

تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با روش شبه استاتیکی

مقاله پژوهشی

آرمان فرشیدی^۱؛ میثم جلالی^{۲*}

۱- دانش آموخته‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، farshidi.arman73@gmail.com

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، mjalali.shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

شماره صفحات: ۱۶۹ تا ۱۹۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2024.12813.1474

واژگان کلیدی	چکیده
تحلیل لرزه‌ای ایستگاه مترو شفت آسانسور روش هشاش رابطه‌ی وود	طراحان مترو برای تخمین بار زلزله در سازه‌های زیرزمینی از روابط مربوط به سازه‌های روزمینی نظیر دیوار حائل و پل استفاده می‌کنند که با توجه به رفتار متفاوت سازه‌های روزمینی و زیرزمینی در برابر زلزله این کار به نوعی محافظه کارانه محسوب می‌شود. بنابراین در این پژوهش، ۹ نمونه شفت آسانسور در نرم‌افزار ABAQUS به صورت سه بعدی مدل‌سازی و با استفاده از روش شبه استاتیکی مربوط به تحلیل عددی سازه‌های زیرزمینی تحلیل شد. سپس کارایی روابط محافظه کارانه مربوط به سازه‌های روزمینی، با مدل‌سازی، بارگذاری و تحلیل نمونه‌ها در نرم افزار SAP2000 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار شفت آسانسور ایستگاه مترو در هنگام زلزله به مانند یک جسم صلب می‌باشد و همچنین مقایسه‌ی نتایج مربوط به مدل‌سازی و تحلیل شفت آسانسور در نرم افزار SAP2000 نشان داد که رابطه‌ی وود به عنوان رابطه‌ای مناسب می‌تواند با متوسط خطای حدود ۲ درصد لنگرهای خمشی و نیروهای محوری به وجود آمده در شفت آسانسور ایستگاه مترو را پیش‌بینی کند. بنابراین استفاده از این رابطه برای تخمین مقدار بار زلزله در شفت آسانسور ایستگاه مترو قابل توصیه می‌باشد.

۱- مقدمه	شفت‌ها سازه‌هایی عمیق هستند که از سطح زمین تا اعماق آن ادامه داشته و با ابعاد قابل توجه دسترسی سریع به زیرزمین را مقدور می‌سازند و معمولاً در ایستگاه‌های مترو به صورت سازه‌های جانبی متصل به ایستگاه مترو با خدمت‌پذیری شفت آسانسور (شفت قائم) و شفت راه‌پله (شفت مایل) با مقطع مستطیلی به کار می‌روند.
در گذشته تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی به دلیل این‌باور تجربی که سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های روزمینی در برابر زلزله ایمن‌تر هستند، کمتر مورد توجه محققان قرار می‌گرفت تا اینکه پس از وقوع زلزله‌ی کوبه در سال ۱۹۹۵ در کشور ژاپن و خسارات گسترده‌ی حاصل از این زلزله در ایستگاه‌های مترو علاقه‌ی محققین به این موضوع افزایش پیدا کرد که اهمیت این موضوع در ایران به دلیل لرزه‌خیزی بالای کشورمان دوچندان می‌باشد.	اساساً محققان جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی از چند روش عمده شامل روش‌های تجربی، روش مدل‌سازی فیزیکی، روش تحلیلی، روش حل بسته‌ی ریاضی، روش روابط

لنگر خمشی، نیروی محوری، نیروی برشی، تغییرمکان و کرنش‌های به وجود آمده در سازه در اثر زلزله ارائه می‌دهند که از مشهورترین این روابط می‌توان به روابط ونگ و پنزین اشاره کرد. بطور کلی چون این روش شامل روابط اثباتی بر اساس مبانی نظری می‌باشد می‌توان آن را جزو روش‌های تحلیلی نیز در نظر گرفت (Hashash, et al., 2001).

روش فشاردینامیکی زمین روش دیگری است که محققین جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی از آن استفاده می‌کنند. در این روش محققین بار زلزله‌ی وارد بر سازه را ناشی از وزن خاک اطراف سازه دانسته و برای محاسبه‌ی مقدار بار زلزله روابطی پیشنهاد می‌دهند. در واقع این روش برای تخمین بار زلزله در سازه‌های روزمینی مانند دیوارحائل و پل‌ها استفاده می‌شود اما محققین به صورت محافظه‌کارانه از این روابط جهت تخمین مقدار بار زلزله در سازه‌های زیرزمینی نیز استفاده می‌کنند (Hashash, et al., 2001).

روش مهم دیگری که محققین در جهت تحلیل لرزه‌ای ایستگاه مترو از آن بهره می‌گیرند روش عددی می‌باشد. در این روش‌ها محققین با استفاده از مدلسازی و تحلیل سازه‌های زیرزمینی در نرم افزارهای برپایه‌ی اجزا محدود و تفاضل محدود به بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی می‌پردازند. روش عددی بر اساس نحوه‌ی تعریف و اعمال زلزله به سازه‌ی زیرزمینی به دو روش مجزای روش شبه استاتیکی و روش دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی تقسیم بندی می‌شود. اساس روش شبه استاتیکی بر پایه‌ی فرضیات هشاش و اعمال تغییرشکل برشی مورد انتظار زلزله به توده‌ی خاک-سازه برای تعیین نیروهای داخلی به وجود آمده در سازه در اثر زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه استوار است (Hashash, et al., 2001). اما در روش دینامیکی که جزو دقیق‌ترین روش تحلیل سازه‌های زیرزمینی می‌باشد سازه‌ی زیرزمینی، تحت حرکات دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی در تراز پایین سیستم اندرکنشی خاک و سازه قرار می‌گیرد و پاسخ‌های سازه در برابر زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد. (Hashash, et al., 2001; Tsinidis, et al., 2020) (Zhiyi, (Abate, et al., 2016), (Duran, et al., 2012) (Chen & Zhang, 2018), (B. Zhang & Chen, 2019), (Zhiyi Chen & Jia, 2019) Golshani &

فشار دینامیکی زمین و روش‌های عددی شامل روش‌های شبه استاتیکی و روش دینامیکی استفاده می‌شود که روش‌های عددی و مدلسازی فیزیکی جزو روش‌های با دقت بالاتر نسبت به روش‌های دیگر می‌باشند. بنابراین هدف از این پژوهش تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با استفاده از روش عددی هشاش و همچنین بررسی امکان سنجی استفاده از روابط فشار دینامیکی زمین برای تخمین مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور ایستگاه مترو می‌باشد.

در روش تجربی محققین با بررسی زلزله‌هایی که در گذشته روی داده است به مطالعه روی انواع خرابی‌های به وجود آمده در سازه‌های زیرزمینی در اثر زلزله و عوامل به وجود آمدن این خرابی‌ها می‌پردازند از محققینی که از این روش جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند می‌توان به (Dowding & Rozan, 1978) و (Owen & Scholl, 1981) اشاره کرد.

در روش مدلسازی فیزیکی سعی می‌شود تا وضعیتی را که سازه در طبیعت تحت تاثیر امواج لرزه‌ای با آن روبرو می‌شود در آزمایشگاه شبیه سازی و رفتار آن مورد بررسی قرار گیرد. از جمله محققینی که از این روش جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند می‌توان به (Tsinidis, et al., 2013) (ZY Chen, et al., 2015) (J Zhang, et al., 2020) (Liang, et al., 2021) (An, et al., 2021) (Tsinidis, et al., 2016; Yue, et al., 2021) (et al., 2022) اشاره کرد.

روش دیگری که محققین جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی از آن استفاده می‌کنند روش تحلیلی می‌باشد. در این روش محققین به ارائه‌ی روابط دینامیکی و حل معادلات دینامیکی جهت بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی می‌پردازند (Jinghua Zhang, et al., 2019) و (Jinghua Zhang, et al., 2020) از جمله محققینی هستند که از روش تحلیلی جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند.

روش بعدی که محققین جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی از آن استفاده می‌کنند روش حل بسته‌ی ریاضی می‌باشد. در این روش محققین بر پایه‌ی تئوری انتشار امواج در لایه‌های همگن، ایزوتروپ و الاستیک خاک روابطی ریاضی برای محاسبه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی شامل

زلزله‌ها در مبحث تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی به دو سطح زلزله‌ی سطح بهره‌برداری و زلزله‌ی سطح حداکثر تقسیم بندی می‌شود. زلزله‌ی سطح بهره‌برداری به عنوان زلزله‌ای با احتمال وقوع بالا (حداقل یکبار) در طول عمر مفید سازه تعریف می‌شود که احتمال بازگشت این زلزله در عمر مفید سازه بین ۴۰ تا ۵۰ درصد می‌باشد و حدوداً ۱۴۵ سال در نظر گرفته می‌شود و زلزله‌ی طرح حداکثر به عنوان زلزله‌ای تعریف می‌شود که احتمال وقوع آن در طول عمر مفید سازه کم بوده و احتمال بازگشت این زلزله در عمر مفید سازه بین ۳ تا ۵ درصد می‌باشد یا احتمال بازگشت آن حدوداً ۱۹۵۰ سال در نظر گرفته می‌شود (Hashash, et al., 2001).

با توجه به اینکه قدمت ثبت زلزله‌ها به صورت مهندسی در حدود ۱۰۰ سال می‌باشد و بدلیل اطلاعات ناقص و محدود نسبت به زلزله‌های گذشته نیاز به استفاده از مفروضات احتمالی جهت تعیین زلزله‌ی طرح می‌باشد بنابراین مطابق جدول ۱، در این پژوهش شتاب‌های زلزله‌ی کمتر از $0.3g$ جزو زلزله‌های سطح بهره‌برداری و شتاب‌های زلزله بیش از $0.3g$ جزو زلزله‌های طرح حداکثر در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۱- سطح زلزله بر اساس شتاب زلزله (Farshidi, 2023)

PGA(g)	نوع زلزله‌ی طرح
۰/۱	زلزله‌ی سطح بهره‌برداری
۰/۲	زلزله‌ی سطح بهره‌برداری
۰/۳	زلزله‌ی سطح بهره‌برداری
۰/۴	زلزله‌ی سطح حداکثر
۰/۵	زلزله‌ی سطح حداکثر

۳- تحلیل شبه استاتیکی رفتار لرزه‌ای شفت آسانسور

تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با روش هشاش نیازمند ساخت دو مدل محاسباتی خاک بکر و مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه در نرم‌افزارهای بر پایه‌ی اجزا محدود و تفاضل محدود می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS v6.14-2 جهت مدل‌سازی عددی و تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور استفاده شده است. جدول ۲، مشخصات ابعادی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد مطابق

(Rezaeibadashiani, 2020) و (Keykhosropour & Lemnitzer, 2022) از جمله محققینی بوده‌اند که از روش عددی جهت تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی استفاده کردند.

روش‌های مدل‌سازی عددی دینامیکی در نرم افزار و مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه دقیق‌ترین روش‌های موجود برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی هستند اما این روش‌ها معایبی چون پرهزینه بودن و زمانبر بودن را دارند. معمولاً طراحان مترو در کشور به صورت محافظه‌کارانه جهت تخمین بار زلزله و طراحی ایستگاه مترو و سازه‌های جانبی متصل به آن مانند شفت از روابط فشار دینامیکی زمین که مربوط به سازه‌های روزمینی مانند دیوار حائل و پل است استفاده می‌کنند. بنابراین هدف از این پژوهش تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با استفاده از روش هشاش و همچنین بررسی امکان سنجی استفاده از روابط فشار دینامیکی زمین برای تخمین مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور ایستگاه مترو می‌باشد.

