

تأثیر حفاری تونل شهری موردی تهران بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه موجود با لحاظ اندرکنش خاک و سازه

مهدی فرج محمدیه^{۱*}، فرهاد بهنام‌فر^۲، سید جاهد محمدی^۱

^۱ دانشجوی دکتری عمران - زلزله، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز، ایران.
^۲ دانشجوی دکتری عمران - سازه، دانشگاه زنجان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

تونل شهری
حفاری
سازه نگهدار
تحلیل دینامیکی
نشست

خلاصه: حفاری تونل‌ها می‌تواند باعث حرکت زمین شوند که این حرکت‌ها در پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها قابل توجه می‌باشند. در این پژوهش بررسی تأثیر حفاری تونل شهری موردی تهران بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه در سه بخش انجام شده است. در بخش اول در نرم‌افزار PLAXIS نشست زیر پی در دو مرحله ی قبل و بعد از حفاری محاسبه شده است. بخش دوم نیز در PLAXIS تحلیل دینامیکی برای هر دو مرحله انجام گرفته و پاسخ شتاب در زیر پی محاسبه شده که هدف از این بخش دوم، بررسی تأثیر حفاری بر پاسخ شتاب و استفاده از آن در نرم‌افزار SAP-2000 به عنوان ورودی جهت تحلیل سازه می‌باشد. در بخش سوم سازه در نرم‌افزار SAP-2000 مدل‌سازی شده و نتایج جابه‌جاییهای بخش اول به پی اعمال و با استفاده از پاسخ شتاب (خروجی PLAXIS) تحلیل دینامیکی غیرخطی زمانی سازه در دو مرحله انجام گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در اثر حفاری تونل، نشست زیر پی سازه افزایش یافته است و بیشترین نشست ایجاد شده در اثر حفاری در مدل ۶ (مرحله بهره‌برداری) می‌باشد که متوسط ۱/۲ برابر، نشست نسبت به مرحله ی قبل از حفاری افزایش یافته است. تأثیر سازه‌های نگهدار در مراحل اجرا نسبت به مرحله بهره‌برداری که در آن دیوارهای کناری بتنی اجرا می‌شود، در کاهش نشست ۴ درصد مؤثر بوده و حداکثر شتاب زیر پی ۱/۵ برابر افزایش گردیده و در سازه نیز جابه‌جایی ۱/۲۵ برابر نسبت به پاسخ مرحله ی قبل از حفاری افزایش یافته است.

۱- مقدمه

زیرزمینی، همگی از عواملی هستند که بر نشست سطح زمین و سازه‌ها تأثیر دارند. تونلسازی باعث ایجاد تغییر در پاسخ دینامیکی و استاتیکی در ساختمانهای موجود شده است. از این‌رو، بررسی و برآورد اثر حفاری تونلسازی به سازه‌های مجاور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و لازم است که مهندسیین طراحی و ساخت تونل میزان تغییرات پاسخ سازه‌ها در اثر حفاری را تخمین زده و مشخص کنند که آیا این ساختمانها تحت تأثیر این حفاریها آسیب خواهند دید یا خیر [۲ و ۳]. فعالیت‌های انجام شده در این زمینه مربوط به تحقیقات دیموک میباشد که مطالعات فراوانی در مورد نشست ناشی از تونلسازی در محیط شهری و عوامل مؤثر بر آن انجام داده است [۴]. وانگ در سال ۱۹۹۳ روابطی را برای تعیین نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل در هنگام زلزله ارائه کرده است [۵]. هشاش در سال ۲۰۰۱ با تکمیل

به دلیل افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی و حفاری تونلهای حمل و نقل شهری برای تأمین زیرساخت‌ها امری اجتناب ناپذیر شده است. بطور کلی حفاری تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌های از خاک و سنگ در محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش محیط اطراف و پاسخ دینامیکی و استاتیکی سازه‌های مجاور میشود [۱]. عوامل متعددی بر جابه‌جاییهای زمین، در اثر ساخت تونل تأثیرگذارند که شامل شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، روش تونلسازی، وجود یا عدم وجود ساختمانهای سطحی یا زیرسطحی، الگوی ترتیب مراحل حفاری در روشهای ساخت، هندسه و عمق تونل، عوامل اجرایی و شرایط آب

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mehdifaraj66@yahoo.com



روابط وانگ با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، روشی کاربردی برای تحلیل و طراحی لرزه‌های تونلها و سازه‌های زیرزمینی ارائه نموده است [۶]. اساس کار این دو محقق به این صورت بوده است که بدون نیاز به مدل‌سازی خاک، سازه‌ی تونل به تنهایی مورد ارزیابی لرزه‌های قرار گیرد و اثرات اندرکنش خاک و سازه با توجه به نوع خاک، بزرگی زلزله، ارتفاع روباره، فاصله‌ی منبع زلزله از سایت، تغییرشکل میدان آزاد تونل لحاظ شود. مارینلا و همکاران در سال ۲۰۱۹ مقاومت‌سازی تونل موردی را با پوشش بتن انجام دادند که در دو لایه ۳۰ و ۴۰ میلی‌متری تقویت نمودند که لایه اول در اثر بار تأثیر قابل توجهی نداشت، ولی لایه دوم در مقاومت‌سازی مؤثر بوده است [۷]. مارتینو گاتیا و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک تونل موردی را با مقاومت‌سازی ملات رو-نوپلاستیک و یک لایه روکش فولادی گالوانیزه استفاده نمودند که در مقاومت‌سازی ترک‌های ایجاد شده استفاده شد [۸]. کاستالدو و همکاران در سال ۲۰۱۴ به کمک انجام مطالعه موردی ایستگاه مترو که در مرکز شهر ناپل ایتالیا می‌باشد به بررسی تأثیر حفاری عمیق بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان موجود بتنی مسلح پرداختند [۹]. آن‌ها مدل خاک را به کمک نرم‌افزار ژئوتکنیک PLAXIS با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، بارهای مرده و زنده، شرایط مرزی و اندرکنش خاک و سازه مدل‌سازی نمودند. در بخش اول با انجام تحلیل استاتیکی جابه‌جایی‌های زیر پی ساختمان در دو مرحله‌ی قبل و بعد از حفاری محاسبه شده و در بخش دوم نیز در نرم‌افزار PLAXIS با استفاده از شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه Irpina، تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در دو مرحله انجام داده و پاسخ شتاب را در زیر پی سازه محاسبه نمودند. در بخش سوم با استفاده از SAP ۲۰۰۰ جابه‌جایی‌های به دست آمده از بخش اول را به صورت جداگانه برای هر دو مرحله به تکیه‌گاه سازه اعمال کرده و با استفاده از پاسخ شتاب زیر پی، تحلیل دینامیکی غیرخطی زمانی سازه را انجام داده و با مقایسه دریافت طبقاتی هر دو مرحله و استفاده از شاخص پارک‌آنگ خرابی سازه را تشخیص دادند. نتایج تحقیق نشانگر آن بود که تحت حفاری عمیق تغییرات قابل توجهی در خطرپذیری لرزه‌ای رخ داده و دوران پلاستیک تیرها تا ۲۸ درصد و همچنین دریافت طبقاتی نیز افزایش یافته است. در این پژوهش نیز برای ارزیابی تأثیر حفاری تونل شهری بر روی پاسخ دینامیکی و استاتیکی سازه موجود، تحلیل‌های لازم در سه بخش و با استفاده از دو نرم‌افزار PLAXIS و

SAP ۲۰۰۰ انجام شده است. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی خاک از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده که به دلیل عدم قابلیت آن در تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ای از نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی کمک گرفته شده که انجام کار به صورت مرحله‌ای بوده است.

ابتدا در نرم‌افزار PLAXIS با انجام تحلیل استاتیکی نشست زیر پی ساختمان موجود تحت بار مرده و زنده در دو مرحله‌ی قبل و بعد از حفاری تونل محاسبه شده است. در مرحله بعد از حفاری محاسبه نشست پی در اثر حفاری در دو قسمت بررسی شده است. در قسمت اول هم زمان با اجرای حفاری که شامل ۶ فاز اجرایی می‌باشد که در تمامی فازها نشست ساختمان محاسبه شده است. در فاز اول و دوم ساختمان فعال شده در فاز سوم حفاری و اجرای شمع‌ها و بتن ریزی بالای تونل انجام شده است. فاز چهارم حفاری تا تراز ۲۲- متری انجام و سازه‌ی نگهدارنده تونل فعال شده و بتن ریزی اطراف حفاری انجام شده است. فاز پنجم حفاری تا ارتفاع ۲۸- متری اجرا و سازه‌ی نگهدارنده، فعال و بتن‌ریزی اطراف حفاری انجام شده است. فاز ششم حفاری سکوه‌های کناری و اجرای المان Anchor و فاز هفتم که مرحله بعد از اجرا می‌باشد (مرحله بهره‌برداری)، سازه‌های نگهدارنده حذف شده و نشست سازه محاسبه شده است. در بخش دوم در نرم‌افزار PLAXIS نیز با استفاده از رکورد مورد نظر تحلیل دینامیکی برای هر دو مرحله انجام گرفته و پاسخ شتاب در زیر پی ساختمان موجود محاسبه شده است. هدف از این بخش بررسی تأثیر حفاری تونل بر پاسخ شتاب و استفاده از آن در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ به عنوان ورودی جهت تحلیل سازه می‌باشد. در بخش سوم سازه در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ مدل‌سازی شده و نتایج جابه‌جایی‌هایی بخش اول به پی اعمال و با استفاده از پاسخ شتاب (خروجی PLAXIS) تحلیل دینامیکی غیرخطی زمانی سازه در دو مرحله انجام گرفته است. با توجه به اینکه اکثر محققین با تمرکز بر عواملی از قبیل نوع خاک، خصوصیات زمین‌شناسی، شرایط تنش اولیه، تأثیر آنیزوتروپی خاک، ضریب فشار جانبی در ارزیابی تأثیر حفاری تونل بر آسیب‌های وارده بر ساختمان تلاش نموده و کمتر به بررسی تأثیر وجود سازه‌های تونل و مراحل اجرا و عوامل مرتبط با آن بر نشست سازه پرداخته‌اند. لذا در این پژوهش مراحل اجرا و تأثیرات سازه‌های نگهدارنده حفاری در پاسخ دینامیکی و استاتیکی سازه موجود تأثیر داده شده و این نوآوری

پژوهش می‌باشد.

پاسخ سازه درست محاسبه شده است. پس از انجام صحت سنجی، در این پژوهش تأثیرات حفاری تونل شهری موردی شهر تهران بر پاسخ دینامیکی و استاتیکی ساختمان بالای آن بررسی شده است.

