خاک دانه‌ها بیانگر افزایش زاویه اصطکاک داخلی، افزایش سختی و مدول الاستیسیته و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری خاک می‌باشد. این افزایش ظرفیت باربری باعث کاهش نشست خاک در پنجه دیوار تحت بارهای وارده می‌شود در نتیجه جابجایی دیوار کاهش می‌یابد. کم بودن جابجایی و بیشتر بودن میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده نشان‌دهنده عملکرد بهتر سیستم دیوار دارای خاک بستر متراکم است. در حالت کلی می‌توان گفت هرچه مقدار میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده بیشتر و جابجایی دیوار کمتر باشد سیستم مقاوم است و مقدار انرژی بیشتری مستهلک می‌کند در عین حال جابجایی کمتری دارد. تغییرات حداکثر تنش قائم دیوار تحت تاثیر نوع ساختگاه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌است.

همان‌طور که نتایج شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند میزان حداکثر تنش قائم دیوار ۳ متری در ساختگاه نوع چهار (۴/۳ مگاپاسکال) حدود ۴۷ درصد بیش از مقدار متناظر در ساختگاه نوع اول (۲/۲۸ مگاپاسکال) می‌باشد. در دیوار ۶ متری نیز بیانگر روند تاثیر نوع ساختگاه مشابه دیوار ۳ متری می‌باشد. این نتیجه متاثر از تغییر مشخصات خاک در ساختگاه‌های متفاوت است هرچه مقدار تراکم خاک ساختگاه بیشتر باشد مقدار حداکثر تنش قائم وارد بر دیوار کمتر است. در حالت کلی می‌توان گفت بیشترین مقدار تنش مربوط



شکل ۱۱. تاثیر نوع خاکریز بر حداکثر تنش قائم وارد بر دیوار حائل ۳ متری

Fig. 11. Effect of embankment type on the maximum stress of the 3 m wall



شکل ۱۲. تاثیر نوع خاکریز بر حداکثر تنش قائم وارد بر دیوار حائل ۶ متری

Fig. 12. Effect of embankment type on the maximum stress of the 6 m wall

فصل شوندگی بیشتر دانه‌های خاکی در هم دانست که باعث می‌شود خاک به صورت یک توده صلب عمل کند و دیوار در برابر بارهای وارده عملکرد مناسبی از خود نشان دهد و کمتر دچار تغییرات می‌شود.

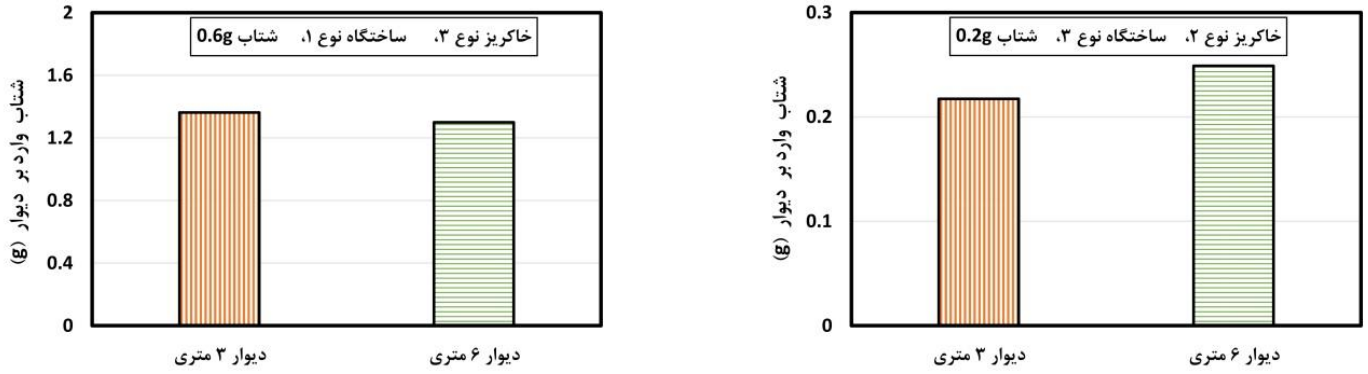
۳-۷- تاثیر هندسه، ابعاد و ارتفاع دیوار

شکل ۱۳ نتایج تاثیر ارتفاع برای میانگین حداکثر شتاب جذب شده قسمتی از خاکریز که در تماس با پشت دیوار است را نشان می‌دهد. بررسی نتایج این شکل نشان می‌دهد تحت ارتعاش اساسی سیستم، ارتفاع و ابعاد دیوار روند مشخصی در میانگین حداکثر شتاب جذب شده ندارد و می‌توان چنین استنباط کرد حداکثر شتاب جذب شده می‌تواند مستقل از نوع هندسه و ابعاد دیوار در شرایط تشدید باشد.