بنابراین در این پژوهش برای بررسی رفتار لرزه‌ای شفت قائم، ۹ نمونه شفت قائم در نرم‌افزار ABAQUS v6.14-2 مدل‌سازی و با استفاده از تحلیل شبه استاتیکی (روش هشاش) تاثیر شتاب زلزله، عمق شفت و ضخامت شفت روی تغییر مکان شفت آسانسور و همچنین رفتار شفت آسانسور نسبت به خاک اطراف در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفت و نیروی زلزله با استفاده از روش هشاش محاسبه شد. در مرحله‌ی دوم برای بررسی امکان سنجی استفاده از روابط فشار دینامیکی زمین بار زلزله با استفاده از روابط فشار دینامیکی زمین محاسبه و با بارهای زلزله‌ی محاسبه شده با روش عددی مقایسه شد که در نهایت مناسب‌ترین رابطه برای تخمین بار زلزله استخراج گشت. سپس جهت بررسی کارایی این روابط در تخمین نیروهای محوری و لنگرهای خمشی به وجود آمده در سازه شفت، نمونه‌ها در نرم‌افزار SAP2000 v18.2.2 مدل‌سازی و تحت بارگذاری توصیه شده توسط هشاش برای سازه‌های زیرزمینی قرار گرفت.

۲- تعیین زلزله‌ی طرح

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو تحت ۵ شتاب زلزله مطابق جدول ۱، بررسی شده است. اساساً انواع

این جدول ابعاد خاک به صورت محافظه کارانه ۴ برابر ارتفاع شفت آسانسور در نظر گرفته شده است. جدول ۳، نمایانگر مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای شفت آسانسور و خاک می‌باشد. مطابق این جدول برای

ساده سازی جنس شفت قائم از بتن ساده با مقاومت فشاری 25 MPa در نظر گرفته شده است. همچنین برای مشخصات خاک از مشخصات خاک ساختمانی زیرگذر گلوبندک واقع در منطقه ۱۲ تهران استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات ابعادی نمونه‌های خاک و شفت آسانسور (Farshidi, 2023)

شناسه نمونه	ابعاد شفت آسانسور				ابعاد خاک		
	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	ضخامت (m)	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)
SI-1	۳	۵	۱۰	۰/۴	۴۰	۴۰	۴۰
SI	SI-2	۳	۵	۱۰	۰/۵	۴۰	۴۰
	SI-3	۳	۵	۱۰	۰/۶	۴۰	۴۰
	S2-1	۳	۵	۱۵	۰/۴	۶۰	۶۰
S2	S2-2	۳	۵	۱۵	۰/۵	۶۰	۶۰
	S2-3	۳	۵	۱۵	۰/۶	۶۰	۶۰
	S3-1	۳	۵	۲۰	۰/۴	۸۰	۸۰
S3	S3-2	۳	۵	۲۰	۰/۵	۸۰	۸۰
	S3-3	۳	۵	۲۰	۰/۶	۸۰	۸۰

جدول ۳- مشخصات مصالح (Farshidi, 2023)

نوع سازه	نوع مصالح	$E(\text{MPa})$	ν	$G_0(\text{MPa})$	$V_s\left(\frac{m}{s}\right)$	$\rho\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	$f'_c(\text{Mpa})$
شفت	بتن ساده	۲۳۵۰۰	۰/۲	-	-	۲۵۰۰	۲۵
خاک	خاک خشک	۸۰	۰/۳	۸۴۵	۶۵۰	۲۰۰۰	-

اندازه‌ی حداکثر Δ_{ff} یا همان تغییرمکان زمین آزاد قرار می‌گیرد. تغییر مکان زمین آزاد مطابق رابطه‌ی محاسبه می‌شود که در این رابطه H ارتفاع مدل خاک و γ_{max} حداکثر کرنش برشی خاک می‌باشد که از رابطه‌ی (۱) قابل محاسبه است (Hashash et al., 2001).

$$\Delta_{f-f} = H\gamma_{max} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۲)، PGV بیشینه سرعت زلزله می‌باشد که به شتاب زلزله، فاصله مرکز زلزله تا ساختمانی و نوع زمین وابسته بوده و از جدول مربوط به رابطه‌ی بین سرعت زلزله و شتاب زلزله‌ی موجود در مقاله‌ی هشاش قابل استخراج است (Hashash et al., 2001). همچنین در این رابطه V_{se} سرعت موج برشی اصلاح شده‌ی لایه‌های خاک می‌باشد که

۳-۱- مدل محاسباتی خاک بکر

در این مدل محاسباتی خاک حفاری شده با استفاده از المان‌های پیوسته با مدل رفتاری الاستیک به صورت سه بعدی در نرم‌افزار ABAQUS مطابق شکل ۱، مدل‌سازی می‌شود. مطابق این شکل اندازه‌ی مش‌ها برای دقت بیشتر در اطراف حفره بیشتر و ریزتر و در لبه‌های کناری بزرگتر در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش به جهت توزیع بهتر مش‌ها در مدل خاک اندازه‌ی مش‌ها ۰/۴ ارتفاع شفت در نظر گرفته می‌شود.

در این مدل محاسباتی مطابق شکل ۲، از تغییرمکان کف خاک در هر سه راستا جلوگیری شده و خاک در یکی از سطوح جانبی تحت تغییرمکان مثلی اجباری با

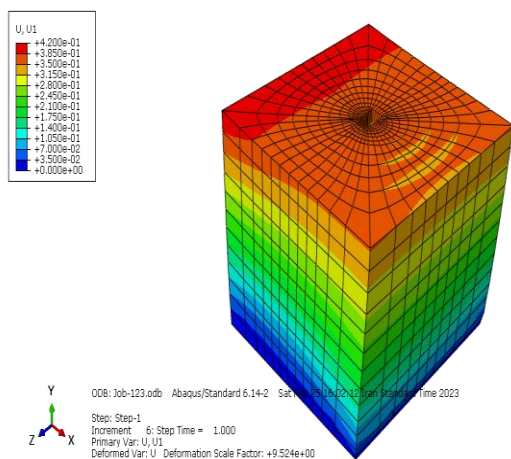
مطابق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

$$\gamma_{\max} = \frac{PGV}{V_{se}} \quad (2)$$

می‌شود. در این رابطه α ضریب تصحیح تغییرمکان، γ_{\max} کرنش برشی ماکزیمم، γ_h کرنش برشی حفره، $\Delta f-f$ تغییر مکان زمین آزاد، Δh تغییرمکان حفره می‌باشد که با استفاده از شکل ۳، که مربوط به کانتور تغییرمکان مدل خاک بکر می‌باشد محاسبه می‌شود همچنین H ارتفاع خاک و h ارتفاع حفره می‌باشد (Hashash et al., 2001).

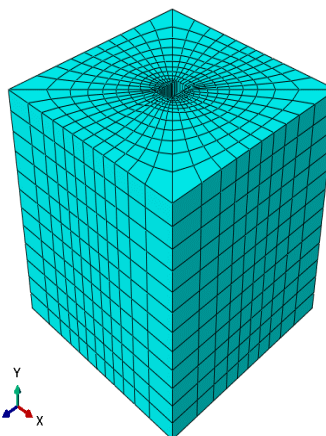
$$\alpha = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_h} = \frac{\frac{\Delta f-f}{H}}{\frac{\Delta h}{h}} \quad (4)$$

در نهایت ضریب تصحیح تغییرمکان با استفاده از رابطه‌ی (۴) مطابق شکل ۴، برای نمونه‌های مورد بررسی محاسبه می‌شود.

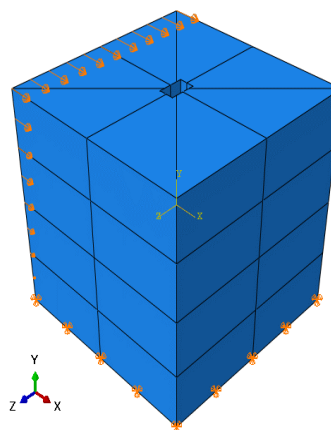


شکل ۳- کانتور تغییرمکان مدل خاک بکر بر حسب متر (Farshidi, 2023)

مطابق شکل ۴، در شتاب حداکثر زلزله‌ی ثابت با افزایش عمق شفت آسانسور، ضریب تصحیح تغییر مکان افزایش می‌یابد که این می‌تواند بدلیل این باشد که افزایش عمق شفت باعث کاهش کرنش برشی حفره می‌شود بنابراین با توجه به اینکه در شتاب ثابت، کرنش برشی حداکثر نیز وابسته به عمق یا ارتفاع شفت نمی‌باشد در نتیجه مقدار ضرایب تصحیح با افزایش عمق شفت آسانسور افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این نمودارها افزایش شتاب حداکثر زلزله باعث به وجود آمدن روند کاهشی در ضرایب تصحیح نمونه‌ها می‌شود که این می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش شتاب حداکثر زلزله هم کرنش برشی ماکزیمم و هم کرنش برشی حفره افزایش می‌یابد که به دلیل رابطه‌ی معکوس بین ضریب



شکل ۱- نحوه‌ی مش بندی خاک (Farshidi, 2023)



شکل ۲- نحوه‌ی اعمال تغییرمکان مثلثی اجباری (Farshidi, 2023)

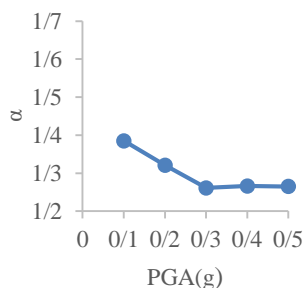
مطابق رابطه‌ی (۳)، V_s سرعت انتشار موج برشی در خاک و m ضریب تصحیح مدول برشی می‌باشد که به شتاب زلزله و نوع زمین وابسته بوده که از نشریه‌ی ۳۶۰ با عنوان دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود قابل استخراج می‌باشد (code360, 2006).

$$V_{se} = \sqrt{m} V_s \quad (3)$$

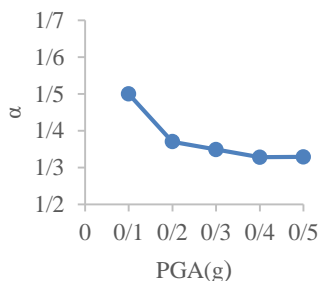
هدف از ساخت این مدل محاسباتی محاسبه‌ی ضریب تصحیح تغییرمکان می‌باشد که از رابطه‌ی (۴) محاسبه

برشی ماکزیمم بیشتر بوده و در روند کاهش ضریب تصحیح تاثیر گذاری بیشتری دارد.

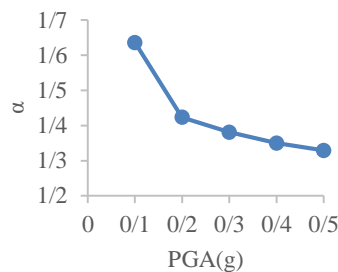
تصحیح و کرنش برشی حفره می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که نرخ افزایش کرنش برشی حفره نسبت به نرخ افزایش کرنش



پ- نمونه S1



ب- نمونه S2



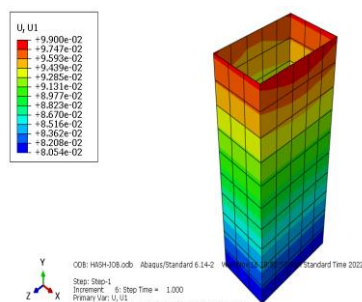
الف- نمونه S3

شکل ۴- مقادیر محاسبه شده ضریب تصحیح تغییر مکان برای نمونه‌های مورد بررسی (Farshidi, 2023)

مطابق شکل ۶، کانتور تغییر مکان شفت در راستای محور طولی به عنوان خروجی تحلیل استخراج می‌شود، سپس تغییر مکان شفت آسانسور از تفاضل تغییر مکان بالا و کف شفت مطابق شکل ۷، محاسبه می‌شود. مطابق نمودارهای موجود در شکل ۷، با افزایش شتاب زلزله تغییر مکان شفت افزایش می‌یابد که مقدار این افزایش مطابق شکل ۸، در شتاب‌های بالاتر بدلیل کاهش ضریب تصحیح در اثر افزایش شتاب زلزله کاهش می‌یابد. همچنین افزایش عمق شفت در شتاب زلزله‌ای ثابت موجب افزایش تغییر مکان در شفت قائم به دلیل کاهش سختی سازه می‌شود بطوریکه به طور متوسط به ازای هر ۵ متر افزایش ارتفاع شفت قائم به طور متوسط تغییر مکان آن ۵۴٪ افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این مدل محاسباتی نشان داد که ضخامت شفت تأثیری روی تغییر مکان شفت آسانسور در اثر اعوجاج ناشی از زلزله ندارد.