۲- درست‌آزمایی نرم‌افزار PLAXIS و SAP 2000

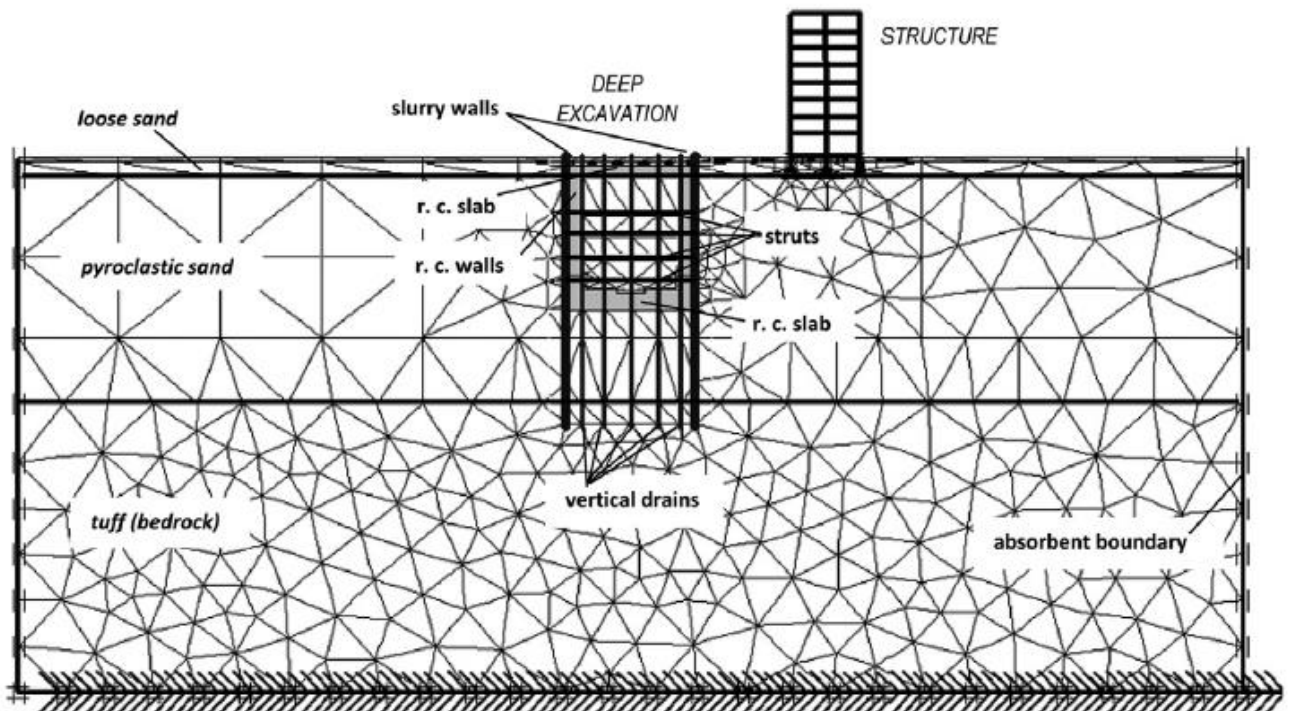
جهت درست‌آزمایی نرم‌افزارها، از مدل کاستالدو و همکاران استفاده شده که در سال ۲۰۱۴ آنها در مقاله خود به بررسی تأثیر حفاری ایستگاه مترو ناپلز ایتالیا به ساختمان مجاور که در ۱۶ متری حفاری واقع است، پرداختند [۹]. آنها با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS که یکی از نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد، سازه موجود و حفاری ایستگاه مترو را با سیستم سازه‌های نگهدارنده طبق شکل ۱ مدل‌سازی و تأثیر حفاری بر افزایش نشست و شتاب زیر پی سازه را محاسبه نمودند و در مرحله بعد، خروجی PLAXIS که نشست و شتاب زیر پی سازه می‌باشد، به نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ انتقال داده و پاسخ سازه را در اثر حفاری محاسبه کردند. در این پژوهش نیز ابتدا جهت صحت‌سنجی، تمامی مدل‌های کاستالدو طبق شکل ۲ در نرم‌افزار PLAXIS و SAP ۲۰۰۰ مدل‌سازی شده است. با توجه به اشکال ۴ تا ۶ و مقایسه آن با اشکال ۵ تا ۷ مشخص است که نتایج تحلیلها تطابق مناسبی با نتایج مدل کاستالدو دارد و میزان تأثیر حفاری در

۲-۱- مدل‌سازی در PLAXIS (درست‌آزمایی)

مدل کاستالدو در نرم‌افزار PLAXIS مطابق شکل ۲ به عمق ۱۰۰ و عرض ۲۲۰ متر در سه لایه با پارامترهای ژئوتکنیکی هر لایه مدل‌سازی شده است. در مدل، حفاری مستطیلی در طول، عرض و عمق به ترتیب ۸۵/۵، ۲۳/۶ و ۲۸ متر ایجاد شده و ساختمان بتنی موجود نیز به فاصله ۱۶/۵ متر از لبه حفاری قرار گرفته است. ساختمان موجود ۸ طبقه با دو دهانه که مشخصات مربوط به خاک و سازه شامل هندسه، مقطع عرضی تیرها و ستون‌ها، طبقات، نوع مصالح و بارها و مشخصات ژئوتکنیکی زمین شناسی در مرجع شماره ۹ ارائه شده است.

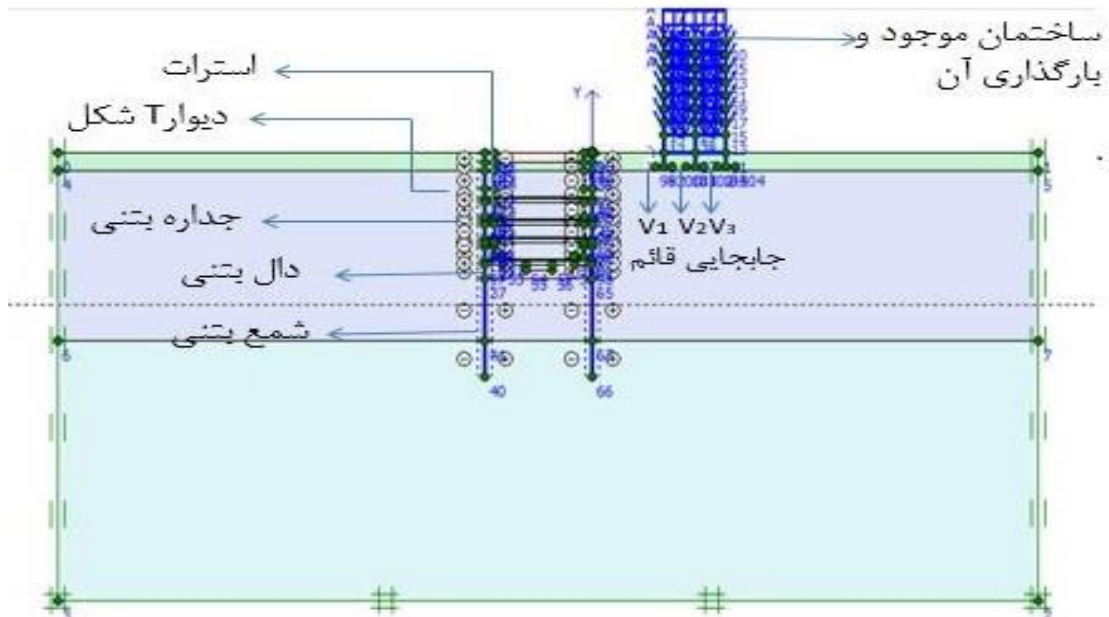
۲-۲- محاسبه تغییر مکان‌های زیر پی ساختمان موجود (درست‌آزمایی)

در این قسمت برای مرحله قبل و بعد از حفاری با انجام تحلیل



شکل ۱. مدل المان محدود حفاری و سازه موجود (مدل کاستالدو) [۹]

Fig. 1. Finite element model of Excavation and Existing structure (Castaldo model) [9]



شکل ۲. مدل سازی بعد از حفاری (PLAXIS)

Fig. 2. Modeling after excavation (PLAXIS)

جدول ۱. مقایسه نتایج قبل از حفاری (مدل کاستالدو و تحلیل در PLAXIS)

Table 1. Comparison of result before excavation (Castaldo model and anlysis in plaxis)

| نشست پی | V ₁ | V ₂ | V ₃ |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | cm | cm | cm |
| قبل از حفاری (تحلیل در PLAXIS) | ۲/۶۳ | ۲/۷ | ۲/۳۷ |
| قبل از حفاری (تحلیل کاستالدو) [۹] | ۲/۶ | ۲/۳ | ۲/۱ |

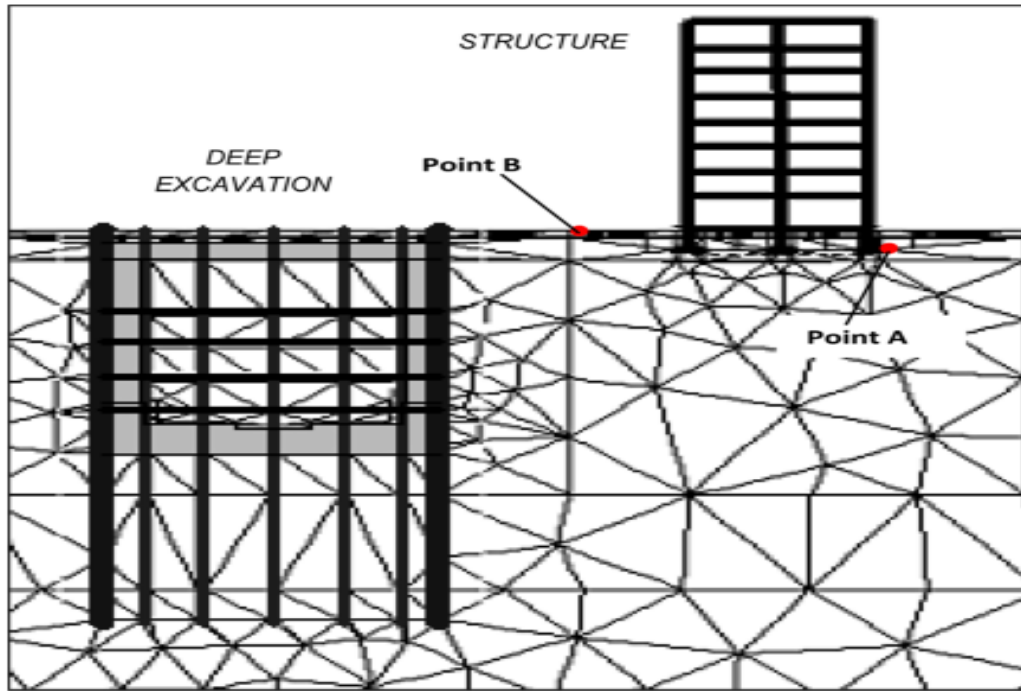
جدول ۲. مقایسه نتایج بعد از حفاری (مدل کاستالدو و تحلیل در PLAXIS)

Table 2. Comparison of results after Excavation (Castaldo model and analysis in plaxis)

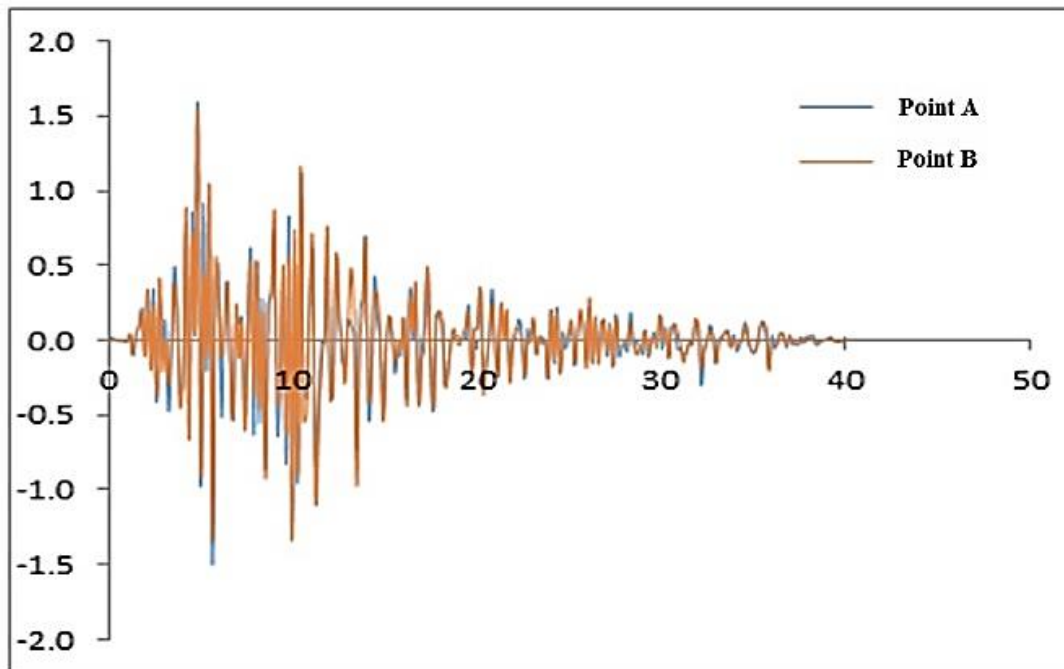
| نشست پی | V ₁ | V ₂ | V ₃ |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | cm | cm | cm |
| بعد از حفاری (تحلیل در PLAXIS) | ۶/۱۹ | ۵/۸ | ۵/۱۸ |
| بعد از حفاری (تحلیل کاستالدو) [۹] | ۶/۴ | ۵/۴ | ۵ |

موجود شده است. نتایج تحلیل و مقایسه آن با نتایج مدل کاستالدو در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. V₁، V₂ و V₃ محل دقیق جابه‌جایی قائم زیر پی هستند که در شکل ۲ نشان داده شده است. طبق جداول ۱ و ۲، جابه‌جایی قائم در