شکل ۱۴ بیانگر این موضوع است که هندسه ابعادی دیوار بر حداکثر تنش قائم ایجاد شده تاثیر گذار است به گونه‌ای که افزایش ارتفاع دیوار از ۳ متر به ۹ متر و به دنبال آن افزایش قاعده دیوار، باعث کاهش حداکثر تنش قائم تا کمتر از ۲۰ درصد می‌شود. همین‌طور این نتایج نشان می‌دهند علت کاهش حداکثر تنش می‌تواند ناشی از تغییر هندسه (افزایش قاعده دیوار) و هم‌چنین تغییر توزیع فشار جانبی و موقعیت نیروی برآیند وارد بر دیوار باشد. از این تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع دیوار مقدار حداکثر تنش قائم وارد بر دیوار کاهش

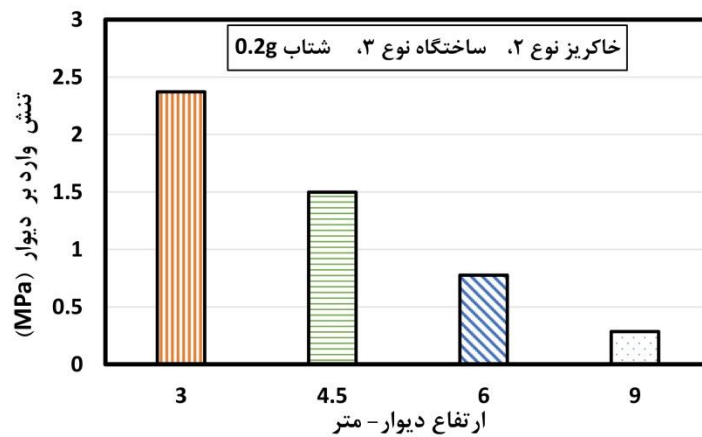
میانگین حداکثر شتاب جذب شده بیشتر و جابجایی دیوار کمتر باشد سیستم مقاوم است و مقدار انرژی بیشتری مستهلک می‌کند در عین حال جابجایی کمتری دارد. با بررسی این نتایج در حالت کلی می‌توان گفت هر چه خاکریز و خاک بستر متراکم‌تر باشد سیستم دیوار حائل در برابر بارهای وارده با جذب شتاب بیشتر و جابجایی کمتر عملکرد مناسبی خواهد داشت. محققان مختلف بر تاثیر مشخصات خاکریز پشت دیوارهای حائل بر رفتار لرزه‌ای دیوار اتفاق نظر دارند [۱۵-۱۳].

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج تاثیر خاکریز برای حداکثر تنش قائم دیوار حائل ۳ و ۶ متری را نشان می‌دهد. بررسی نتایج این شکل نشان می‌دهد در دیوار ۳ متری حداکثر تنش قائم در خاکریز یک $0/483$ مگاپاسکال است که بیشتر از خاکریز دو بوده ($0/423$ مگاپاسکال) و افزایش ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. هم‌چنین حداکثر تنش در خاکریز دو بیشتر از خاکریز سه ($0/24$ مگاپاسکال) نسبت افزایش ۴۳ درصد را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر درصد تغییر حداکثر تنش قائم دیوار حائل در خاکریز نوع سوم نسبت به خاکریز نوع اول به مقدار ۵۰ درصد دچار کاهش شده است. این روند کاهش حداکثر تنش قائم در کلیه مدل‌ها مشخص است. به عبارت دیگر با افزایش تراکم خاکریز مقدار حداکثر تنش قائم کاهش می‌یابد. علت این کاهش تنش با افزایش مقاومت خاک خاکریز را می‌توان افزایش سختی خاک و خاصیت



شکل ۱۳. تاثیر ارتفاع بر شتاب وارد بر دیوار

Fig. 13. The effect of wall height on the acceleration



شکل ۱۴. تاثیر ارتفاع بر حداکثر تنش وارد بر دیوار

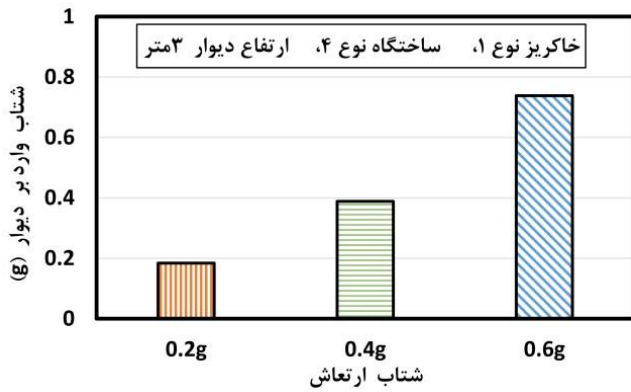
Fig. 14. The effect of wall height on the stress