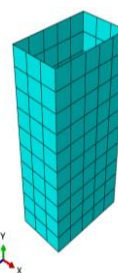
۳-۲- مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه

به طور کلی هدف از این مدل محاسباتی محاسبه‌ی تغییر مکان شفت آسانسور در اثر زلزله و تعیین رفتار شفت آسانسور نسبت به خاک اطراف در برابر بار زلزله می‌باشد. در این مدل محاسباتی خاک و شفت آسانسور به صورت سه بعدی و با رفتار الاستیک با هم مدل شده و تحت تغییر مکان مثلثی اجباری به اندازه‌ی حداکثر $\alpha \Delta f-f$ قرار می‌گیرد. در این مدل محاسباتی خاک با استفاده از المان‌های پیوسته و مش بندی مشابه مدل خاک بکر مدل‌سازی می‌شود. اما شفت آسانسور با استفاده از المان‌های پیوسته و با مش بندی یکنواخت به اندازه‌ی ۱ متر مطابق شکل ۵، مدل‌سازی می‌شود همچنین در این مدل محاسباتی برای تعریف خواص تماسی بین شفت آسانسور و خاک از قید *tie* استفاده شده است به عبارت دیگر فرض شده است که لغزشی بین خاک و شفت وجود ندارد.



شکل ۶- کانتور تغییر مکان شفت آسانسور در مدل

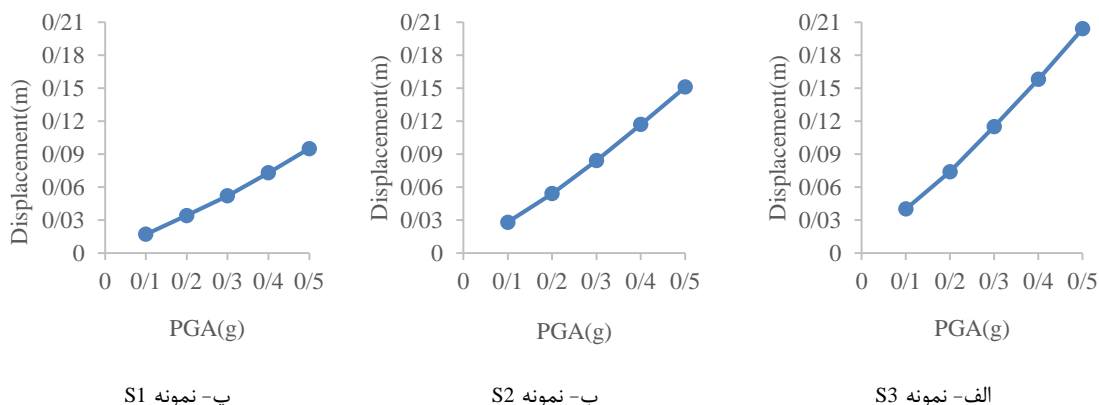
محاسباتی اندرکنش خاک و سازه بر حسب متر در راستای محور طولی (محور x) (Farshidi, 2023)



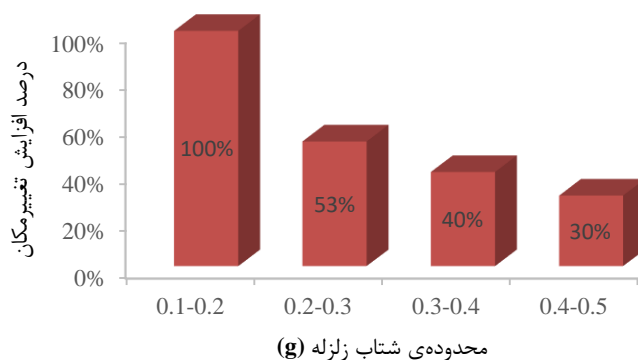
شکل ۵- مش بندی شفت آسانسور (Farshidi, 2023)

۳-۳- محاسبه‌ی تغییر مکان شفت آسانسور در برابر زلزله

مدل اندرکنش خاک و سازه در ABAQUS تحلیل شده و



شکل ۷- تغییر مکان نمونه‌های شفت آسانسور در مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه در راستای محور طولی (محور x) (Farshidi, 2023)



شکل ۸- درصد افزایش تغییر مکان در اثر افزایش شتاب زلزله برای نمونه‌ی S1-1 در مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه در راستای محور طولی (محور x) (Farshidi, 2023)

محاسبه‌ی نسبت اعوجاج R با استفاده از رابطه‌ی (۵) می‌باشد (Hashash, et al., 2001). سپس نسبت انعطاف‌پذیری با استفاده از رابطه‌ی (۶) ارائه شده توسط ونگ (J Wang & Munfakh, 2001) و همچنین رابطه‌ی (۷) ارائه شده توسط اندرسون (Anderson, 2008) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\gamma_s}{\gamma_{f-f}} = \frac{\frac{\Delta_s}{h}}{\frac{\Delta_{f-f}}{H}} \quad (5)$$

$$R = \frac{4(1-\nu)R}{F+3-4\nu} \quad (6)$$

$$R = \frac{2F}{1+F} \quad (7)$$

شکل ۹، نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده برای

۳-۴- رفتار شفت آسانسور در برابر زلزله

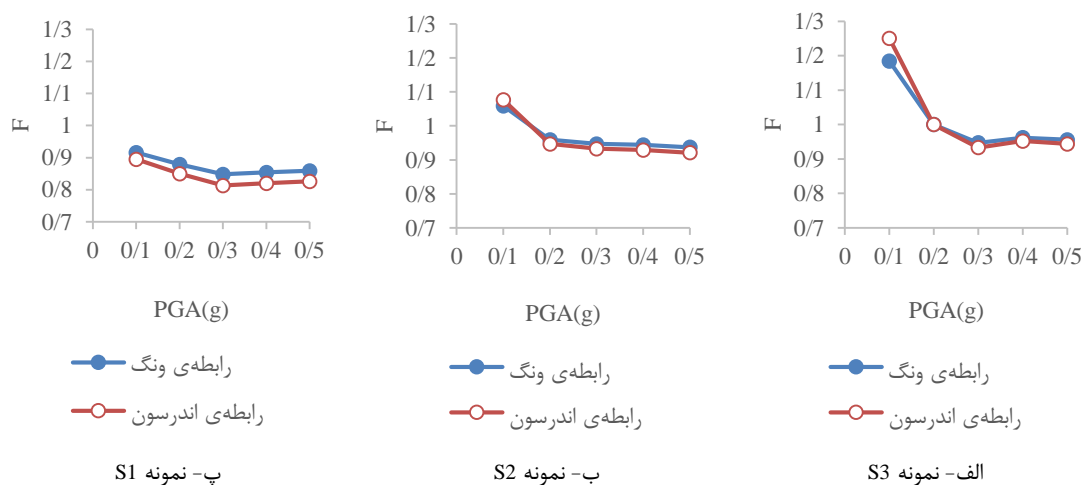
در این بخش رفتار شفت آسانسور یا به عبارت بهتر رفتار صلب یا منعطف شفت آسانسور نسبت به خاک اطراف با استفاده از پارامتری به نام نسبت انعطاف‌پذیری سنجیده می‌شود. در واقع نسبت انعطاف‌پذیری پارامتری است که سختی سازه‌ی زیرزمینی نسبت به سختی خاک اطرافش را مشخص می‌کند. معمولاً نسبت انعطاف‌پذیری ۲۰، مرز بین رفتار صلب یا انعطاف‌پذیر سازه‌ی زیرزمینی را مشخص می‌کند به طوریکه سازه‌ی زیرزمینی با نسبت انعطاف‌پذیری کمتر از ۲۰ صلب و سازه‌ی زیرزمینی با نسبت انعطاف‌پذیری بالای ۲۰ نسبت به خاک اطراف انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود (Zafari, 2012). اولین گام برای محاسبه‌ی نسبت انعطاف‌پذیری F ،

نسبت انعطاف‌پذیری با استفاده از دو رابطه‌ی ونگ و اندرسون همخوانی خوبی با هم داشته و مقدار اختلاف آن‌ها کمتر از ۵ درصد می‌باشد. همچنین مطابق این نمودارها مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری با افزایش ارتفاع شفت افزایش می‌یابد دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که با افزایش ارتفاع شفت، سختی سازه کاهش یافته و تغییر مکان شفت و به تبع آن کرنش برشی شفت افزایش می‌یابد بنابراین با توجه به اینکه تغییر مکان خاک و به تبع آن کرنش برشی خاک به عمق شفت وابسته نیست مطابق رابطه‌ی (۵) پارامتر نسبت اعوجاج افزایش یافته و بنابراین با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین نسبت انعطاف‌پذیری و نسبت اعوجاج، مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این نمودارها با افزایش شتاب زلزله مقدار نسبت انعطاف‌پذیری روندی کاهشی پیدا می‌کند که دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که با اینکه با افزایش شتاب زلزله تغییر مکان شفت کرنش برشی شفت افزایش می‌یابد اما افزایش شتاب زلزله باعث افزایش تغییر مکان خاک و کرنش برشی به وجود آمده در خاک نیز می‌شود بنابراین بدلیل نرخ رشد بیشتر کرنش

نسبت انعطاف‌پذیری با استفاده از دو رابطه‌ی ونگ و اندرسون همخوانی خوبی با هم داشته و مقدار اختلاف آن‌ها کمتر از ۵ درصد می‌باشد. همچنین مطابق این نمودارها مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری با افزایش ارتفاع شفت افزایش می‌یابد دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که با افزایش ارتفاع شفت، سختی سازه کاهش یافته و تغییر مکان شفت و به تبع آن کرنش برشی شفت افزایش می‌یابد بنابراین با توجه به اینکه تغییر مکان خاک و به تبع آن کرنش برشی خاک به عمق شفت وابسته نیست مطابق رابطه‌ی (۵) پارامتر نسبت اعوجاج افزایش یافته و بنابراین با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین نسبت انعطاف‌پذیری و نسبت اعوجاج، مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این نمودارها با افزایش شتاب زلزله مقدار نسبت انعطاف‌پذیری روندی کاهشی پیدا می‌کند که دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که با اینکه با افزایش شتاب زلزله تغییر مکان شفت کرنش برشی شفت افزایش می‌یابد اما افزایش شتاب زلزله باعث افزایش تغییر مکان خاک و کرنش برشی به وجود آمده در خاک نیز می‌شود بنابراین بدلیل نرخ رشد بیشتر کرنش

۳-۵- صحت سنجی مدل‌سازی عددی

معمولا در پژوهش‌های مبتنی بر مدل‌سازی عددی جهت اطمینان از عملکرد صحیح نرم افزار، نتایج مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار با نتایج مقالاتی که از روش مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه استفاده کرده‌اند مقایسه می‌شود. یکی از ملزومات لازم جهت چنین کاری این است که روش مورد استفاده در مقاله‌ی مورد نظر با روش مورد استفاده توسط محقق نزدیک باشد. با توجه به اینکه در ادبیات فنی تحقیق مورد مشابهی از مقایسه‌ی مدل‌سازی فیزیکی با مدل‌سازی عددی با روش هشاش یافت نشد بنابراین امکان انجام صحت سنجی مدل‌سازی عددی میسر نمی‌باشد.