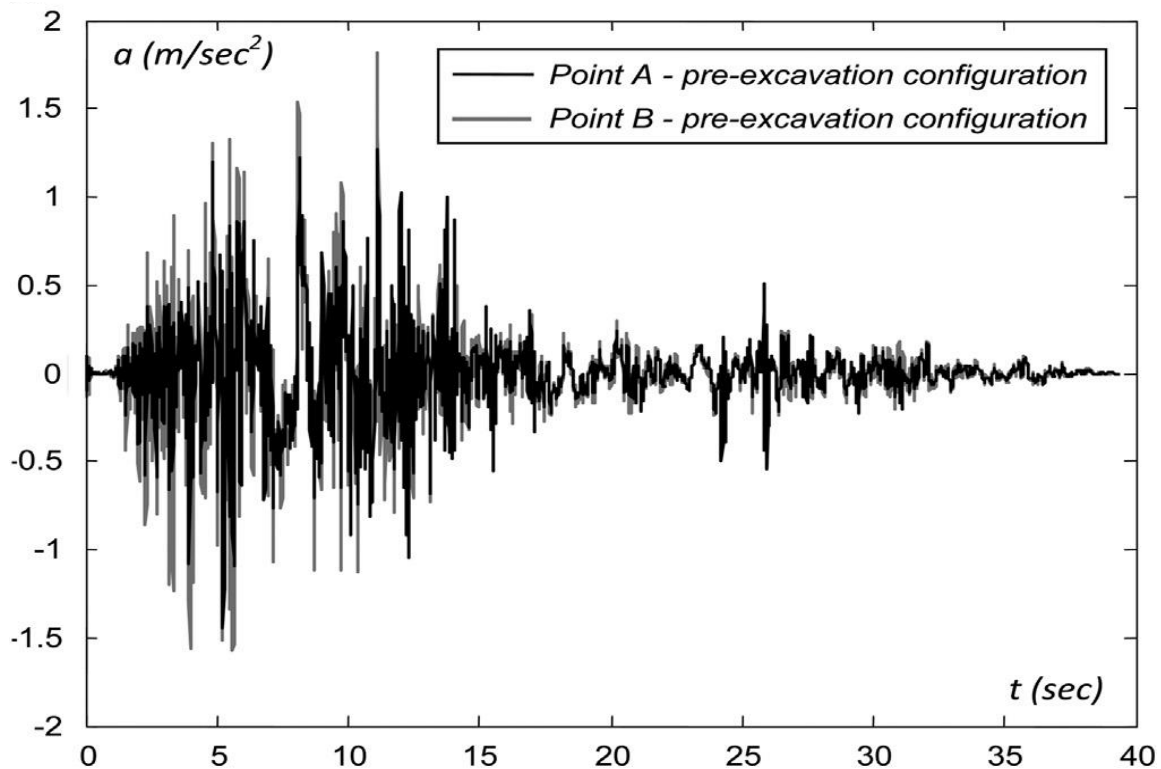
استاتیکی تحت بار مرده و زنده در نرم‌افزار PLAXIS طبق شکل ۲ با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه جابه‌جایی‌های قائم و افقی زیر پی ساختمان موجود محاسبه شده است. با توجه به نتیجه محاسبات، حفاری ایجاد شده باعث افزایش نشست زیر پی ساختمان



شکل ۳. مدل کاستالدو [۹]
Fig. 3. Castaldo model [9]



شکل ۴. پاسخ شتاب در زیر پی نقطه A و B (تحلیل در PLAXIS)
Fig. 4. Acceleration response under foundation at points A & B (analysis at PLAXIS)



شکل ۵. پاسخ شتاب در زیر پی نقطه A و B (مدل کاستالدو) [۹]

Fig. 5. Acceleration response under foundation at points A & B (Castaldo model) [9]

مرحله‌ی قبل و بعد از حفاری تطابق زیادی با نتایج مدل کاستالدو دارد و میزان تأثیر حفاری در افزایش جابه‌جایی قائم درست محاسبه شده است.

۲-۳- تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار PLAXIS (درست‌آزمایی)

جهت صحت‌سنجی تحلیل دینامیکی، با استفاده از شتاب‌نگاشت Irpinia Italy و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در دو مرحله‌ی قبل و بعد از حفاری تحلیل دینامیکی انجام شده و پاسخ شتاب طبق شکل ۴ در دو نقطه‌ی منتخب A و B شکل ۳ محاسبه و با نتایج شتاب دو نقطه تعیین شده در مدل کاستالدو شکل ۵، مقایسه شده که تطابق مناسبی با نتایج آن دارد و پاسخ شتاب دو نقطه با دقت خوبی به دست آمده است.

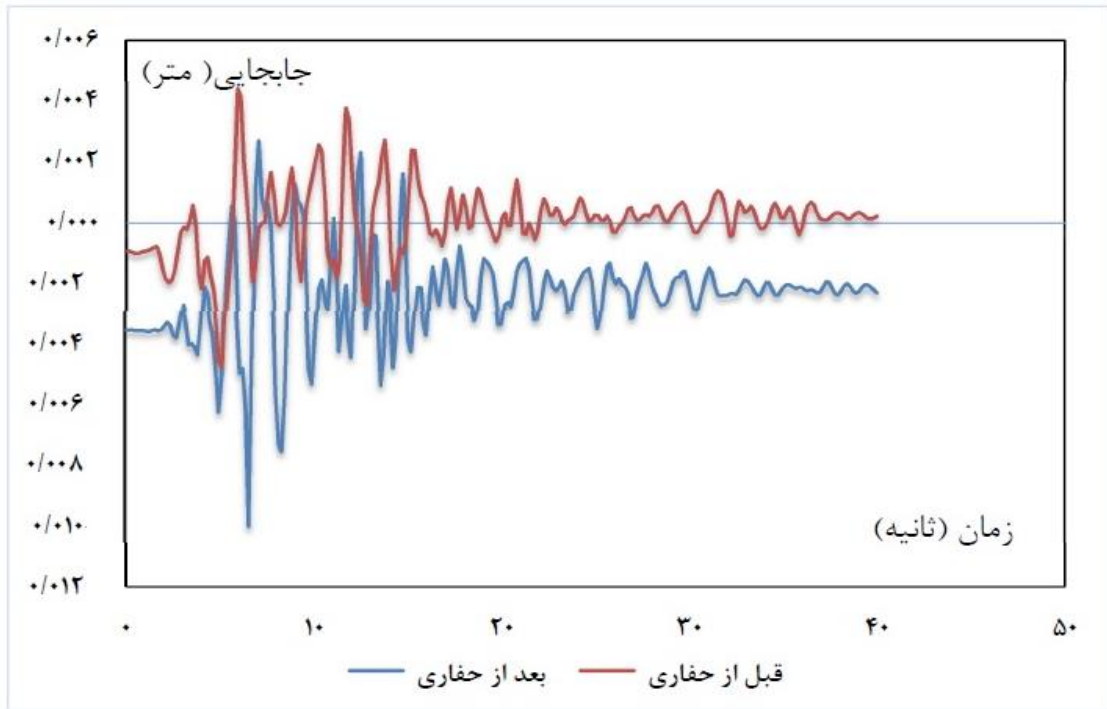
۲-۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی زمانی سازه (درست‌آزمایی)

در قسمت درست‌آزمایی سازه، جابه‌جایی‌های محاسبه شده‌ی پی و شتاب نقطه A و B برای هر دو مرحله قبل و بعد از حفاری به نرم‌افزار

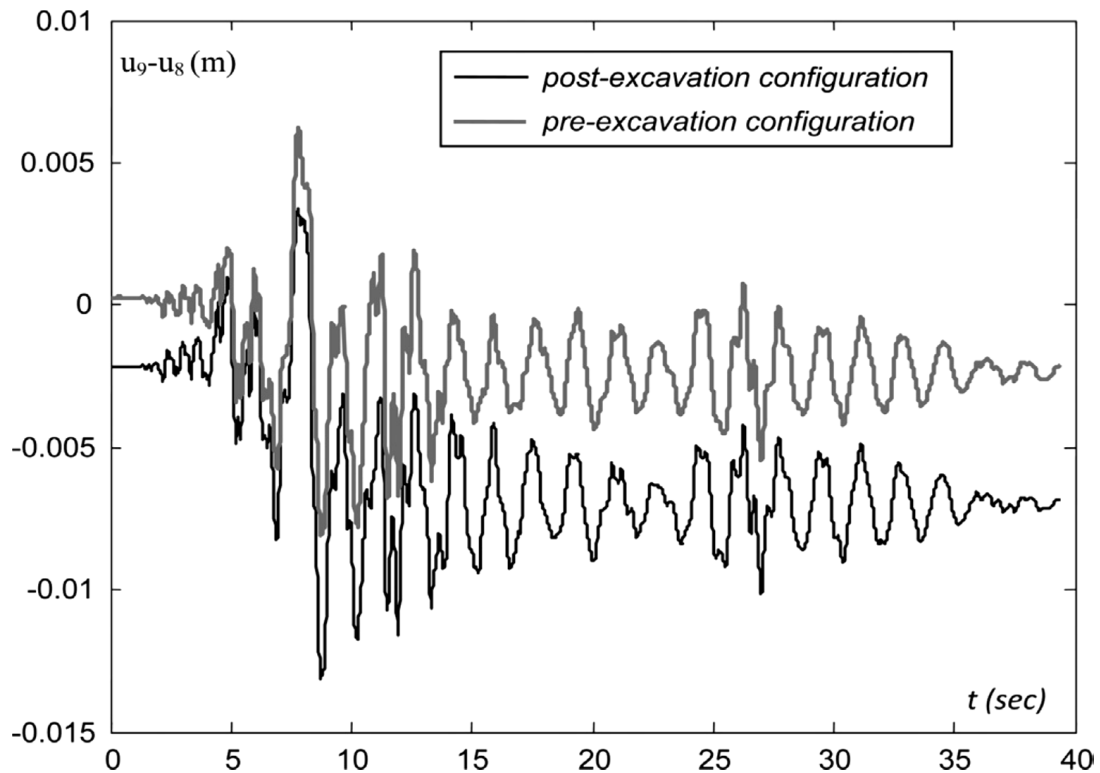
۳-روش تحقیق

پس از انجام صحت‌سنجی نتایج و نرم‌افزارهای مورد استفاده، پژوهش حاضر جهت بررسی تأثیر حفاری تونل شهری موردی تهران بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه‌ی بالای آن در سه بخش و با دو نرم‌افزار PLAXIS و SAP ۲۰۰۰، به شرح موارد زیر انجام گردیده است.

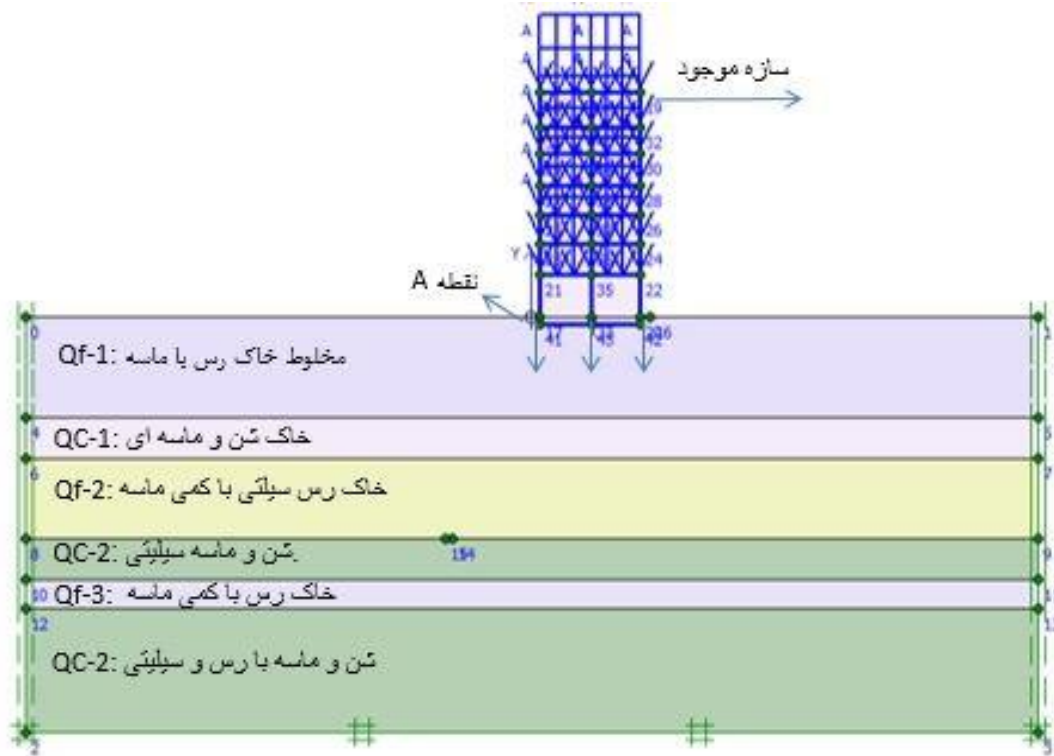
۱- تعریف مدل خاک و سازه در نرم‌افزار PLAXIS با در نظر گرفتن