پاسخ دیوار استفاده شده است. برای بررسی اثر شتاب بارگذاری بر رفتار لرزه‌ای دیوار، در تحلیل‌های انجام‌یافته ارتفاع دیوار، مشخصات خاکریز و خاک بستر ثابت در نظر گرفته شده و تنها مقدار شتاب بارگذاری متغیر می‌باشد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به صورت نمونه تغییرات اثر شتاب بارگذاری بر میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده و حداکثر تنش قائم دیوار ۳ متری در خاکریز نوع ۱ و خاک بستر نوع ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که این شکل‌ها نشان می‌دهند با افزایش شتاب بارگذاری، مقدار حداکثر شتاب جذب‌شده و حداکثر تنش قائم دیوار افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار میانگین حداکثر شتاب جذب‌شده در شتاب $0.2g$ با مقدار $0.118g$ ، با افزایش شتاب به $0.4g$ به $0.38g$ و در شتاب $0.6g$ به میزان $0.73g$ افزایش می‌یابد. در واقع مقدار شتاب جذب‌شده با افزایش شتاب لرزه‌ای به دو برابر، حدود ۱۰۰ درصد و با افزایش شتاب به سه برابر، حدود ۳۰۰ درصد

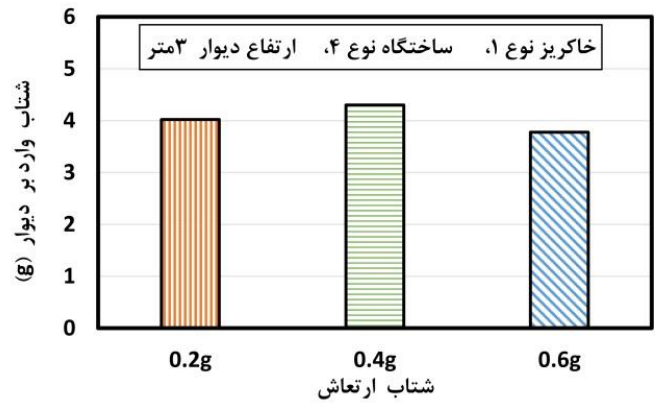
می‌یابد. کاهش تنش در دیوار به دلیل افزایش فشار دیوار به سمت پایین ناشی از افزایش ابعاد و نقطه اثر وزن می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش ابعاد دیوار، سطح مقطع افزایش یافته و تنش در دیوار حائل نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع دیوار، قاعده دیوار نیز متناسب با آن افزایش می‌یابد به عبارتی یکی از علل کاهش تنش وارد بر دیوار مرتفع، افزایش قاعده دیوار نیز می‌باشد. با افزایش ارتفاع دیوار، فشار جانبی دیوار با توان ۲ برابر افزایش می‌یابد و نقطه اثر آن نیز بالاتر قرار می‌گیرد. متناسب با آن وزن دیوار حدود $2/5$ برابر و نسبت مدول مقطع قاعده کف حدود ۱۶ برابر خواهد شد که نتیجه آن کاهش تنش وارد بر دیوار و هم‌چنین فشار وارد بر پنجه دیوار خواهد بود.

۷-۴- تاثیر شتاب بار دینامیکی

در این تحقیق از سه نوع شتاب متفاوت برای بارگذاری و بررسی



شکل ۱۶. نمودار تاثیر شتاب ارتعاش بر تنش وارد بر دیوار
Fig. 16. Effect of vibration acceleration on wall stress



شکل ۱۵. نمودار تاثیر شتاب ارتعاش بر شتاب وارد بر دیوار
Fig. 15. Effect of vibration acceleration on wall acceleration

به دلیل افزایش سختی خاک دیوار در برابر نیروهای وارده مقاومت خوبی نشان می‌دهد و مقدار تنش کمتری در دیوار ایجاد می‌شود.

- با افزایش ارتفاع دیوار مقدار تنش قائم ایجاد شده در مدل کاهش می‌یابد. این کاهش تنش در دیوار به دلیل افزایش فشار دیوار به سمت پایین و افزایش وزن بوده است. مؤلفه قائم ناشی از وزن دیوار، مقداری از بار وارده بر مدل را جذب می‌کند و باعث کاهش تنش در دیوار می‌شود. افزایش ارتفاع دیوار تاثیر محسوسی بر میانگین حداکثر شتاب جذب شده ندارد.