شکل ۹- مقدار نسبت انعطاف‌پذیری برای نمونه‌های مورد بررسی (Farshidi, 2023)

شده با روابط فشار دینامیکی زمین مقایسه می‌شود. هدف از این کار یافتن رابطه‌ی بهینه برای تخمین شدت بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور ایستگاه مترو می‌باشد. پس از یافتن رابطه‌ی بهینه کارایی این رابطه با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل شفت آسانسور در نرم‌افزار SAP2000 تحت دو سناریو بار گذاری با استفاده از بار زلزله‌ی محاسبه شده با روش

۴- محاسبه‌ی مقدار بار زلزله

در این بخش ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عددی شفت آسانسور در نرم‌افزار ABAQUS و تحلیل شبه استاتیکی مدل عددی، مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور ایستگاه مترو با استفاده از روش هشاش محاسبه شده و با مقادیر محاسبه

حالیست که با افزایش عمق شفت به دلیل افزایش تغییر مکان در اثر نیروی ۱ نیوتنی سختی اعوجاج سازه کاهش می‌یابد بنابراین می‌توان این طور استنباط کرد که به دلیل تاثیر بیشتر افزایش تغییر مکان شفت در اثر اعوجاج نسبت به کاهش سختی در اثر اعمال نیروی ۱ نیوتنی، مقدار نیروی زلزله افزایش می‌یابد.

دیگرنتیجه‌ی مهمی که از این نمودارها استخراج می‌شود این است که با افزایش ضخامت شفت مقدار نیروی زلزله افزایش می‌یابد دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که با اینکه مطابق نتایج مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه تغییر مکان شفت در اثر اعمال اعوجاج مثلثی متاثر از ضخامت شفت نیست با اینحال در اثر افزایش ضخامت شفت مقدار بار زلزله به دلیل کاهش تغییر مکان در اثر نیروی ۱ نیوتنی و به عبارتی افزایش سختی اعوجاج افزایش می‌یابد.

$$P = K\Delta_s \quad (9)$$

۴-۲- محاسبه‌ی بار زلزله با روابط فشار دینامیکی

زمین

محققین در روش فشار دینامیکی زمین که مربوط به تخمین مقدار بار زلزله در سازه‌های روزمینی مانند پل‌ها و دیوار حائل می‌باشد نیروی زلزله را ناشی از وزن خاک دانسته و به صورت اضافه فشاری که خاک در هنگام زلزله به سازه وارد می‌کند در نظر می‌گیرند و برای تخمین مقدار بار زلزله روابطی ریاضی پیشنهاد می‌دهند.

نشریه‌ی ۳۰۸ با عنوان راهنمای طراحی دیوار حائل برای محاسبه‌ی اضافه فشار دینامیکی رابطه‌ی (۱۰) که توسط محقق به نام وود ارائه شده است را پیشنهاد می‌دهد (Rule308, 2017). در این رابطه، ΔP_{eq} اضافه فشار دینامیکی، γ وزن مخصوص خاک، h ارتفاع سازه، k_h مولفه‌ی افقی شتاب زلزله که معمولا نصف مولفه‌ی قائم شتاب زلزله در نظر گرفته می‌شود و F_p ضریب بدون بعد رانش دینامیکی می‌باشد که مطابق نمودارهای این نشریه قابل استخراج می‌باشد (Rule308, 2017).

$$\Delta P_{eq} = \gamma h^2 k_h F_p \quad (10)$$

آیین‌نامه‌ی طراحی دیوار حائل سازمان مدیریت بحران فدرال آمریکا (FEMA356)، رابطه‌ی (۱۱) را برای محاسبه‌ی اضافه فشار دینامیکی پیشنهاد می‌دهد. در این رابطه ΔP_{eq} اضافه فشار دینامیکی، k_h مولفه‌ی افقی شتاب زلزله، γ وزن

هشاش و بار زلزله‌ی محاسبه شده با رابطه‌ی بهینه و مقایسه‌ی لنگرهای خمشی و نیروهای محوری به وجود آمده در گره‌های شفت آسانسور تحت این دو سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- محاسبه‌ی مقدار بار زلزله با روش هشاش

برای محاسبه‌ی مقدار بار زلزله با استفاده از روش هشاش نیاز به ایجاد یک مدل محاسباتی در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد در این مدل محاسباتی شفت و خاک با هم مدل شده و خواص تماسی، مش بندی خاک و شفت و شرایط تکیه‌گاهی خاک عینا مانند مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته می‌شود و تنها تفاوت این مدل محاسباتی با مدل محاسباتی اندرکنش خاک و سازه در نوع بارگذاری می‌باشد بدین صورت که در این مدل محاسباتی شفت آسانسور تحت بار مثلثی با اندازه‌ی حداکثر ۱ نیوتن بر متر در یکی از سطوح جانبی آن در راستای طولی قرار می‌گیرد. این بارگذاری در راستای محاسبه‌ی سختی اعوجاج شفت آسانسور با استفاده از رابطه‌ی (۸) به کار گرفته می‌شود. مطابق این رابطه سختی اعوجاج K به نسبت نیروی ۱ نیوتنی به تغییر مکان ناشی از این نیرو Δ_1 اطلاق می‌شود (Hashash et al., 2001).

$$K = \frac{1}{\Delta_1} \quad (8)$$

پس از محاسبه‌ی سختی اعوجاج مقدار بار زلزله P با استفاده از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود (Hashash et al., 2001). شکل ۱۰ مقادیر بار زلزله‌ی محاسبه شده برای شفت‌های مورد بررسی در این پژوهش را نمایش می‌دهد. مطابق این نمودارها با افزایش شتاب حداکثر زلزله مقدار نیروی وارد بر شفت افزایش می‌یابد این اتفاق می‌تواند به این دلیل باشد که طبق رابطه‌ی (۹) شدت نیروی زلزله‌ی محاسبه شده با روش هشاش به سختی اعوجاج و تغییر مکان سازه وابسته می‌باشد. سختی اعوجاج سازه به شتاب حداکثر زلزله وابسته نمی‌باشد اما افزایش شتاب حداکثر زلزله باعث افزایش تغییر مکان شفت می‌شود بنابراین با افزایش مقدار شتاب حداکثر زلزله، شدت نیروی وارد بر شفت به دلیل افزایش تغییر مکان شفت، افزایش می‌یابد.

همچنین مطابق این نمودارها با افزایش عمق شفت آسانسور مقدار نیروی زلزله‌ی وارد بر شفت افزایش می‌یابد که دلیل این اتفاق می‌تواند این باشد که مطابق با نتایج مدل محاسباتی خاک و سازه با افزایش عمق شفت، تغییر مکان شفت در اثر اعوجاج مثلثی اعمال شده افزایش می‌یابد این در

مقادیر محاسبه شده با انواع روابط فشاردینامیکی زمین شامل رابطه‌ی وود، رابطه‌ی سازمان مدیریت بحران فدرال آمریکا (FEMA356) و رابطه‌ی ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی پل ایران با مقدار محاسبه شده برای بار زلزله با روش هشاش مقایسه می‌شود. شکل ۱۱ نمودارهای مقایسه‌ی مقدار بار زلزله با روابط فشاردینامیکی زمین و روش هشاش را نشان می‌دهد. مطابق این نمودارها رابطه‌ی وود مربوط به تخمین بار زلزله در دیوارهای حائل بیشترین مطابقت را با روش هشاش که مقدار بار زلزله را از طریق مدلسازی عددی شفت آسانسور محاسبه می‌کند داراست بنابراین رابطه‌ی وود نسبت به روابط دیگر فشاردینامیکی زمین از لحاظ مقداری مناسبترین رابطه می‌باشد. همچنین مطابق این نمودارها روش هشاش نسبت به رابطه‌ی وود مقدار بار زلزله را حدود ۴ برابر بیشتر تخمین می‌زند که این می‌تواند بدلیل تفاوت در نحوه‌ی توزیع بار زلزله در این دو روش باشد. زیرا طراحان ایستگاه گلوبندک تهران جهت طراحی ایستگاه مترو از روابط فشاردینامیکی زمین با توزیع یکنواخت مستطیلی برای بار زلزله استفاده کرده بودند در حالیکه بر اساس فرضیات روش هشاش این بار باید به صورت مثلثی به سازه وارد می‌شد.

مخصوص و h ارتفاع سازه می‌باشد (FEMA356, 2000).

$$\Delta P_{eq} = 0.4k_h \gamma h \quad (11)$$

آیین‌نامه‌ی قدیم پل ایران رابطه‌ی (۱۲) را برای تخمین اضافه فشار دینامیکی وارد بر سازه پیشنهاد می‌دهد.

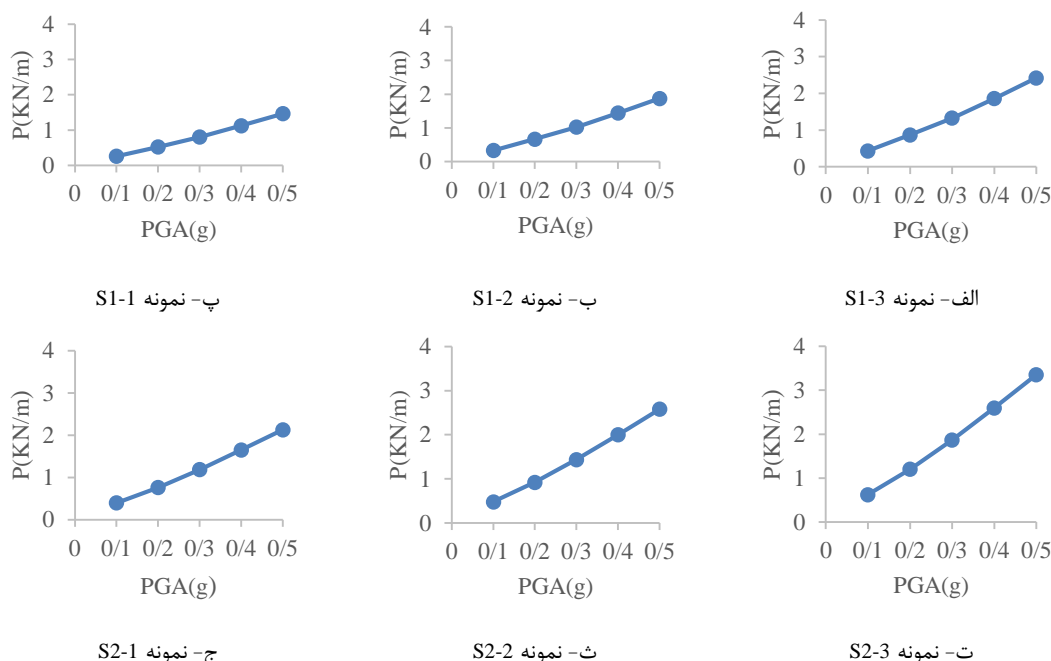
$$\Delta P_{eq} = 1.25A k_a \gamma h \quad (12)$$

در این رابطه ΔP_{eq} اضافه فشار دینامیکی، γ وزن مخصوص خاک، h ارتفاع سازه، A شتاب حداکثر زمین با اعمال ضریب کاهش مربوط به عمق سازه می‌باشد که با استفاده از جدول ۴، قابل محاسبه است. همچنین k_a ضریب فشار خاک در حالت عادی می‌باشد که از رابطه‌ی (۱۳) قابل محاسبه است لازم به ذکر است که ϕ در این رابطه بیانگر زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد که در این پژوهش مطابق مشخصات خاک ساختگاه ایستگاه گلوبندک برابر ۳۳ در نظر گرفته می‌شود (Rule308, 2017).