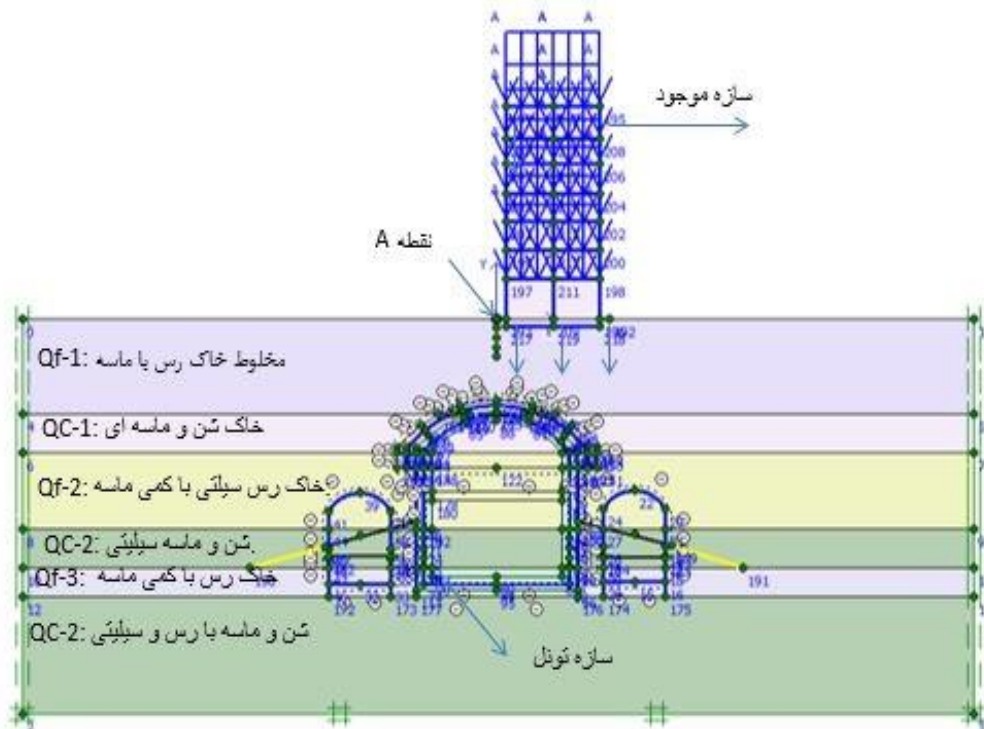
شکل ۶. دریفت طبقه هشتم سازه (تحلیل در SAP 2000)
Fig. 6. Drift of 8th floor of structure (analysis at SAP 2000)



شکل ۷. دریفت طبقه هشتم سازه (مدل کاستالدو) [۹]
Fig. 7. Drift of 8th floor of structure (Castaldo model) [9]



شکل ۸. مدل المان محدود، مرحله ی قبل از حفاری
 Fig. 8. Finite element model before excavation



شکل ۹. مدل المان محدود، مرحله ی بعد از حفاری
 Fig. 9. Finite element model after excavation

۴- مدل سازی

در این قسمت در نرم افزار PLAXIS خاک در ۶ لایه با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی، سازه و تونل نیز در مدلی به ابعاد ۵۰ متر عمق و ۱۴۰ متر عرض، مطابق شکل های ۸ و ۹ مدل سازی شده است. مشخصات تونل، ابعاد، سازه های نگهدارنده و مراحل اجرایی آن طبق مشخصات یک پروژه واقعی ایستگاه مترو شهر تهران می باشد که در اشکال ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.

۴-۱- مشخصات ایستگاه

در این سیستم بدنه اصلی ایستگاه دو طبقه بوده که طبقه اول سکوی مسافر و فوقانی جهت جانمایی سالن فروش بلیط و هواسازی مورد استفاده قرار میگیرد. عرض مفید ایستگاه ۱۴ متر بوده که شامل دو سکوی مجاور به عرض تقریبی ۴ متر می باشد و طول ناحیه هسته مرکزی ایستگاه نیز معادل ۱۲۵ متر تعیین شده است و سربار خاک فوقانی بر روی ایستگاه بر روی تاج قوس ۹ متر می باشد [۱۲]. در شکل ۱۰ پلان و موقعیت تونل مورد نظر جهت مدل سازی، با عنوان S۱ روی نقشه مشخص شده است.

۴-۲- مشخصات ژئوتکنیکی

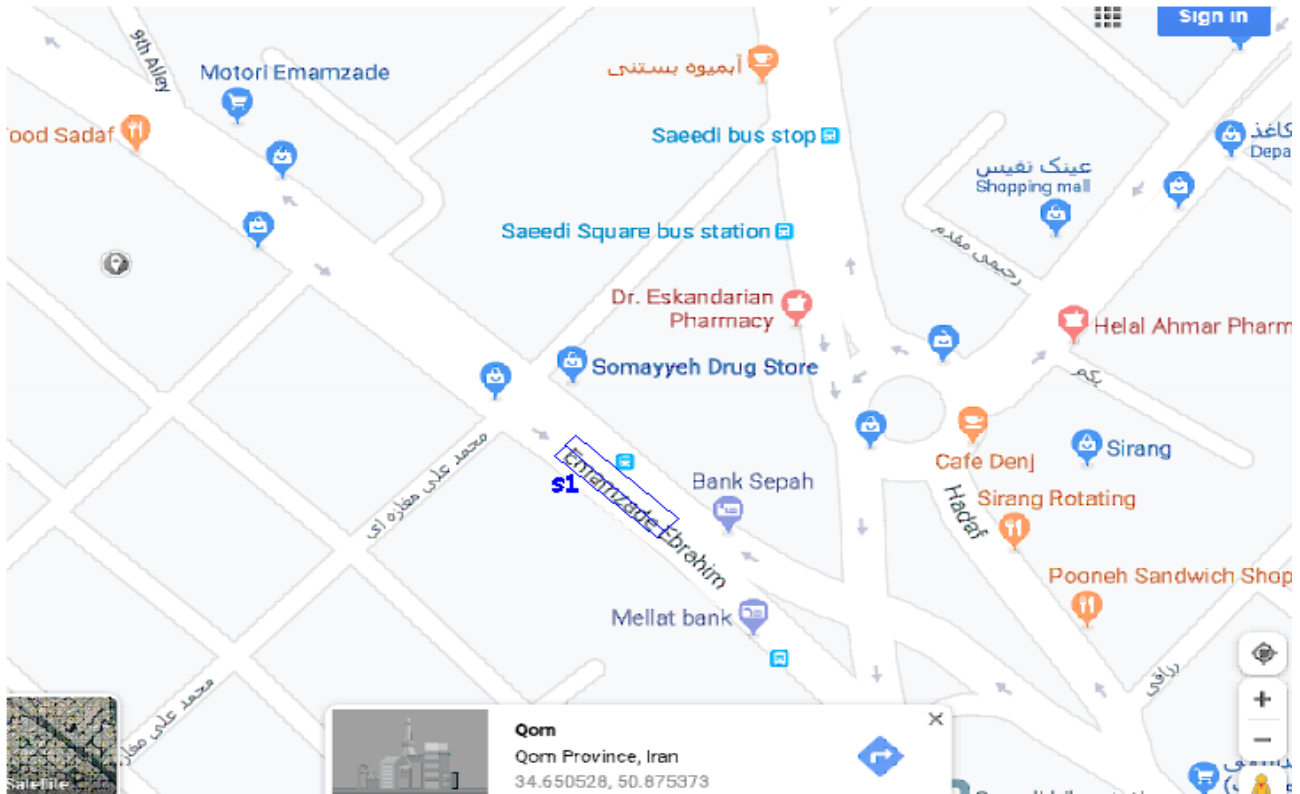
بر اساس مطالعات زمین شناسی در محل ایستگاه چندین لایه های خاک شناسایی شده که با نامگذاری Qf-۱، QC-۱، Qf-۲، QC-۲، Qf-۳ به صورت لایه های و با ضخامت های متفاوت تشکیل شده اند که لایه Qf-۲ در اعماق کمتر و لایه QC-۲ در اعماق بیشتر گسترش دارد. مشخصات لایه های خاک آزمایشگاهی در جدول ۳ و مشخصات خاک در نرم افزار PLAXIS در جدول ۴ ارائه شده است. سطح آب های زیرزمینی هم پایینتر از کف پروژه و در اعماق بیشتر از ۳۵ متری قرار دارد.

مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS): مدل رفتاری خاک سخت شونده یک مدل پیشرفته برای شبیه سازی رفتار خاک است که این مدل تابع تنش بوده و مدول سختی را لحاظ می کند؛ یعنی تمام سختی ها با فشار افزایش می یابد. مزیت مدل خاک سخت شونده بر مدل موهرکولمب علاوه بر استفاده از منحنی تنش- کرنش هیپربولیک به جای منحنی دو خطی، کنترل وابستگی به تنش است. موقع استفاده از مدل موهرکولمب، مقدار سختی به یک اندازه ثابت

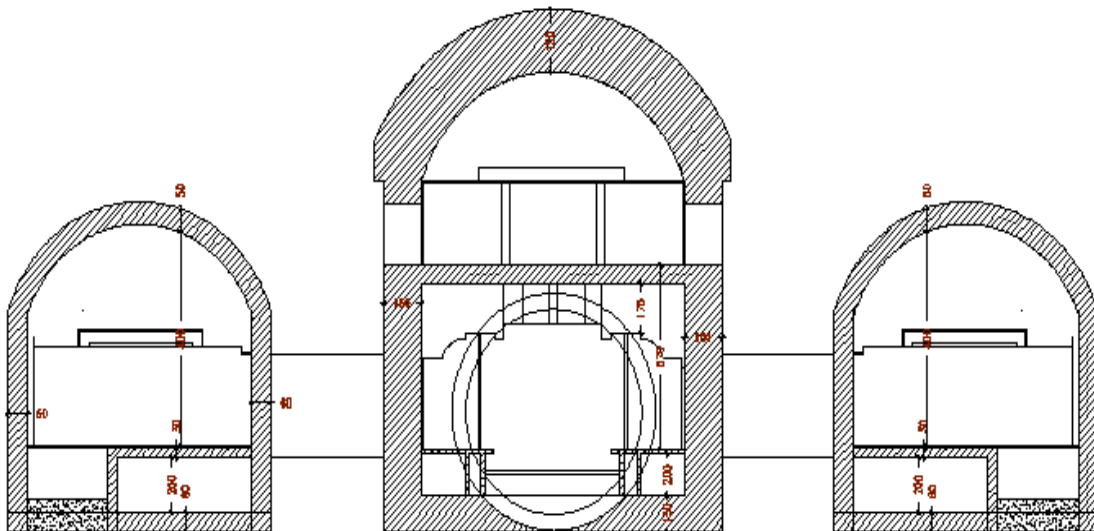
اندرکنش خاک- سازه و با مدل رفتاری خاک سخت شونده [HS]. مدل خاک سخت شونده یک مدل پیشرفته برای شبیه سازی رفتار خاک است که این مدل تابع تنش بوده و مدول سختی را لحاظ می کند؛ یعنی تمام سختی ها با فشار افزایش می یابد [۱۰ و ۱۱].

۲- مدل کردن سیستم حفاری که به مراحل اجرایی تونل سازی بکار رفته بستگی دارد.

۳- مدل سازی ساختمان فولادی در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ که پاسخ آن بستگی به نشست و شتاب زیر پی سازه، و سیستم سازه های نگهدارنده تونل و مشخصات دینامیکی، استاتیکی سازه و خاک دارد. با توجه به مدل سازی ها به منظور تعیین اثر حفاری تونل بر ساختمان های موجود روش کاربردی اجرایی تونل بکار رفته است. در این روش ابتدا در نرم افزار PLAXIS با انجام تحلیل استاتیکی نشست زیر پی ساختمان موجود تحت بار مرده و زنده در دو مرحله قبل و بعد از حفاری تونل محاسبه شده است. در مرحله بعد از حفاری محاسبه نشست پی در اثر حفاری در دو قسمت بررسی شده است. در قسمت اول هم زمان با اجرای حفاری که شامل ۶ فاز اجرایی می باشد که در تمامی فازها نشست ساختمان محاسبه شده است. در فاز اول و دوم ساختمان فعال شده و در فاز سوم حفاری و اجرای شمع ها و بتن ریزی بالای تونل انجام شده است. فاز چهارم حفاری تا تراز ۲۲- متری انجام و سازه های نگهدارنده تونل فعال شده و بتن ریزی اطراف حفاری انجام شده است. فاز پنجم حفاری تا ارتفاع ۲۸- متری اجرا و سازه های نگهدارنده، فعال و بتن ریزی اطراف حفاری انجام شده است. فاز ششم حفاری سکوها کناری و اجرای المان Anchor و فاز هفتم که مرحله بعد از اجرا می باشد (مرحله بهره برداری) سازه های نگهدارنده حذف شده و نشست سازه محاسبه شده است. در بخش دوم در نرم افزار PLAXIS نیز با استفاده از رکورد مورد نظر تحلیل دینامیکی برای هر دو مرحله انجام گرفته و پاسخ شتاب در زیر پی ساختمان موجود محاسبه شده است. هدف از این بخش بررسی تأثیر حفاری تونل بر پاسخ شتاب و استفاده از آن در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ به عنوان ورودی جهت تحلیل سازه می باشد. در بخش سوم سازه در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ مدل سازی شده و نتایج جابه جایی هایی بخش اول به پی اعمال و با استفاده از پاسخ شتاب (خروجی PLAXIS) تحلیل دینامیکی غیرخطی زمانی سازه در دو مرحله انجام گرفته است.