- با افزایش شتاب زلزله، میزان میانگین حداکثر شتاب جذب شده لرزه‌ای دیوار افزایش می‌یابد به طوری که نسبت افزایش در بسیاری از مدل‌ها بیانگر یک روند خطی متناسب با نسبت افزایش شتاب می‌باشد. از طرف دیگر افزایش شتاب بارگذاری روند مشخصی بر حداکثر تنش قائم دیوار ندارد و می‌توان چنین استنباط کرد حداکثر تنش قائم می‌تواند مستقل از شتاب بارگذاری در شرایط تشدید باشد.

مراجع

- [1] A. Kamyarfar and K. Piran, Retaining walls and earthquake effect on them, Khenya Publisher, Tehran (1991) (In Persian).
- [2] W. Rankine, On the stability of loose earth, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147(1857).
- [3] C.A. Coulomb, Essai sur une application des

افزایش می‌یابد که بیانگر یک رابطه خطی بین میانگین حداکثر شتاب جذب شده با شتاب لرزه‌ای است. این روند افزایش در میانگین حداکثر شتاب جذب شده ناشی از شتاب لرزه‌ای حرکت، تقریباً در تمامی مدل‌ها وجود دارد به طوری که می‌توان گفت با افزایش نسبت شتاب بارگذاری، میانگین حداکثر شتاب جذب شده با روند خطی افزایش می‌یابد. شکل ۱۶ نتایج تاثیر شتاب بارگذاری بر حداکثر تنش دیوار را نشان می‌دهد. بررسی نتایج این شکل نشان می‌دهد تحت ارتعاش اساسی سیستم، افزایش و تغییر شتاب بارگذاری روند مشخصی بر حداکثر تنش قائم دیوار ندارد و می‌توان چنین استنباط کرد حداکثر تنش قائم می‌تواند مستقل از شتاب بارگذاری در شرایط تشدید باشد.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق همان‌گونه که اشاره شد تاثیر نوع و مشخصات فیزیکی و مکانیک خاک بستر و خاکریز و همچنین هندسه دیوار حائل وزنی بر میانگین حداکثر شتاب جذب شده و حداکثر تنش قائم دیوار 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. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل خلاصه می‌شود.

- با افزایش مشخصات مکانیکی خاکریز و خاک بستر به دنبال آن افزایش تراکم و سختی، میزان میانگین حداکثر شتاب جذب شده قسمتی از خاکریز که در تماس با پشت دیوار قرار دارد کاهش می‌یابد.
- با افزایش تراکم خاک اطراف دیوار (خاکریز و خاک بستر)

- earthquake acceleration, Second national civil engineering congress, Tehran, University of Science and Technology (2006) (In Persian).
- [11] A. Azad and M. Yazdani, Reviewing the Mononobe-Okabe method and providing a complementary strategy in seismic design, *Transportation Research Journal*, 4(2) (2008) 157-172 (In Persian).
- [12] D. Choudhury and S.S. Nimbalkar, Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudo-dynamic method, *International Journal of Geomechanics*, 8(3) (2008) 169-175.
- [13] W. Yingwei and P. Shamsheer, Seismic displacements of rigid retaining walls, *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Missouri University of Science and Technology (2011).
- [14] R. Prishati and R. Obaidur, Seismic active earth pressure on bilinear retaining walls using a modified pseudo-dynamic method, *International Journal of Geo-Engineering*, 8(6) (2017) 1-10.
- [15] Y. Zhang, Sh. Han and J. Gong, Seismic rotational displacements of gravity quay walls considering excess pore pressure in backfill soils, *Journal of Earthquake Engineering*, 21(6) (2017) 15-26.
- regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture, *Memoires de l'Academie Royale pres Divers Savants*, 7 (1776).
- [4] N. Mononobe, H. Matsuo, On the determination of earth pressure during earthquake, *Proceedings: World Engineering Congress, Tokyo*, 9 (1929) 177-185.
- [5] B. B. Broms and I. Ingelson, Earth pressure against the abutments of a rigid frame bridge, *Geotechnique*, 21(1) (1971) 15-28.
- [6] N. M. Newmark, Effects of earthquake on dams and embankments, *Geotechnique*, 15(2) (1965) 139-157.
- [7] R. Richards and D. G. Elms, Seismic behavior of gravity retaining walls, *Geotechnical Engineering Division*, 105(4) (1979) 449-464.
- [8] R.S. Steedman and X. Zeng, Rotating block method for seismic displacement, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8) (2000) 709-717.
- [9] S. Nakamura, Reexamination of Mononobe-Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests, *Soils and Foundations*, 46 (2006) 135-146.
- [10] A.M. Halabian and S. Golmaghani, Dynamic analysis of retaining walls under the influence of harmonic dynamics and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghaffarpour Jahromi, S. Bahreini, Investigation of Maximum Active Pressure and Accelerated of Retaining Wall under Dynamic Load, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(2) (2020) 321-334.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14755.5734](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14755.5734)