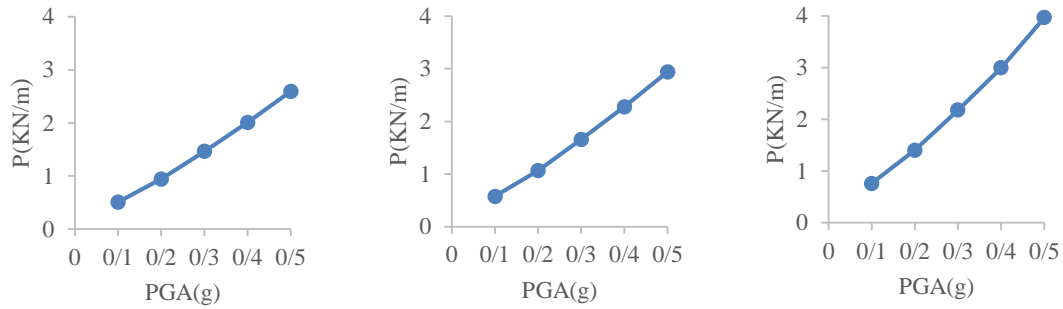
$$k_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (13)$$

۳-۴- مقایسه‌ی مقدار بار زلزله محاسبه شده با روش‌های مختلف

در این بخش هدف یافتن رابطه‌ی فشار دینامیکی بهینه برای تخمین مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت می‌باشد. در این راستا



شکل ۱۰- نمودار مقدار بار زلزله‌ی محاسبه شده برای نمونه‌های مورد بررسی (Farshidi, 2023)



خ- نمونه S3-1

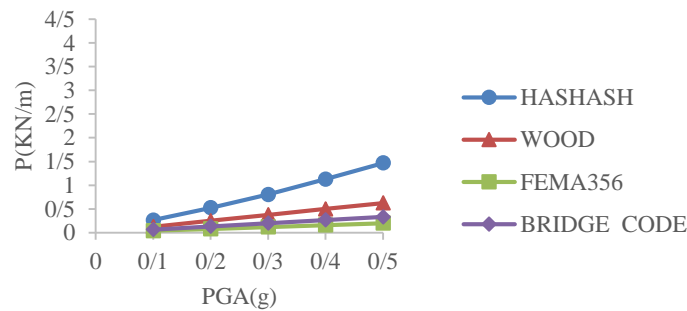
ح- نمونه S3-2

چ- نمونه S3-3

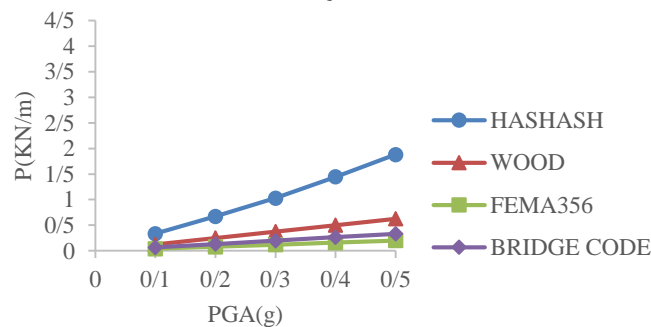
ادامه شکل ۱۰- نمودار مقدار بار زلزله‌ی محاسبه شده برای نمونه‌های مورد بررسی (Farshidi, 2023)

جدول ۴- نسبت شتاب زمین در عمق تونل به شتاب سطح زمین (Hashash et al., 2001)

عمق تونل (m)	نسبت شتاب زمین در عمق تونل به شتاب سطح زمین
≤ 6	۱/۰
۱۵-۶	۰/۹
۳۰-۱۵	۰/۸
≥ ۳۰	۰/۷



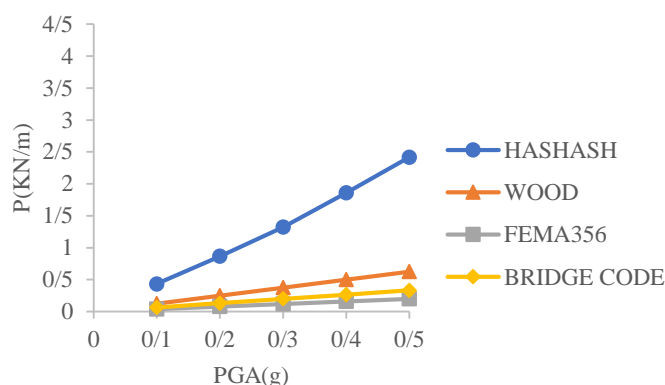
الف- نمونه S1-1



ب- نمونه S1-2

شکل ۱۱- نمودار مقایسه‌ی بار زلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S1 (Farshidi, 2023)

تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با روش شبه استاتیکی، آرمان فرشیدی و ...، ص ۱۶۹-۱۹۲



پ- نمونه S1-3

ادامه شکل ۱۱- نمودار مقایسه‌ی بارزلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S1 (Farshidi, 2023)

اینجا از عرض شفت استفاده می‌شود و v_s ضریب پواسون خاک می‌باشد (Eslamishahrbabak, 2012).

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-v_s^2)} \quad (14)$$

۵-۱- بارگذاری شفت آسانسور در SAP2000

در مبحث طراحی سازه‌های زیرزمینی طراحان معمولاً از ترکیب بارهای پیشنهاد شده توسط هشاش مطابق جدول ۵، استفاده می‌کنند (Hashash, et al., 2001). مطابق این جدول معمولاً سازه‌های زیرزمینی تحت بارهای مرده D ، بار زنده L_s ، بار فشار جانبی خاک E_1 و بار زلزله EQ قرار می‌گیرند.

جدول ۵- ترکیب بارهای ارائه شده توسط هشاش

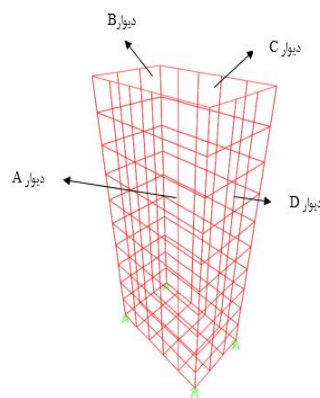
(Hashash et al., 2001)

سطح زلزله	ترکیب‌های بارگذاری			
	D	E_1	L_s	EQ
سطح زلزله	۱	۱	۱	۱
بهره‌برداری				
سطح زلزله	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۳۰	۱/۳۰
ماکزیمم				

در این پژوهش برای بررسی کارایی رابط‌های وود از دو سناریو بارگذاری متفاوت استفاده می‌شود در سناریوی اول شفت آسانسور تحت بار مرده، بار زنده، بار فشار جانبی خاک و بار زلزله محاسبه شده با روش هشاش به صورت مثلثی با اندازه‌ی حداکثر در سطح زمین قرار می‌گیرد و در سناریوی

۵- مدلسازی عددی شفت آسانسور در SAP2000

این بخش در راستای بررسی کارایی رابط‌های وود به عنوان مناسبترین رابط‌های فشاردینامیکی زمین در تخمین مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور به کار گرفته می‌شود. در ابتدا لازم است نمونه‌های مورد بررسی شفت‌های قائم در نرم‌افزار $SAP2000v18.2.2$ مدلسازی شوند. شفت‌های قائم مطابق شکل ۱۲، با استفاده از المان‌های پوسته و با مصالح بتن با مقاومت فشاری 25 MPA و با اندازه مش ۱ متر مدلسازی می‌شوند.

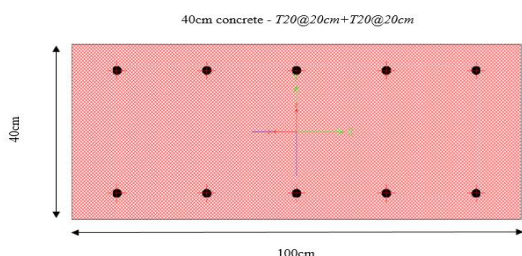


شکل ۱۲- نمونه‌ی شفت مدل شده در SAP2000

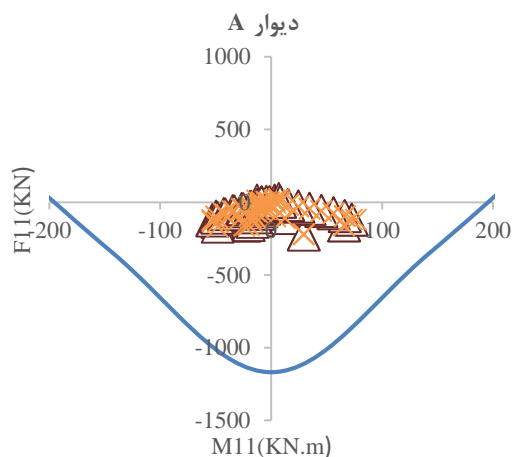
(Farshidi, 2023)

در این پژوهش جهت محاسبه‌ی ضریب سختی این فنرها از رابط‌های (۱۴) مربوط به پی‌ها استفاده می‌شود. مطابق این رابط E_s مدول الاستیسیته‌ی خاک، B عرض پی که در

متر میلگرد آجدار *AIII* به کار رفته است. هدف از در نظر گرفتن این مقطع رسم نمودار ظرفیت دیواره‌های شفت آسانسور می‌باشد. شکل ۱۴، لنگرهای خمشی و نیروهای محوری به وجود آمده در گره‌های دیواره‌ی *A* شفت آسانسور ناشی از دو سناریوی بارگذاری را برای نمونه‌ی *SI* تحت شتاب ناشی از $0.1g$ نشان می‌دهد. مطابق این شکل رابطه‌ی وود می‌تواند به طور کارآمدی لنگرهای خمشی و نیروهای محوری ایجاد شده در شفت آسانسور تحت زلزله را محاسبه کند بطوریکه این رابطه نسبت به روش هشاش لنگر خمشی و نیروی محوری را به طور متوسط ۲٪ کمتر تخمین می‌زند بنابراین استفاده از این رابطه برای تخمین مقدار بار زلزله در سازه‌ی شفت آسانسور قابل توصیه می‌باشد.



شکل ۱۳- مقطع در نظر گرفته شده برای نمونه‌ی *SI* (Farshidi, 2023)



دوم به جای بار زلزله‌ی محاسبه شده با روش هشاش از بار زلزله‌ی محاسبه شده با رابطه‌ی وود و به صورت توزیع یکنواخت بار استفاده می‌شود. مقدار بار مرده 0.35 تن بر مترمربع و مقدار بار زنده 0.75 تن بر متر مربع در نظر گرفته شده و به کف شفت آسانسور وارد می‌شود همچنین بار فشار جانبی خاک با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) محاسبه شده و به دیواره‌های جانبی شفت آسانسور به صورت مثلثی با حداکثر مقدار در عمق زمین اعمال می‌شود (Rule308, 2017).

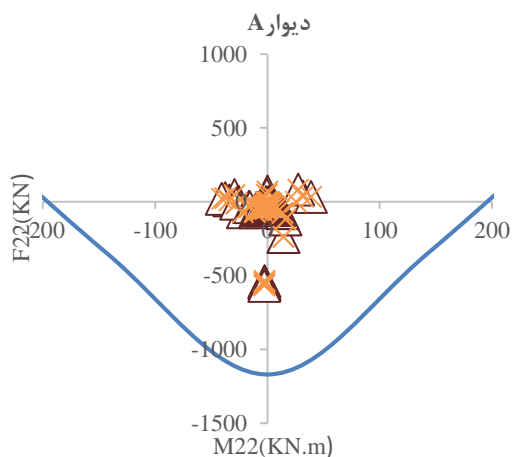
$$\sigma_h = k_0 \gamma z \quad (15)$$

در رابطه‌ی فوق γ وزن مخصوص خاک، z عمق دیوار و k_0 ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون می‌باشد که از رابطه‌ی (۱۶) قابل استخراج می‌باشد (Rule308, 2017).