شکل ۱۰. پلان مسیر در محل ایستگاه [۱۲]
Fig. 10. Route plan at station location [12]



شکل ۱۱. مقطع عرضی ایستگاه [۱۲]
Fig. 11. Cross section of the station [12]

جدول ۳. پارامترهای ژئوتکنیکی آزمایشگاهی [۱۲]

Table 3. Laboratory geotechnical parameters [12]

| پارامترها | علائم | Qf-1 | QC-1 | Qf-2 | QC-2 | Qf-3 | واحد |
|---------------------|-----------|------|------|------|------|------|--------------------|
| وزن مخصوص طبیعی خاک | γ | ۱۸۵۰ | ۱۹۰۰ | ۱۸۵۰ | ۱۹۰۰ | ۱۸۵۰ | Kg/m ³ |
| وزن مخصوص خشک خاک | $d\gamma$ | ۱۶۵۰ | ۱۷۵۰ | ۱۶۵۰ | ۱۷۵۰ | ۱۶۵۰ | Kg/m ³ |
| مدول الاستیسیته | E | ۱۶۹۶ | ۲۵۰۰ | ۱۸۸۱ | ۲۵۰۰ | ۱۸۸۱ | Kg/cm ² |
| ضریب چسبندگی | C | ۰/۴ | ۰/۲۷ | ۰/۴ | ۰/۲۷ | ۰/۴ | Kg/cm ² |
| نسبت پواسون خاک | ν | ۰/۳ | ۰/۲۹ | ۰/۳ | ۰/۲۹ | ۰/۳ | - |
| زاویه اصطکاک | ϕ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۲ | deg |

جدول ۴. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در PLAXIS [۱۲]

Table 4. Soil geotechnical parameters plaxic [12]

| پارامترها | علائم | Qf-1 | QC-1 | Qf-2 | QC-2 | Qf-3 | واحد |
|---------------------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| مدل | - | HS | HS | HS | HS | HS | - |
| نوع | | ذهکشی | ذهکشی | ذهکشی | ذهکشی | ذهکشی | - |
| وزن مخصوص اشباع | $sat\gamma$ | ۱۸/۵ | ۱۹ | ۱۹ | ۱۸/۵ | ۱۹ | KN /m ³ |
| ضریب نفوذپذیری | k_x | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | m/day |
| ضریب نفوذپذیری | k_y | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | m/day |
| مدول سکانت در مقاومت ۵۰٪ (مدول بارگذاری اولیه) | E_{ref}^{50} | ۳۷۵۰۰ | ۵۴۳۰۰ | ۴۱۸۰۰ | ۵۷۰۰ | ۴۱۸۰۰ | KN /m ² |
| سختی مماسی در شیب اولیه | E_{oed} | ۳۷۴۰۰ | ۵۴۳۰۰ | ۴۱۸۰۰ | ۵۷۰۰ | ۴۱۸۰۰ | KN /m ² |
| مدول باربرداری- بارگذاری مجدد | E_{ur} | ۱۶۹۰۰۰ | ۵۳۸۰۰۰ | ۱۸۸۰۰۰ | ۲۵۰۰۰۰ | ۱۸۸۰۰۰ | KN /m ² |
| چسبندگی مؤثر | c_{ref} | ۳۹/۲۲ | ۲۶/۴۷ | ۳۹/۲۲ | ۲۷ | ۳۹/۲۲ | - |
| زاویه اصطکاک | ϕ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۲ | Degree |
| زاویه اتساع | ψ | ۰ | ۳ | ۰ | ۳ | ۰ | Degree |
| مقاومت سطح مشترک | R_{inter} | ۰/۵ | ۰/۶۷ | ۰/۵ | ۰/۶۷ | ۰/۵ | - |
| عمق لایه | H | ۱۰ | ۴ | ۸ | ۴ | ۴ | m |

۳-۴- روش اجرای ایستگاه

روش اجرای ایستگاه به صورت شمع و ریپ اجرا شده است. در این روش گالری‌هایی در امتداد کناره‌ها و سقف ایستگاه، حفاری شده و در امتداد گالری‌های جانبی در فواصل منظم ۲/۵ متری شمع-هایی اجرا شده است. در بالای سقف ایستگاه، طاق‌های بتنی روی شمعها اجرا شده و سپس توسط طاق‌های بتنی و شمعهای کناری، عملیات خاک‌برداری شروع شده و ایستگاه احداث می‌گردد. به طور کلی مراحل اجرای ایستگاه در این روش را می‌توان به صورت موارد زیر اشاره کرد.

- ۱- حفاری و اجرای شفت دسترسی در مجاورت ایستگاه؛ ۲- حفاری و اجرای گالری ارتباطی از شفت به موقعیت حفاری ایستگاه؛ ۳- حفاری و اجرای گالری ارتباطی از شفت به موقعیت حفاری ایستگاه؛ ۴- حفاری گالری در وسط و حفاری دسترسی‌های جانبی و گالری بالای تونل؛ ۵- حفاری شمع‌های جانبی؛ ۶- بتن‌ریزی شمعها؛ ۷- حفاری و بتن‌ریزی طاق بتنی در امتداد شمع‌ها؛ ۸- خاک‌برداری تا تراز اجرای انکربولت؛ ۹- اجرای انکربولت؛ ۱۰- ادامه خاک‌برداری تا تراز زیر فونداسیون؛ ۱۱- اجرای ایستگاه تا پایین‌تر از سالن فروش بلیط؛ ۱۲- حذف انکربولت و تکمیل اجرای ایستگاه؛ ۱۳- حفر بخش بالای سازه‌های جانبی؛ ۱۴- اجرای سازه نگهدارنده موقت و شمعهای جانبی؛ ۱۵- حفاری بخش‌های باقیمانده سازه‌های جانبی و تکمیل سیستم نگهداری.

است؛ در حالی که برای خاک این سختی به تراز تنش وابسته است. بنابراین تخمین زدن ترازهای تنش در محدوده خاک و استفاده از آن برای به دست آوردن مقادیر مناسب سختی ضروری است. در مدل خاک سخت شونده این مراحل برای به دست آوردن پارامترهای ورودی موردنیاز نیست و به جای آن یک مدول سختی E_{ref}^{50} به کار می‌رود [۱۳].

مقاومت سطح مشترک (R_{inter}): این پارامتر برای تعریف رفتار سطح مشترک در مدل کردن اندرکنش خاک و سازه استفاده می‌شود [۱۳].

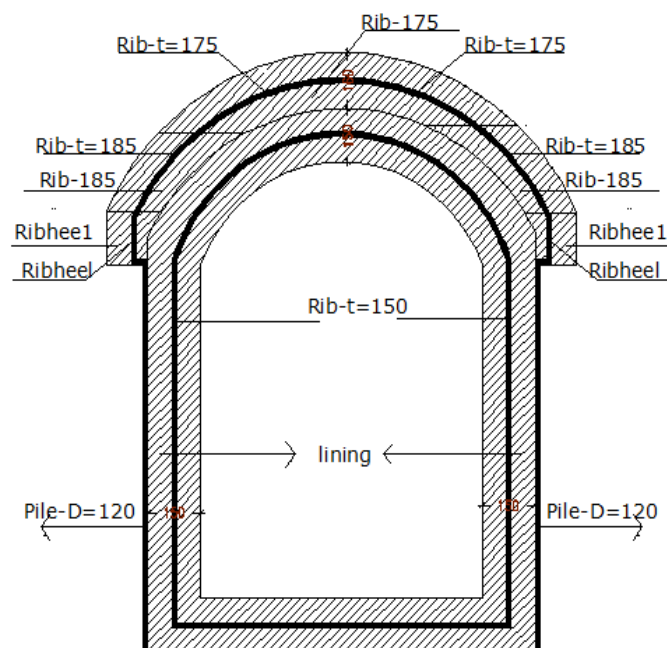
زاویه اتساع خاک (ψ): یک توده خاک در طی تغییرشکل برشی افزایش یا کاهش حجم می‌یابد که به وسیله‌ی زاویه‌ی اتساع نشان داده می‌شود. زاویه‌ی اتساع از جمله عواملی است که می‌تواند در پایداری و تحلیل‌های مربوط به حفاری تأثیرگذار باشد. زاویه‌ی اتساع خاک از زاویه اصطکاک خاک کوچک‌تر می‌باشد که در سال ۱۸۸۵ توسط رینولدز کشف شده است.

مدول یانگ (E): در نمودار تنش-کرنش خاک، شیب اولیه معمولاً E_{oed} و مدول سکانت در مقاومت ۵۰٪ به عنوان E_{ref}^{50} تعریف می‌شود. برای بارگذاری خاکها عموماً از E_{ref}^{50} استفاده می‌کنند و در مسائل باربرداری مانند تونلسازی و حفاریها به جای E_{ur}^{50} بیشتر E_{ur} به کار می‌رود [۱۳].

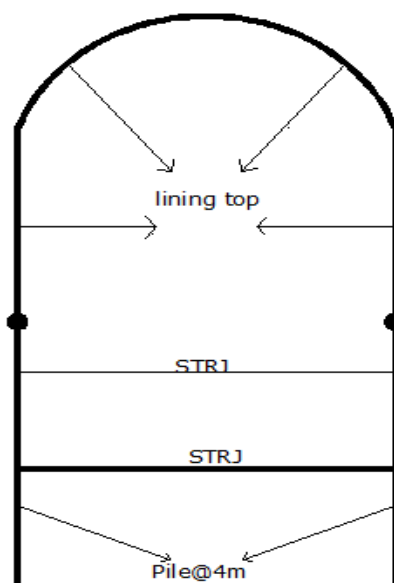
جدول ۵. مشخصات بتن استفاده در سازه‌های نگهبان [۱۲]

Table 5. Concrete specifications for use in guard structures [12]

| پارامترها | علائم | lining | pile | Rib-175 Rib-155 Rib-185 | Ribheel | واحد |
|------------------|-------------|----------|---------|-------------------------------|----------|--------------------|
| مدل | - | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | - |
| وزن مخصوص | γ | ۲۵ | ۲۵ | ۲۵ | ۲۵ | KN /m ³ |
| ضریب نفوذپذیری | k_x | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | m/day |
| ضریب نفوذپذیری | k_{ey} | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | m/day |
| مدول سختی | E | ۲۴۹۰۰۰۰۰ | ۱۲۴۲۰۰۰ | ۹۶۶۰۰۰۰۰ | ۱۹۴۰۰۰۰۰ | KN /m ² |
| ضریب پواسون | μ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | - |
| مقاومت سطح مشترک | R_{inter} | ۱ | ۱ | ۰/۶۷ | ۱ | - |



شکل ۱۲. مقطع مشخصات هسته مرکزی تونل [۱۲]
Fig. 12. Tunnel core profile cross section [12]



شکل ۱۳. مشخصات سکوه‌های کناری [۱۲]
Fig. 13. Stone bench Specifications [12]

فواصل ۴ متر به همراه شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای سقف فضای حفاری لحاظ شده‌اند. برای جلوگیری از ناپایداری شمع‌های جانبی استراتژی‌هایی به صورت تیورق با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر با ضخامت ورق ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۲]. مدلسازی Anchor- plate- Soil Interface شامل پروژه شامل

۴-۴- مشخصات سازه‌های تونل

سازه نگهدارنده هسته مرکزی به صورت شمعهایی به قطر ۱/۲ متر و با فواصل ۲/۵ متری و همچنین ریپهایی به عرض یک متر و ارتفاع ۱/۵۵ متر تا ۱/۸۵ متر بر روی این شمعها در نظر گرفته شده است. همچنین برای سازه‌های جانبی نیز شمع‌هایی به قطر ۱ متر و

Geogrid - مطابق اشکال ۱۱ تا ۱۳ میباید که مشخصات آنها در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است.

۴-۶- مشخصات سازه موجود فولادی

سازه‌ی در نظر گرفته شده یک قاب فولادی ۷ طبقه ی دو دهانه با کاربری مسکونی در منطقه ی با خطر نسبی زیاد میباشد. سیستم مقاوم این سازه از نوع قاب خمشی فولادی متوسط و ارتفاع طبقه ی همکف ۴/۵ متر و طبقات ۳/۲ متر و همچنین فاصله ستون‌ها و قاب‌ها از هم به ترتیب ۵ و ۴ متر می‌باشد. بارهای وارده نیز از نوع مرده و زنده به مقدار ۶۲۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در تمام طبقات در نظر گرفته شده است (شکل ۱۴).

۵- تعیین مشخصات دینامیکی سازه و خاک

۵-۱- میرایی خاک

برای در نظر گرفتن میرایی خاک در نرمافزار PLAXIS از ضرایب رایلی a و β استفاده شده است. این ضرایب متناسب با جرم و سختی سیستم بوده که میرایی رایلی را مطابق رابطه زیر تشکیل داده است:

۴-۵- مش بندی و اندرکنش خاک و سازه

جهت انجام تحلیل اجزاء محدود، مدل هندسی به اجزای ریز، مش بندی شده و سپس مورد تحلیل قرار گرفته است. در برنامه ورودی عمل مش بندی با توجه به ابعاد مدل، دقت و حساسیت محاسبات در پنج سطح به اجزای خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز تقسیم بندی می‌شود که هر چند اجزاء ریزتر باشند تعداد آنها بیشتر و دقت محاسبات افزایش می‌یابد. در حالی که مدت زمان تحلیل طولانی‌تر می‌شود [۱۴] که در این پژوهش از سطح خیلی ریز جهت مش بندی استفاده شده که پاسخ تحلیل مستقل از اندازه مش شده است. اندرکنش خاک و سازه نیز توسط اجزاء فصل مشترک انجام شده که این جزء قادر است اندرکنش بین سپرها، شمع‌ها، دیوارها و سازه‌ها را با محیط خاکی مدلسازی کند. عمق مدفون فونداسیون نیز برابر ۷۰ سانتی‌متر

جدول ۶. مشخصات عناصر سازه‌های نگهبان از نوع plate [۱۲]

Table 6. Elements specifications of plate type guard structures [12]

| پارامترها | Lining Top | Pile@4m | Piles-D=120 | Strutj | Ribheel | Rib-t=150 | Rib-t=165 | ib-t=175-185 | واحد |
|---------------|------------|---------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|--------------|-------------------|
| مدل | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | الاستیک | - |
| EA سختی محوری | ۶۰۰۰۰۰۰ | ۳۱۶۰۰۰۰ | ۰/۸۵ | ۶۴۰۰۰۰۰ | ۴۰/۵۹ | ۱۱/۰۵ | ۰/۸۵ | ۰/۸۵ | KN/m ³ |
| EI سختی خمشی | ۷۹۱۰۰ | ۱۹۷۰۰۰ | ۰/۰۰۲۴ | ۷۹۱۰۰ | ۱۴/۸ | ۱/۲ | ۰/۲۲۷ | ۰/۲۲۷ | m/day |

جدول ۷. مشخصات عناصر سازه‌های نگهبان از نوع Anchor rod [۱۲]

Table 7. Anchor rod type elements of guard structures [12]

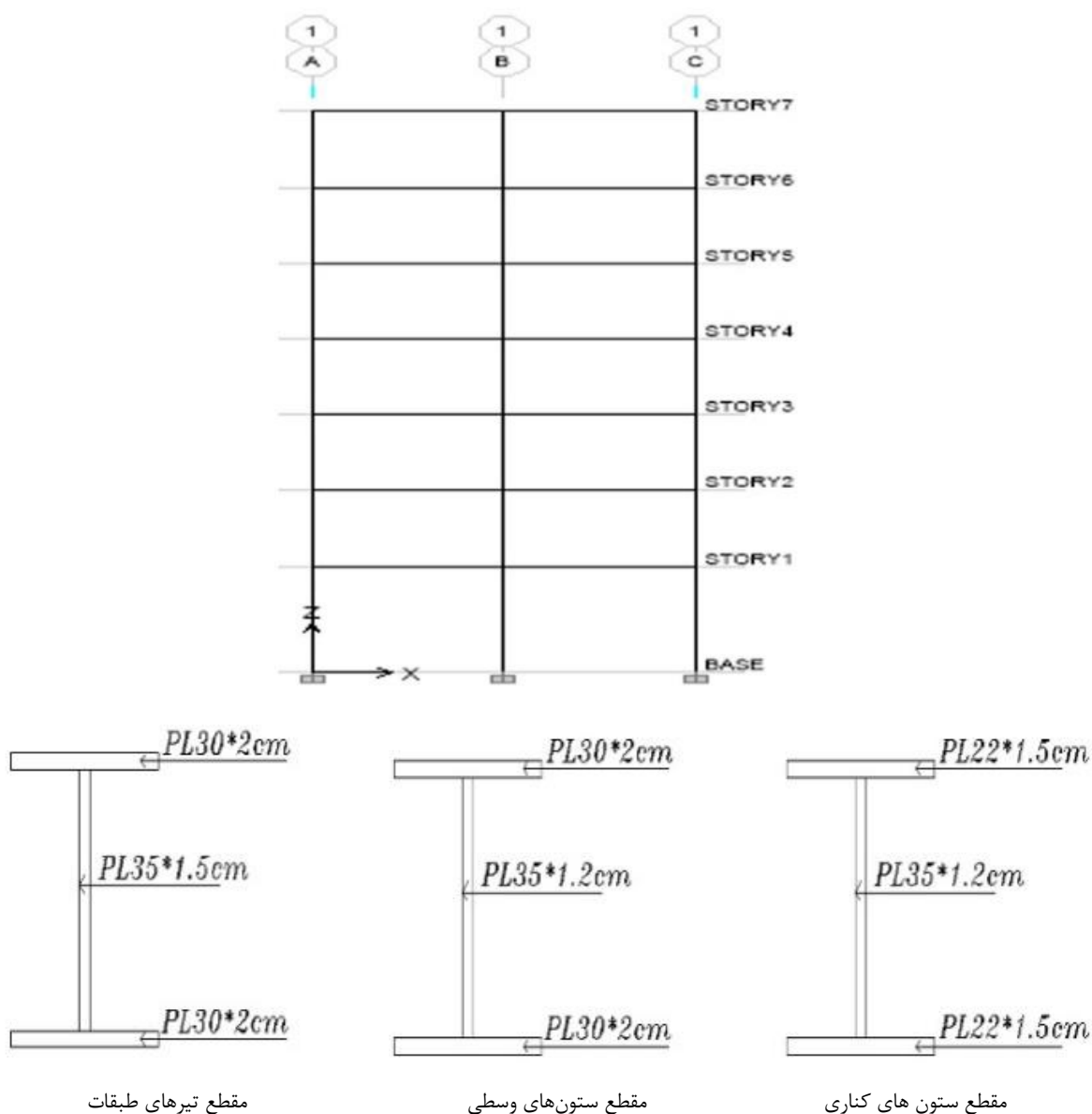
| پارامترها | Groutbody | Anchor rod | strj | واحد |
|---------------|-----------|------------|-----------|------|
| مدل | الاستیک | الاستیک | الاستیک | - |
| EA سختی محوری | ۱۶۷۰۰۰ | ۱۶۷۰۰۰ | ۶۴۰۰۰۰۰۰۰ | KN/m |

$$\alpha + \beta\omega_i = 2\omega_i\xi \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، α و β ضرایب میرایی هستند که در نرم‌افزار PLAXIS جهت در نظر گرفتن میرایی و ω_i فرکانس طبیعی خاک و ξ_i به عنوان درصد میرایی استفاده می‌شود. در این رابطه اگر درصد میرایی و فرکانس‌های ارتعاشی معلوم باشند دو معادله به طور هم‌زمان تشکیل می‌شود که از آن α و β محاسبه می‌شود. برای مشخص شدن ضرایب میرایی ابتدا باید فرکانس ارتعاشی اول و دوم و نسبت میرایی مشخص شود. بنابراین با استفاده از تابع تبدیل، فرکانس ارتعاشی برای خاک مورد نظر محاسبه گردیده است. در ادامه جزئیات توابع

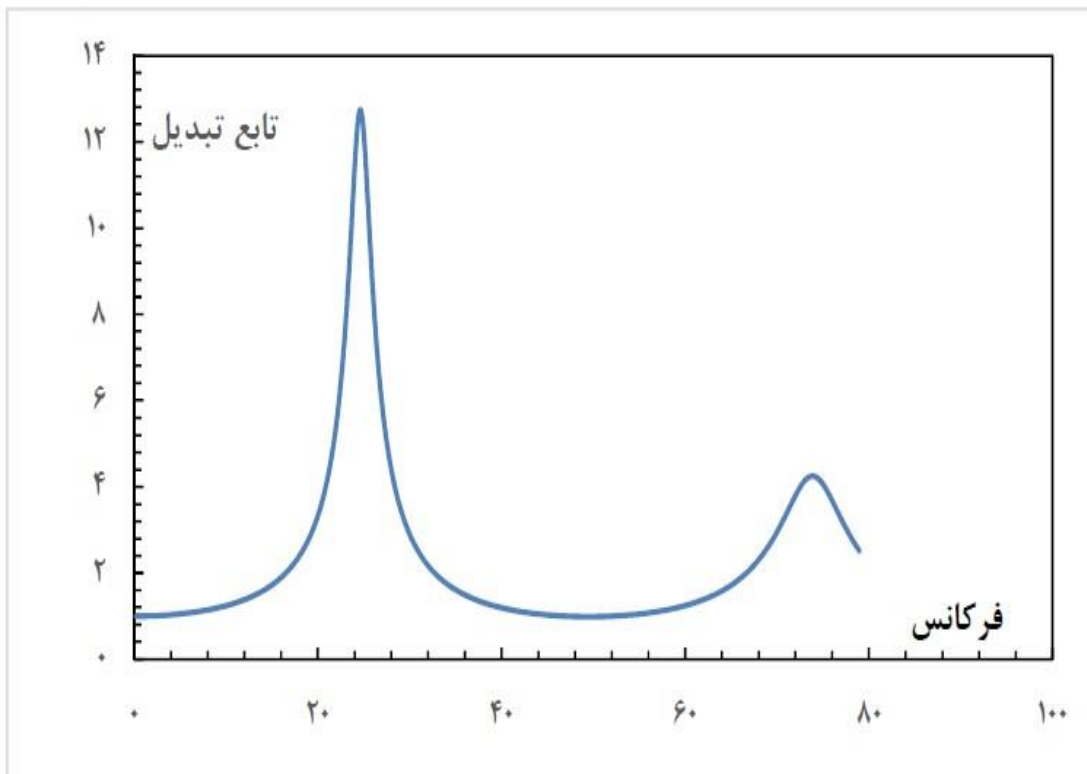
$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، M جرم، K سختی و a ، β ضرایب رایلی را نشان می‌دهند که آلفای رایلی پارامتری است که اثر جرم در میرایی سیستم را مشخص کرده و در مقادیر بالاتر، بیشتر فرکانس‌های پایین مستهلک می‌شوند. بتای رایلی نیز اثر سختی در میرایی سیستم را تعیین می‌نماید که در مقادیر بالاتر بتا، بیشتر فرکانس‌های بالا مستهلک می‌شوند. رابطه رایلی میان a ، ω_i ، ξ_i ، β به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۱۴. قاب ساختمانی موجود

Fig. 14. Existing Steel Frame & Structure Section



شکل ۱۵. تابع تبدیل برای خاک مدل سازی شده
Fig. 15. Conversion function for modeled soil

۵-۱-۲- تعیین فرکانس ارتعاشی خاک با استفاده از توابع تبدیل
 برای تعیین فرکانس ارتعاشی خاک، رابطه ی (۳) با استفاده از مشخصات متوسط لایه های خاک و فرکانس طبیعی با گام ۰/۲ در نرم افزار EXCEL تعریف شده است که نتیجه تابع به صورت شکل ۱۵ حاصل شده است. در نمودار، محور x مربوط به فرکانس طبیعی و محور y تابع تبدیل می باشد. فرکانس متناظر با اولین بیشینه ی تابع تبدیل به عنوان فرکانس طبیعی اول (ω_1) برابر با ۲۴/۸ رادیان بر ثانیه و فرکانس متناظر با دومین بیشینه ی تابع تبدیل به عنوان فرکانس طبیعی دوم (ω_2) برابر با ۷۵/۲ رادیان بر ثانیه محاسبه شده است.