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (16)$$

۵-۲- بررسی کارایی رابطه‌ی وود

پس از تحلیل شفت آسانسور در *SAP2000* تحت دو سناریوی بارگذاری هشاش و وود، کارایی رابطه‌ی وود با مقایسه‌ی لنگر خمشی و نیروی محوری به وجود آمده توسط سناریوی بارگذاری وود با سناریوی بارگذاری هشاش مشخص می‌شود. در این راستا ابتدا نیاز به فرض مقطعی مناسب برای دیواره‌های شفت آسانسور می‌باشد. مطابق شکل ۱۳، فرض می‌شود در هر متر از دیواره‌های نمونه‌ی *SI* در هر ۲۰ سانتی



روش هشاش × روش وود Δ منحنی ظرفیت — روش هشاش × روش وود Δ منحنی ظرفیت —

شکل ۱۴- نمودار اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری نمونه‌ی *SI* (Farshidi, 2023)

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو و همچنین امکان سنجی استفاده از روابط فشار دینامیکی زمین برای تخمین بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور صورت پذیرفته است. مهم‌ترین نتایج حاصله از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- با افزایش شتاب زلزله تغییر مکان شفت افزایش می‌یابد که این افزایش تغییرمکان با افزایش شتاب زلزله بدلیل کاهش ضریب تصحیح تغییرمکان ناشی از افزایش شتاب زلزله کمتر می‌شود.
- ۲- افزایش عمق شفت در شتاب زلزله‌ی ثابت موجب افزایش تغییر مکان شفت آسانسور به دلیل کاهش سختی سازه می‌شود بطوریکه به ازای هر ۵ متر افزایش ارتفاع شفت، تغییرمکان شفت به طور متوسط ۵۴٪ افزایش می‌یابد.
- ۳- ضخامت شفت تأثیری روی تغییرمکان شفت آسانسور در برابر زلزله ندارد.
- ۴- مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری با افزایش ارتفاع شفت بدلیل افزایش تغییرمکان شفت و به تبع آن افزایش نسبت اعوجاج، افزایش می‌یابد.
- ۵- با افزایش شتاب زلزله مقدار نسبت انعطاف‌پذیری بدلیل بیشتر بودن نرخ رشد کرنش برشی خاک نسبت به کرنش برشی شفت روندی کاهشی پیدا می‌کند.
- ۶- با توجه به نمودارهای نسبت انعطاف‌پذیری، رفتار شفت آسانسور نسبت به خاک اطراف به مانند یک جسم صلب می‌باشد.
- ۷- از بین روابط فشار دینامیکی زمین رابطه‌ی وود مربوط به تخمین مقدار بار زلزله در سازه‌ی دیوار حائل از لحاظ مقداری بیشترین مطابقت را با روش هشاش مربوط به تخمین مقدار بار زلزله در سازه‌های زیرزمینی دارا بوده و مناسبترین رابطه‌ی فشاردینامیکی از لحاظ مقداری می‌باشد.
- ۸- با توجه به اینکه رابطه‌ی وود نسبت به روش هشاش لنگرهای خمشی و نیروهای محوری به وجود آمده در شفت تحت ترکیب‌های بارگذاری پیشنهاد شده توسط هشاش را به طور متوسط ۲٪ کمتر تخمین می‌زند و دارای مطابقت خوب با رابطه‌ی هشاش می‌باشد. بنابراین استفاده از این رابطه در تخمین مقدار بار زلزله‌ی وارد بر شفت آسانسور توصیه می‌شود.

۷- فهرست نمادها

سیاهه نمادهای مورد استفاده در این پژوهش مطابق جدول ۶، می‌باشد.

جدول ۶- سیاهه نمادها

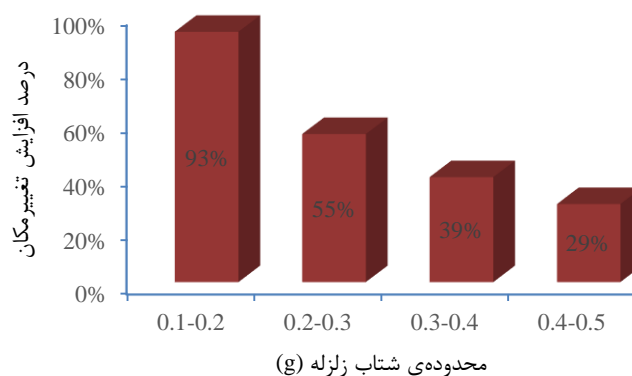
شرح	واحد	نماد
شتاب حداکثر زلزله	g	PGA
مدول الاستیسیته	MPa	E
ضریب پواسون	-	ν
مدول برشی اولیه‌ی خاک	MPa	G_0
سرعت انتشار موج برشی در خاک	$\frac{m}{s}$	V_s
چگالی	$\frac{kg}{m^3}$	ρ
مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن	MPa	f'_c
تغییرمکان زمین آزاد	m	Δ_{f-f}
ارتفاع خاک	m	H
کرنش برشی ماکزیمم	-	γ_{max}
سرعت انتشار موج برشی در خاک	$\frac{cm}{s}$	PGV
سرعت موج برشی اصلاح شده‌ی لایه‌های خاک	$\frac{m}{s}$	V_{se}
ضریب تصحیح مدول برشی خاک	-	m
ضریب تصحیح تغییرمکان کرنش برشی حفره	-	α
تغییرمکان حفره	m	γ_h
ارتفاع شفت آسانسور	m	Δ_h
نسبت اعوجاج	-	h
کرنش برشی شفت آسانسور	-	R
تغییرمکان شفت آسانسور	m	γ_s
نسبت انعطاف‌پذیری	-	Δ_s
سختی اعوجاج	$\frac{N}{m^2}$	F
تغییر مکان ناشی از نیروی ا نیوتن بر متر	m	K
مقدار بار زلزله	$\frac{N}{m}$	Δ_1
اضافه فشار دینامیکی خاک	$\frac{m}{N}$	P
وزن مخصوص خاک	$\frac{kg}{m^3}$	ΔP_{eq}
		γ

ادامه جدول ۶- سیاهه نمادها			ادامه جدول ۶- سیاهه نمادها		
شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
تنش افقی وارد بر دیوار حائل	$\frac{kN}{m^2}$	σ_h	ضریب فشار خاک در حالت عادی	-	k_a
فشار جانبی خاک در حالت سکون	-	k_0	مولفه افقی شتاب زلزله	-	k_h
			ضریب بدون بعد رانش دینامیکی	-	F_p
			شتاب حداکثر زمین با اعمال ضریب کاهش مربوط به عمق	-	A
			زاویه اصطکاک داخلی خاک	درجه	ϕ
			ضریب مدول بستر	$\frac{MPa}{m}$	k_s
			مدول الاستیسیته‌ی خاک	MPa	E_s
			عرض پی	m	B
			ضریب پواسون خاک	-	ν_s
			الگوی بار مرده	-	D
			الگوی بار فشار جانبی خاک	-	E_1
			الگوی بار زنده	-	L_s
			الگوی بار زلزله	-	EQ
			تنش افقی وارد بر دیوار حائل	$\frac{kN}{m^2}$	σ_h

۸- پیوست

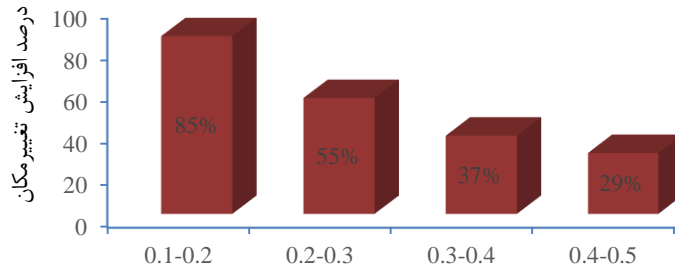
این مقاله از نتایج یک پایان نامه استخراج گردیده است بنابراین برای مشاهده‌ی نتایج بیشتر پیشنهاد می‌شود به پایان‌نامه‌ی مذکور مراجعه شود (Farshidi, 2023). با این حال در این قسمت به تعدادی از این داده‌ها و نتایج اشاره می‌شود. شکل ۱۵ و شکل ۱۶، نمودارهای افزایش مقدار تغییرمکان در اثر افزایش شتاب زلزله را برای نمونه‌های S2 و S3 را نمایش می‌دهد.

شکل ۱۷ و شکل ۱۸، نیز نمودارهای مقایسه‌ی مقدار بارزلزله‌ی محاسبه شده برای شفت آسانسور با روش‌های مختلف برای نمونه‌های S2 و S3 را نشان می‌دهد. شکل ۱۹، شکل ۲۰ و شکل ۲۱، به ترتیب نمودار اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری را برای دیواره‌های A, B, C و D نمونه‌ی S1 مدل شده در نرم‌افزار SAP2000 را نمایش می‌دهند.



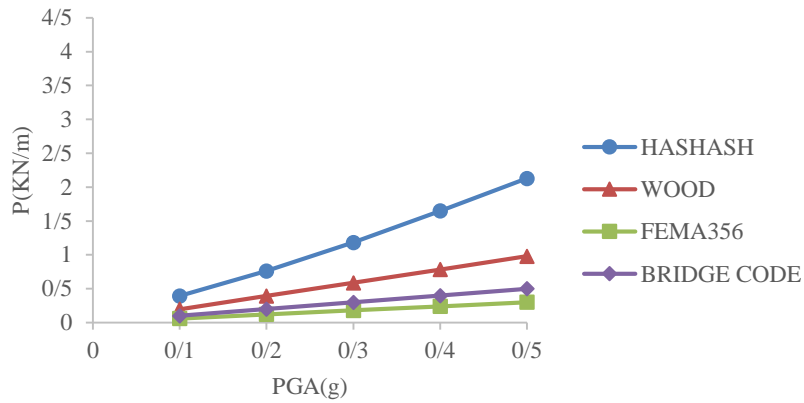
شکل ۱۵- درصد افزایش تغییرمکان در اثر افزایش شتاب زلزله برای نمونه‌ی S2 (Farshidi, 2023)

تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با روش شبه استاتیکی، آرمان فرشیدی و ...، ص ۱۶۹-۱۹۲

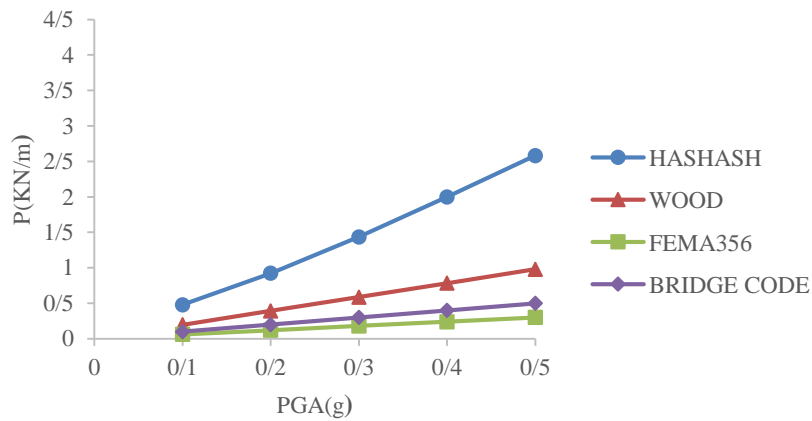


محدوده‌ی شتاب زلزله (g)

شکل ۱۶- درصد افزایش تغییر مکان در اثر افزایش شتاب زلزله برای نمونه‌ی S3 (Farshidi, 2023)