۵-۱-۳- تعیین ضرایب α و β رایلی برای خاک

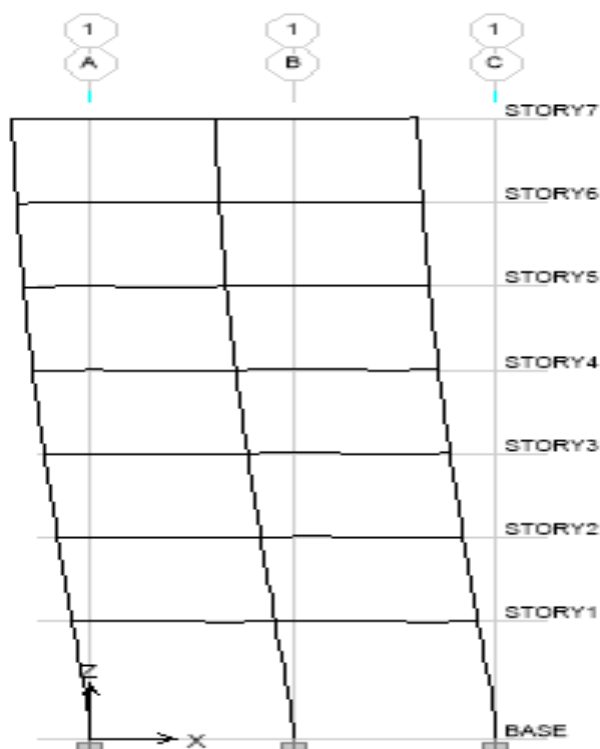
برای محاسبه ضرایب رایلی با استفاده از فرکانس های ارتعاشی مشخص شده و میرایی ۵ درصد، رابطه $a + \beta\omega_i = 2\omega_i\xi$ تبدیل به معادله دو مجهولی می شود که با حل آن ضرایب میرایی $a = 1.86$ و

تبدیل برای محاسبه فرکانس ارتعاشی به صورت کامل توضیح داده شده است. نسبت میرایی هم مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۵-۱-۱- توابع تبدیل

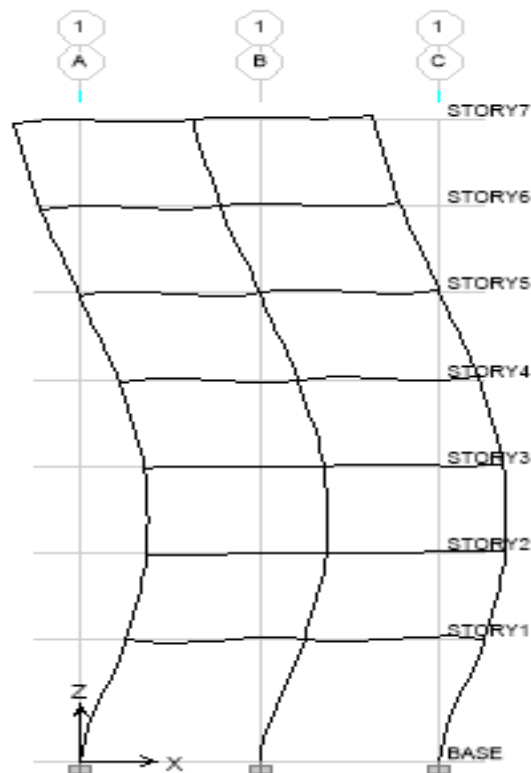
یکی از روش های تحلیل پاسخ زمین استفاده از تابع تبدیل است که جهت بیان پارامترهای مختلف پاسخ، مانند فرکانس ارتعاشی خاک استفاده میشود. با این تابع می توان برخی از مهم ترین اثرات توده خاک را بدون وارد شدن به عملیات پیچیده ریاضی تشریح نمود [۱۵]. در این پژوهش برای تعیین فرکانسهای ارتعاشی خاک از تابع تبدیل رابطه ی (۳) استفاده شده که ω_i فرکانس خاک، H عمق متوسط خاک، V_s سرعت موج برشی متوسط لایه های خاک می باشد.

$$F = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\omega H/V_s) + \{\xi(\omega H/V_s)\}^2}} \quad (3)$$



شکل ۱۷. مدل ارتعاشی دوم

Fig. 17. Second vibrational model



شکل ۱۶. مدل ارتعاشی اول

Fig. 16. The third vibrational model

جدول ۸. ضریب تناوب و فرکانس ارتعاشی سازه

Table 8. Vibration coefficient and vibration frequency of structures

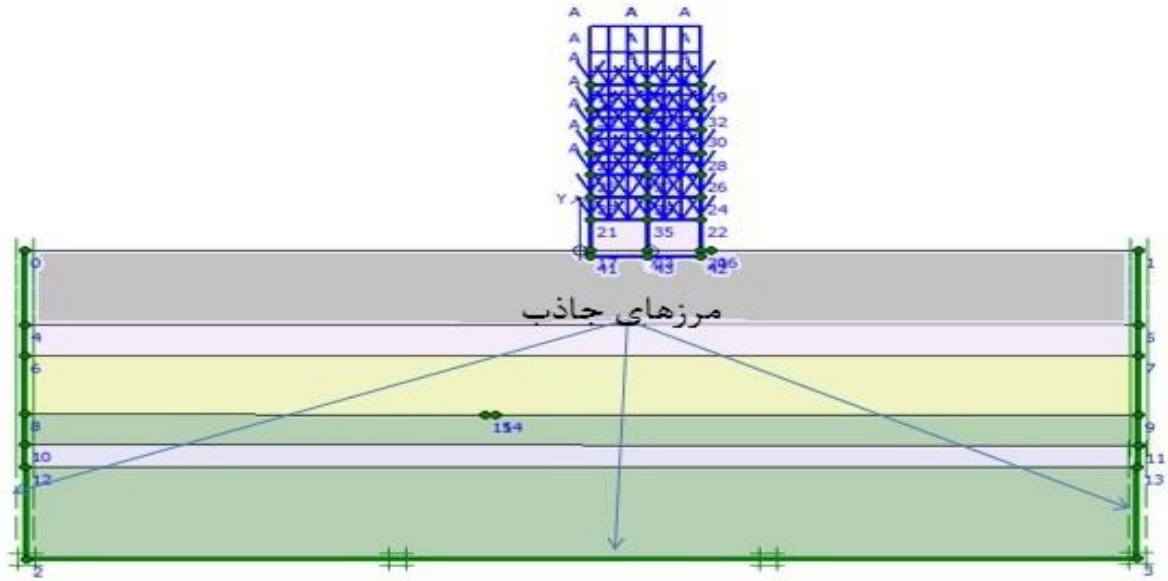
| شماره مد | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|---------------------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ضریب تناوب سازه (S) | ۱/۱۸ | ۰/۳۷۴ | ۰/۲ | ۰/۱۳ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۶۴ | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۰۲۴۵ |
| فرکانس سازه (Rad/s) | ۵/۳۲ | ۱۶/۷۹ | ۳۱/۴ | ۴۸/۳ | ۵۶/۴۱ | ۸۳/۷۳ | ۹۸/۱۲ | ۵/۳۲ | ۲۵۶/۳۲ |

$\beta = 0.001$ محاسبه شده است.

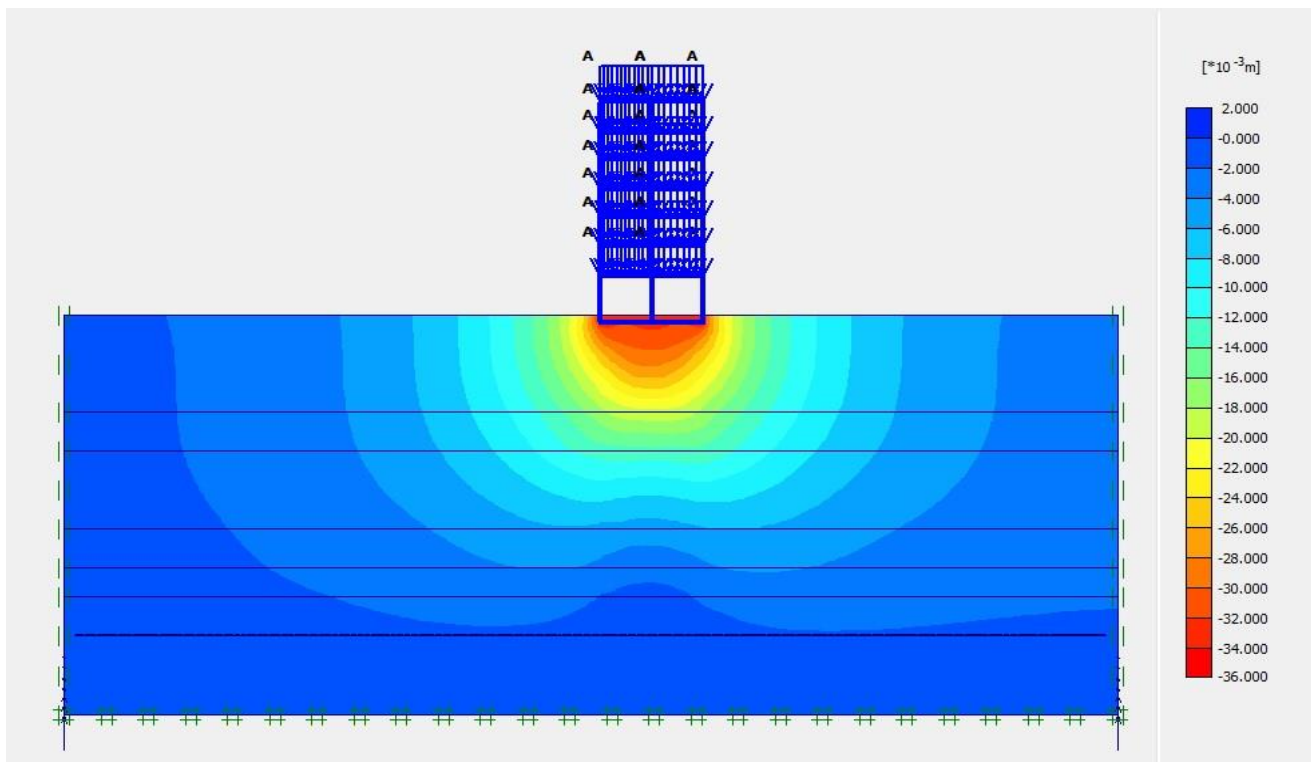
۲-۵- میرایی سازه

در سازه پدیده‌ای که باعث می‌شود ارتعاش آزاد یک سیستم به تدریج مستهلک شود میرایی نامیده می‌شود. در میرایی، انرژی جنبشی ارتعاشی سیستم بنا به مکانیسم‌های مختلفی مستهلک می‌شود. میرایی در واقع همان قدرت استهلاک انرژی سازه در حوزه رفتار خطی می‌باشد که این نقش را در حوزه رفتار غیرخطی سازه،

میرایی هیسترتیک (شکل‌پذیری) به عهده دارد. میرایی هیسترتیک در تحلیل دینامیکی غیرخطی کاربرد دارد و بیانگر اتلاف انرژی کل زلزله می‌باشد [۱۲]. در این پژوهش جهت تعیین ضرایب میرایی، ابتدا فرکانس ارتعاشی اول و دوم تعیین و سپس با استفاده از آن α و β محاسبه شده است. بنابراین با انجام تحلیل طیفی در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰، فرکانس ارتعاشی اول و دوم به ترتیب $۵/۳۲$ و $۱۶/۷۹$ رادیان بر ثانیه تعیین شده که با حل معادله رایلی، α و β به ترتیب $۰/۴$ و



شکل ۱۸. مرزهای جاذب در مدل
Fig. 18. Absorbent boundaries



شکل ۱۹. جابه‌جایی پی سازه، مرحله قبل از حفاری (مدل اول)
Fig. 19. Structure foundation displacement, before excavation

جدول ۹. نتایج جابه‌جایی پی سازه، مرحله قبل از حفاری (مدل اول)

Table 9. Result of structure foundation displacement, before excavation

| جابه‌جایی‌های قائم زیر پی سازه (cm) | | | جابه‌جایی‌های افقی زیر پی سازه (cm) | | |
|----------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------|-------|
| V_1 | V_2 | V_3 | u_1 | u_2 | u_3 |
| -۳/۳ | -۳/۲ | -۳/۳ | -۰/۰۱ | ۰ | ۰ |

۳-۵- مرزهای جاذب

۰/۰۰۴۵ محاسبه شده است.

جهت شروع تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار PLAXIS مرزهای جاذب در اطراف مدل طبق شکل ۱۸ تعریف شده است. این مرزها جهت جلوگیری از افزایش تنش و اغتشاش امواج در اطراف مدل که از بارهای دینامیکی ناشی میشوند، ایجاد شده است.

۱-۲-۵- تحلیل طیفی جهت تعیین فرکانس‌های ارتعاشی سازه

در این قسمت با آنالیز طیفی در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰، مقدار ضریب تناوب سازه و فرکانس‌های طبیعی سیستم در هر مد ارتعاشی سازه تعیین شده است. در تحلیل طیفی تعداد مودهای ارتعاش چنان انتخاب شده‌اند که جمع درصد مشارکت جرم مؤثر برای هر امتداد تحریک زلزله در مودهای انتخاب شده حداقل ۹۰ درصد و در هر امتداد حداقل سه مود اول نوسان و تمام مودهایی که دارای زمان تناوب بیش از ۰/۴ ثانیه هستند، در نظر گرفته شدند. طیف طرح مورد استفاده در این روش مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله انتخاب شده است.

۶- نتایج و بحث

۱-۶- محاسبه نشست زیر پی ساختمان، مرحله قبل از حفاری تونل
برای مرحله قبل از حفاری با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS خاک و قاب ساختمانی موجود بدون لحاظ حفاری با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه مطابق شکل ۱۹ مدل‌سازی شده و با انجام تحلیل استاتیکی، جابه‌جایی‌های افقی و قائم زیر پی ساختمان موجود تحت بار مرده و زنده محاسبه شده است. نتایج مربوط به محاسبات در جدول ۹ ارائه شده است.