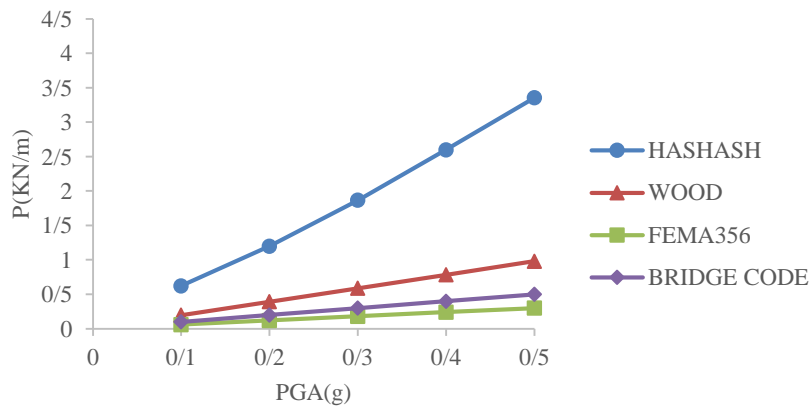


الف- نمونه S2-1



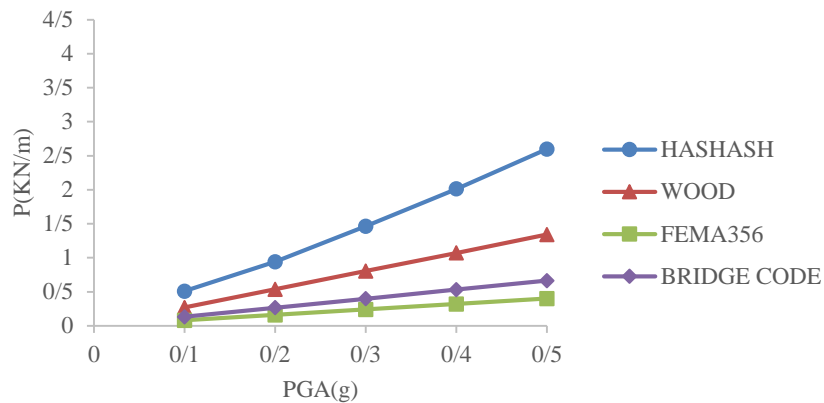
ب- نمونه S2-2

شکل ۱۷- نمودار مقایسه‌ی بار زلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S2 (Farshidi, 2023)

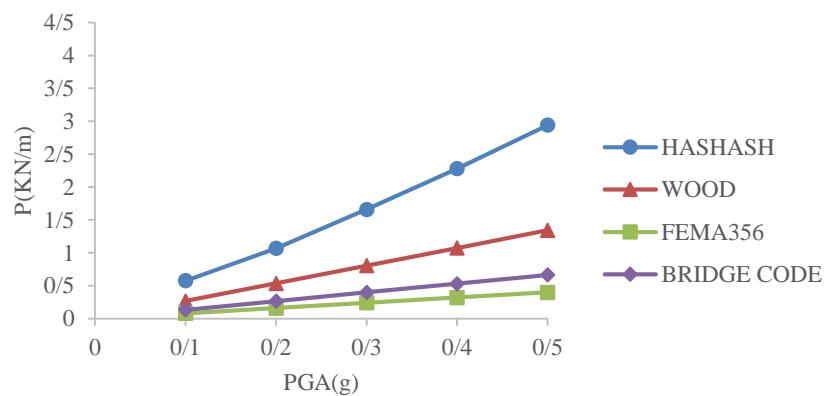


پ- نمونه S2-3

ادامه شکل ۱۷- نمودار مقایسه‌ی بارزلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S2 (Farshidi, 2023)



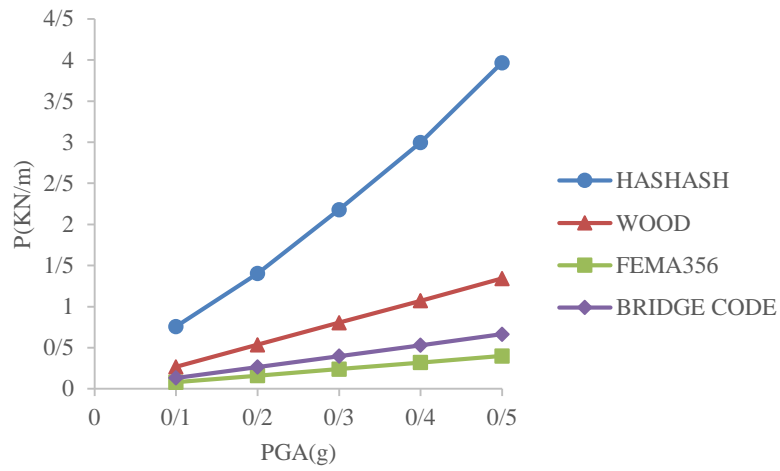
الف- نمونه S3-1



ب- نمونه S3-2

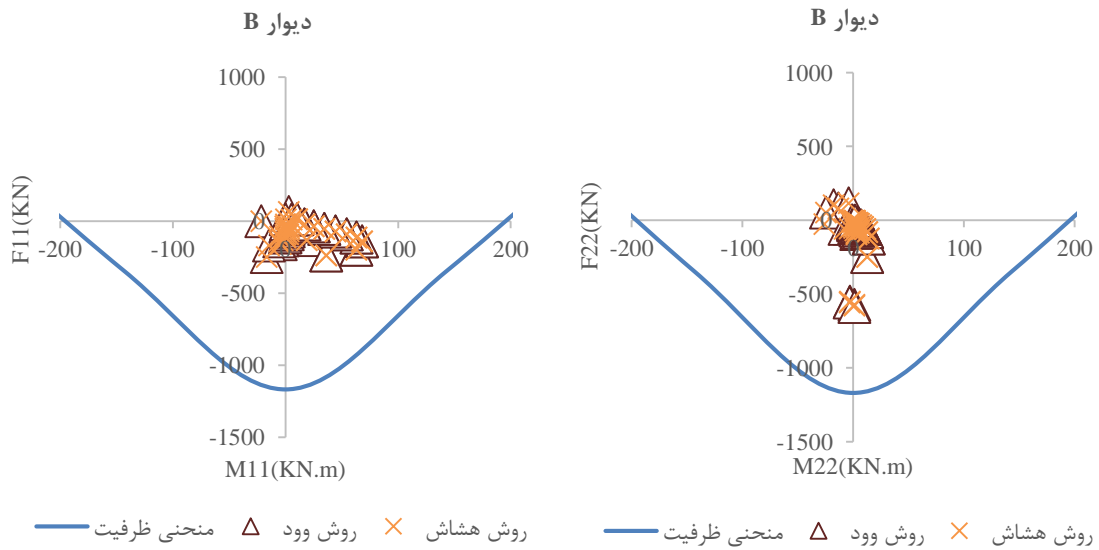
شکل ۱۸- نمودار مقایسه‌ی بارزلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S3 (Farshidi, 2023)

تحلیل لرزه‌ای شفت آسانسور ایستگاه مترو با روش شبه استاتیکی، آرمان فرشیدی و ...، ص ۱۶۹-۱۹۲

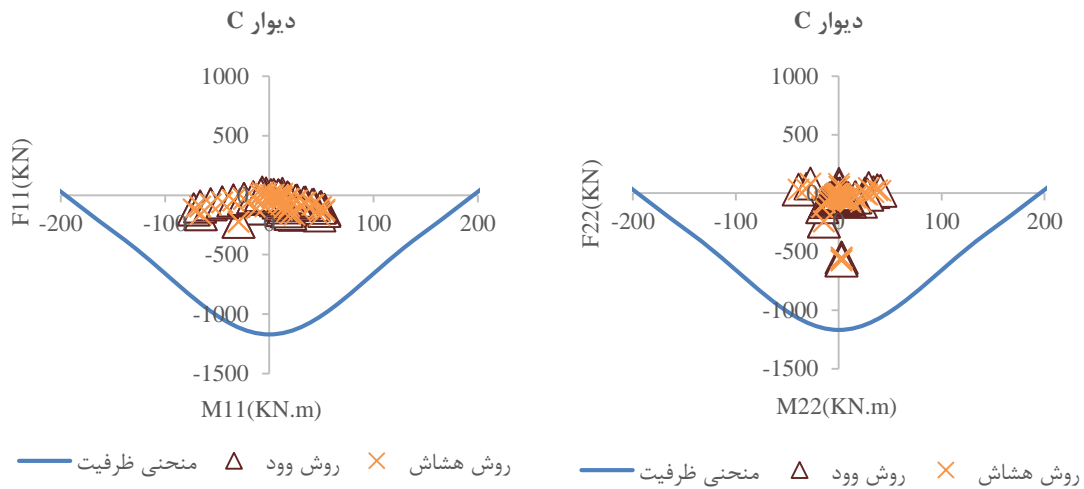


پ- نمونه S3-3

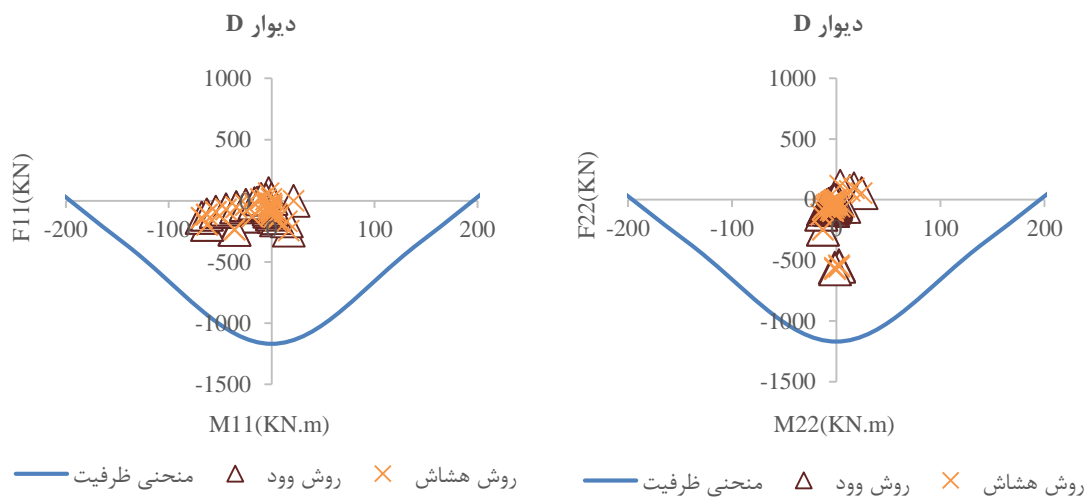
ادامه شکل ۱۸- نمودار مقایسه‌ی بارزلزله‌ی محاسبه شده با روش‌های مختلف برای نمونه‌ی S3 (Farshidi, 2023)



شکل ۱۹- نمودار اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری نمونه‌ی S1 دیوار B (Farshidi, 2023)



شکل ۲۰- نمودار اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری نمونه‌ی S1 دیوار C (Farshidi, 2023)



شکل ۲۱- نمودار اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری نمونه‌ی S1 دیوار D (Farshidi, 2023)

۹- مراجع

- Abate, G., Corsico, S., & Massimino, M. R. (2016). FEM modelling of the seismic behavior of a tunnel-soil-aboveground building system: a case history in Catania (Italy). *Procedia Engineering*, 158, 380-385.
- An, J., Tao, L., Jiang, L., & Yan, H. (2021). A shaking table-based experimental study of seismic response of shield-enlarge-dig type's underground subway station in liquefiable ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, 106621.
- Anderson, D. G. (2008). Seismic analysis and design of retaining walls, buried structures, slopes, and embankments (Vol. 611): *Transportation Research Board*.

- Chen, Z., Chen, W., & Fan, H. (2015). Seismic earth pressure on a multi-story underground structure. *Paper presented at the The 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015)*.
- Chen, Z., & Jia, P. (2019). Three-dimensional analysis of effects of ground loss on static and seismic response of shafts. *Tunnelling and underground space technology*, 92, 103067.
- Chen, Z., & Zhang, B. (2018). Seismic responses of the large-scale deep shaft in Shanghai soft soils. *Paper presented at the GeoShanghai International Conference*.
- code360. (2006). Instructions for improving the vibrations of existing buildings 360 publication., *code360*.
- Dowding, C. H., & Rozan, A. (1978). Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(2), 175-191.
- Duran, F., Kiyono, J., Tsunei, T., & Maruo, Y. (2012). Seismic response analysis of a shield tunnel connected to a vertical shaft. *Paper presented at the Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Eslamishahrbabak, T. (2012). Investigating the effect of depth, shape and proximity of foundations on the reaction coefficient of the bed , *Mater's Thesis, Khaje nasir toosi university*.
- Farshidi, A. (2023). Seismic analysis of side structure shafts of subway stations, *Mater's Thesis. Shahrood university of technology*.
- FEMA356. (2000). commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356). *Washington, DC: Federal Emergency Management Agency*.
- Golshani, A., & Rezaeibadashiani, M. (2020). A numerical study on parameters affecting seismic behavior of cut and cover tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2), 2039-2060.
- Hashash, Y. M., Hook ,J. J., Schmidt, B., John, I., & Yao, C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 247-293.
- Keykhosropour, L., & Lemnitzer, A. (2022). Seismic response behavior of deep flexible underground structures in sand-insights from an experimental–numerical investigation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 5205-5231.
- Liang, J., Xu, A., Ba, Z., Chen, R., Zhang, W., & Liu, M. (2021). Shaking table test and numerical simulation on ultra-large diameter shield tunnel passing through soft-hard stratum. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, 106790.
- Owen, G. N., & Scholl, R. E. (1981). *Earthquake engineering of large underground structures*.
- Rule308. (2017). Guide to the design of retaining walls, *rule 308*.
- Tsinidis, G., de Silva, F., Anastasopoulos, I., Bilotta, E., Bobet, A., Hashash, Y. M., . . . Madabhushi, G. (2020). Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis. *Tunnelling and underground space technology*.

- Tsinidis, G., Pitilakis, K., Heron, C., & Madabhushi, G. (2013). Experimental and numerical investigation of the seismic behavior of rectangular tunnels in soft soils. *COMPDYN*.
- Tsinidis, G., Rovithis, E., Pitilakis, K., & Chazelas, J. L. (2016). Seismic response of box-type tunnels in soft soil: experimental and numerical investigation. *Tunnelling and underground space technology*, 59, 199-214.
- Wang, J., Guo, T., & Du, Z. (2022). Experimental and numerical study on the influence of dynamic structure-soil-structure interaction on the responses of two adjacent idealized structural systems. *Journal of Building Engineering*, 52, 104454.
- Wang, J., & Munfakh, G. (2001). *Seismic design of tunnels* (Vol. 57): WIT Press.
- Yue, F., Liu, B., Zhu, B., Jiang, X., Chen, L., & Liao, K. (2021). Shaking table test and numerical simulation on seismic performance of prefabricated corrugated steel utility tunnels on liquefiable ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106527.
- Zafari, P. (2012). Investigating the effect of the end wall of subway stations against the shear deformation of the soil caused by the earthquake, *Master's thesis, Kharazmi university*.
- Zhang, B., & Chen, Z. (2019). Effects of nominal flexibility ratio and shaft dimensionless parameters on the seismic response characteristics of deep shafts. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 257-261.
- Zhang, J., Yuan, Y., Bao, Z., Yu, H., & Bilotta, E. (2020). Shaking table tests on shaft-tunnel junction under longitudinal excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, 106055.
- Zhang, J., Yuan, Y., Bilotta, E., & Yu, H. (2020). Analytical solutions for seismic responses of shaft-tunnel junction under longitudinal excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Zhang, J., Yuan, Y., Bilotta, E., Zhang, B., & Yu, H. (2019). Analytical solution for dynamic responses of the vertical shaft in a shaft-tunnel junction under transverse loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105779.

Seismic analysis of subway station elevator shaft by quasi-static method

A. Farshidi¹, M. Jalali^{2*}

1- MSc graduated of Civil Engineering; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, farshidi.arman73@gmail.com

2- Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering., Shahrood University of Technology, mjalali.shahroodut.ac.ir

Received: 7 Mar 2023; Accepted: 15 Aug 2024

DOI: 10.22044/tuse.2024.12813.1474

Keywords

Seismic analysis
Subway station
Elevator shaft
Hashash method
Wood relationship

Extended Abstract

Summary

To estimate the earthquake load in underground structures, subway designers use the relationships related to surface-mine structures such as retaining walls and bridges, which are considered somewhat conservative due to different behavior of surface-mine and underground structures against earthquakes. Therefore, in this research, 9 examples of elevator shafts were three-dimensionally modeled using ABAQUS software and analyzed by quasi-static method related to the numerical analysis of underground structures. Then, the effectiveness of conservative relationships related to above-ground structures was investigated by modeling, loading and analyzing samples in SAP2000 software. The results of this research show that the behavior of the elevator shaft of the subway station during an earthquake is like a rigid body. Moreover, the comparison of the results of modeling and analysis of the elevator shaft in SAP2000 software shows that Wood's relationship as a suitable relationship can be used with an average error of about 2% to predict the bending anchors and axial forces generated in the elevator shaft of the metro station. Therefore, it is recommended to use this relationship to estimate the amount of earthquake load in the elevator shaft of the metro station.

Introduction

In the past, seismic analysis of underground structures was given less attention by researchers due to the empirical belief that underground structures are safer than above-ground structures against earthquakes. However, following the Kobe earthquake in 1995 in Japan, extensive damages resulting from this earthquake in metro stations occurred that caused to increase researchers' interest in the topic. The importance of this issue in Iran was doubled due to the high seismicity of this country. Basically, researchers use several major methods for seismic analysis of underground structures. In the first method, known as the experimental method, researchers consider earthquakes occurred in the past to study the types of damages to underground structures due to earthquakes and the factors caused these damages. Dowding and Rozen (1978) and Owen and Scholl (1981) are among the researchers who have used this method for seismic analysis of underground structures. In the second method, known as the laboratory method, researchers try to simulate the behavior of underground structures against earthquake waves by using physical modeling of underground structures and the surrounding soil on a smaller scale in the laboratory environment. Among the researchers who have used this method for seismic analysis of underground structures, we can mention Thindisi et al. (2013), Chen et al. (2015), Zhang et al. (2020), Liang et al. (2021), An et al. (2021), Yue et al. (2021) and Wang et al. (2022). The next method that researchers use for seismic analysis of underground structure is the closed form elastic solutions. In this method, based on the theory of wave propagation in homogeneous, isotropic and elastic soil

layers, researchers provide mathematical relationships for calculating the seismic responses of underground

structures, including bending moment, axial force, shear force, displacement and strains generated in the structures due

to an earthquake. Among the most famous of these relationships, we can mention the relations given by Wang and Penzien (Hashash, et al., 2001).

Another method that researchers use for seismic analysis of underground structures is the analytical method. In this method, researchers provide dynamic relationships to investigate seismic responses of underground structures. Zhang et al. (2019) and Zhang et al. (2020) are among the researchers who have used the analytical method for seismic analysis of underground structures.

Dynamic earth pressure method is another method that researchers use for seismic analysis of underground structures. In this method, the researchers consider the earthquake load on the structure as a result of the weight of the soil around the structure and propose relationships to calculate the amount of earthquake load. This method is mostly used to estimate the earthquake load on the above ground structures such as retaining walls and bridges, but researchers conservatively use these relationships to estimate the amount of earthquake load on underground structures as well (Hashash, et al, 2001).

Another important method that researchers use for seismic analysis of the metro station is the numerical method. In this method, researchers investigate the seismic responses of underground structures by using modeling and analysis of underground structures in software based on finite element and finite difference techniques. The numerical method is divided into two separate methods, quasi-static method and dynamic time history method, based on the way of defining and applying earthquake to the underground structure. The basis of quasi-static method is based on Hashash's assumptions and the application of the shear deformation expected by the earthquake to the soil-structure mass to determine the internal forces created in the structure due to the earthquake, taking into account the interaction between the soil and the structure (Hashash, et al., 2001). However, in the dynamic method, which is the most accurate method of analyzing underground structures, the underground structure is placed under the dynamic movements of the time history at the lower level of the soil-structure interaction system (Hashash, et al, 2001). Duran et al. (2012), Abate et al. (2016), Chen and Zhang (2018), Zhang and Chen (2019), Chen and Jia (2019), Golshani and Rezabadashiani (2020), and Keykhosropour and Lemnitzer (2022) are among the researchers who have used the numerical method for the seismic analysis of underground structures.

In general, shafts, having significant dimensions, are deep structures that start from the surface of the ground and continue to some depths. They enable quick access to the basement, and usually in subway stations, they are side structures connected to the subway station with the serviceability of the elevator shaft (vertical shaft). The serviceability of stepped shafts (inclined shafts) is represented by a rectangular section. Usually, subway designers in our country conservatively use the dynamic earth pressure relationships related to the above ground structures such as retaining walls and bridges to estimate the earthquake load in the subway station and the side structures connected to it. Therefore, the purpose of this research is to analyze the seismicity of the elevator shaft of the metro station using the Hashash's method, and also, to investigate the feasibility of using the dynamic earth pressure relations to estimate the amount of earthquake load on the elevator shaft of the metro station.

Methodology and Approaches

In this research, to investigate the seismic behavior of vertical shafts, 9 samples of elevator shafts were modeled in ABAQUSv6.14-2 software and using quasi-static analysis (Hashash's method), the effect of earthquake acceleration, shaft depth and shaft thickness on the displacement of vertical shafts were investigated. Moreover, the behavior of the elevator shaft with respect to the surrounding soil was also investigated against earthquakes. In order to check the feasibility of using dynamic earth pressure relationships to estimate the earthquake load, first the earthquake load values were calculated and

with the results of Hashash's method and the dynamic earth pressure relationships, and consequently, the most suitable relationship for estimating the earthquake load was extracted. Then, in order to check the effectiveness of this relationship, the samples, subjected to the loading recommended by Hashash for underground structures, were modeled in SAP2000v18.2.2 software.

Results and Conclusions

This research has been carried out with the aim of seismic analysis of the elevator shaft of the metro station, and also, the feasibility of using the dynamic earth pressure relationships to estimate the earthquake load on the elevator shaft. The most important results of this research are as follows:

1. As the acceleration of the earthquake increases, the displacement of the shaft increases, and this increase of the displacement decreases with the increase of the acceleration of the earthquake due to the reduction of the displacement correction factor caused by the increase of the acceleration of the earthquake.
 2. Increasing the depth of the shaft in constant earthquake acceleration increases the displacement of the elevator shaft due to the reduction of the stiffness of the structure, so that for every 5-meter increase in the height of the shaft, the displacement of the shaft increases by 54% on average.
 3. The thickness of the shaft has no effect on the displacement of the elevator shaft against earthquakes.
 4. The value of the flexibility ratio parameter increases with the increase in the height of the shaft due to the increase in the displacement of the shaft, and consequently, the increase in the distortion ratio.
 5. As the acceleration of the earthquake increases, the value of the flexibility ratio tends to decrease due to the higher growth rate of the soil shear strain compared to the shaft shear strain.
 6. According to the graphs of the flexibility ratio, the behavior of the elevator shaft is like a rigid object in relation to the surrounding soil.
 7. Among the dynamic earth pressure relationships, Wood's relationship that estimates the amount of earthquake load in the retaining wall structure is quantitatively the most compatible with Hashash's method for the estimation of the amount of earthquake load in underground structures, and it is the most optimal dynamic pressure relationship in terms of quantity.
 8. Considering that Wood's relationship underestimates the bending moments and axial forces generated in the shaft under the loading combinations suggested by 2% on average compared to Hashash's method, it has a good agreement with Hashash's relationship. Therefore, it is recommended to use this relationship in estimating the amount of earthquake load on the elevator shaft.
-