۲-۲-۵- تحلیل طیفی

در این روش، طیف طرح شتاب از حاصل ضرب مقادیر ضریب شتاب مبنای طرح (A)، ضریب بازتاب (B) و شتاب ثقل زمین (g) به دست آمده است. منحنی ضریب بازتاب $B=B_f N$ برحسب زمان تناوب T مطابق با سرعت موج برشی متوسط لایه‌ها محاسبه شده است.

$$B_1 = S_0 + (S - S_0)(T/T_0) \quad 0 \leq T \leq T_0$$

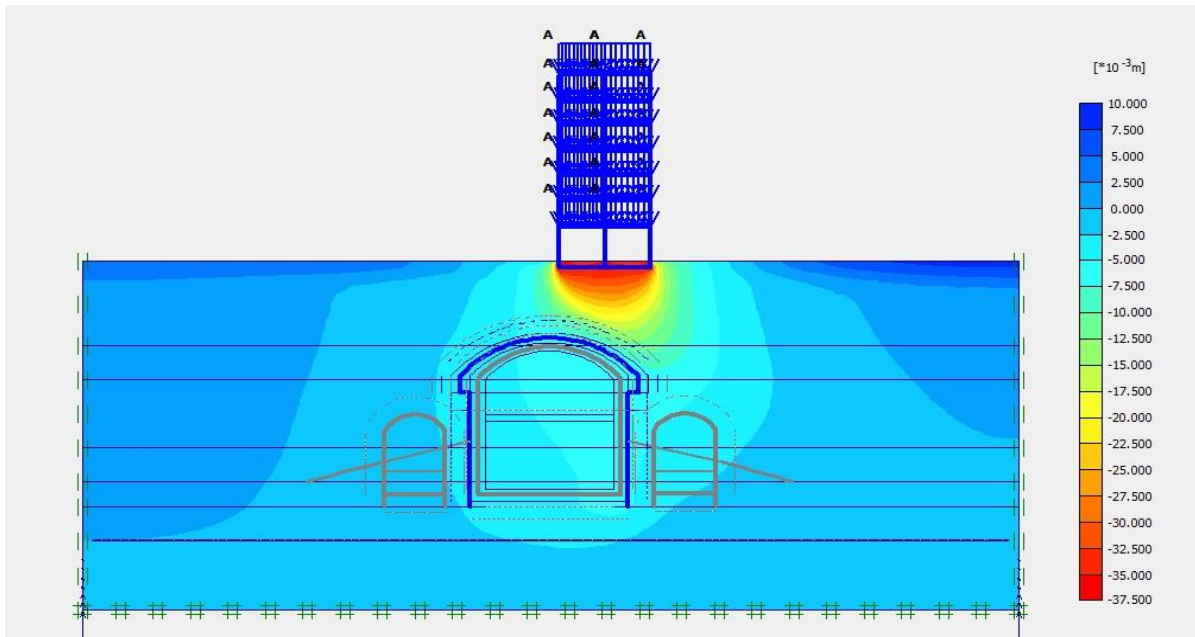
$$B_1 = S + 1 \quad T_0 \leq T \leq T$$

$$B_1 = (S + 1) \quad (T_s/T)T \geq T_s$$

۲-۶- محاسبه نشست زیر پی ساختمان، مرحله بعد از حفاری تونل
در مرحله ی بعد از حفاری محاسبه نشست پی در اثر حفاری در دو قسمت بررسی شده است. در قسمت اول هم‌زمان با اجرای حفاری که شامل ۶ فاز اجرایی می‌باشد، در تمامی فازها نشست ساختمان محاسبه شده است. در فاز اول و دوم ساختمان فعال شده است. در فاز سوم، حفاری و اجرای شمعها و بتن ریزی بالای تونل مطابق شکل ۲۰ انجام شده است. در فاز چهارم طبق شکل ۲۱ حفاری تا تراز ۲۲- متری انجام و سازه‌ی نگهدارنده تونل فعال شده و بتن‌ریزی اطراف حفاری انجام شده است. در فاز پنجم حفاری تا ارتفاع ۲۸- متری اجرا و سازه‌ی نگهدارنده فعال و بتن‌ریزی اطراف حفاری طبق شکل ۲۲

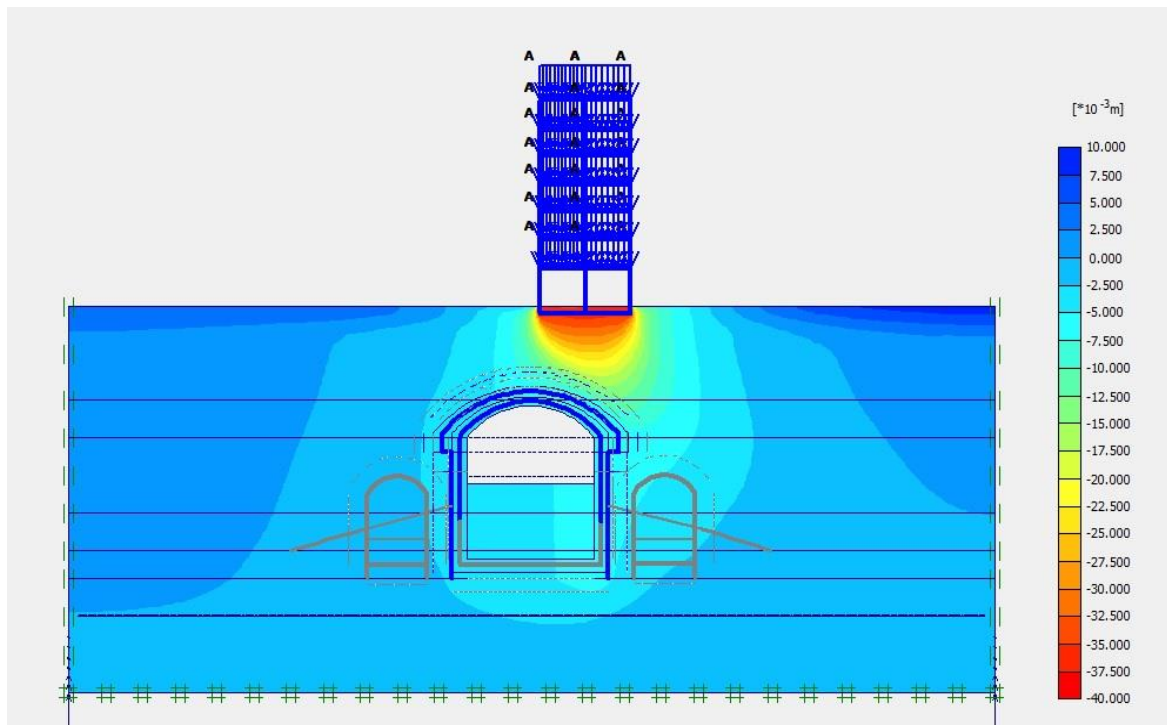
۳-۲-۵- فرکانس ارتعاشی سازه

با استفاده از تحلیل طیفی سازه، فرکانس ارتعاشی سازه برای ۹ مد اول مطابق جدول ۸ محاسبه شده است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مربوط به مد ارتعاشی اول و دوم سازه می‌باشد.



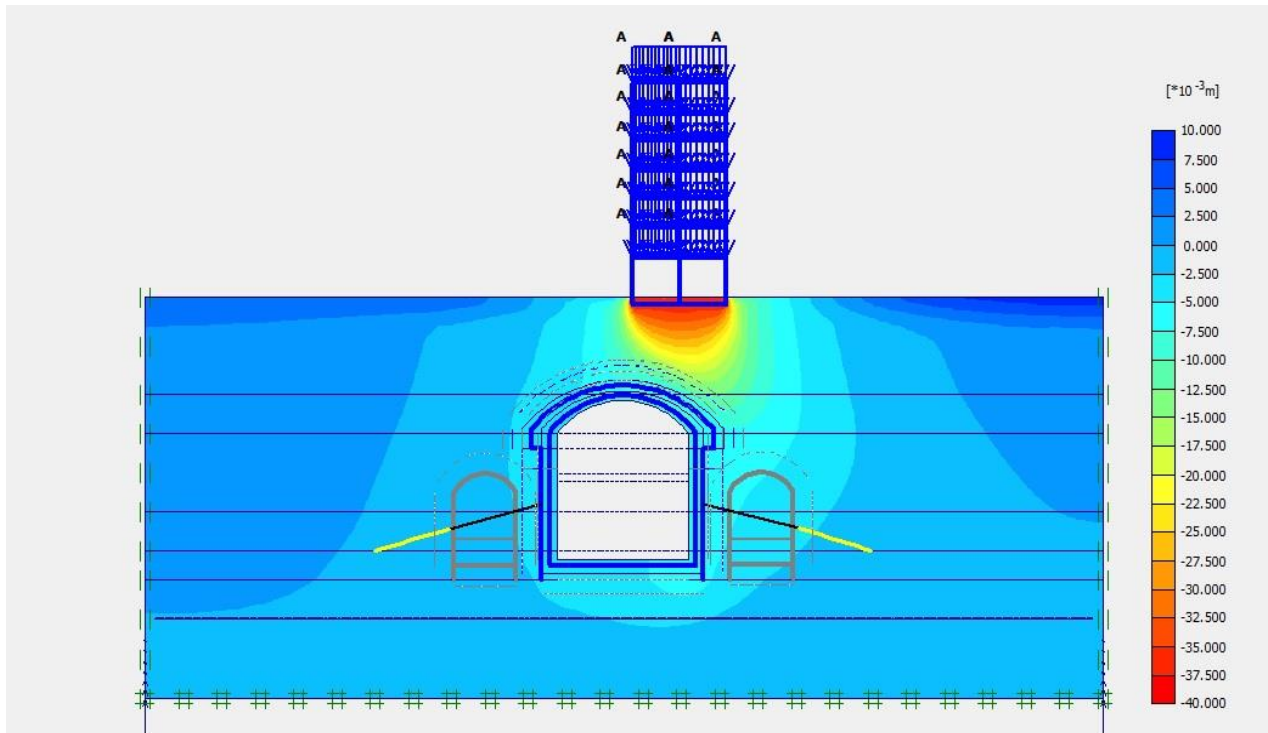
شکل ۲۰. اجرای شمع ها و بتن ریزی بالای تونل (مدل دوم)

Fig. 20. Execution of piles and concreting above the tunnel (second model)



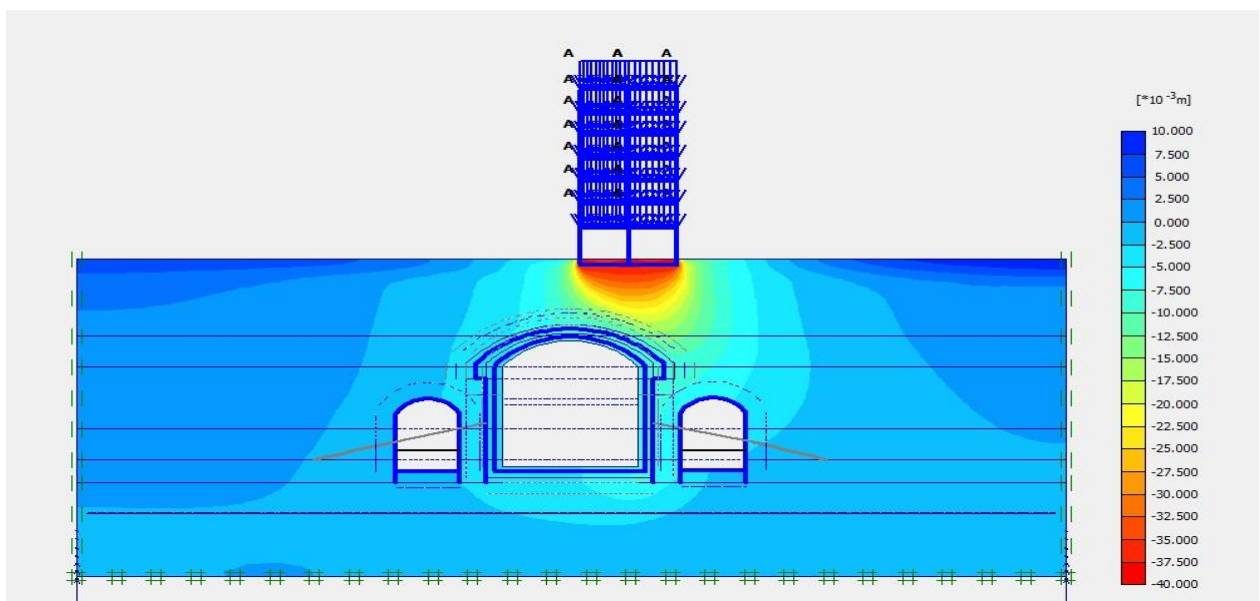
شکل ۲۱. حفاری تا کد ۲۲ متری، اجرای سازه نگهدارنده و بتن ریزی اطراف حفاری (مدل سوم)

Fig. 21. Drilling up to -22 meter code, implementation of retaining structure and concrete around drilling (Model III)



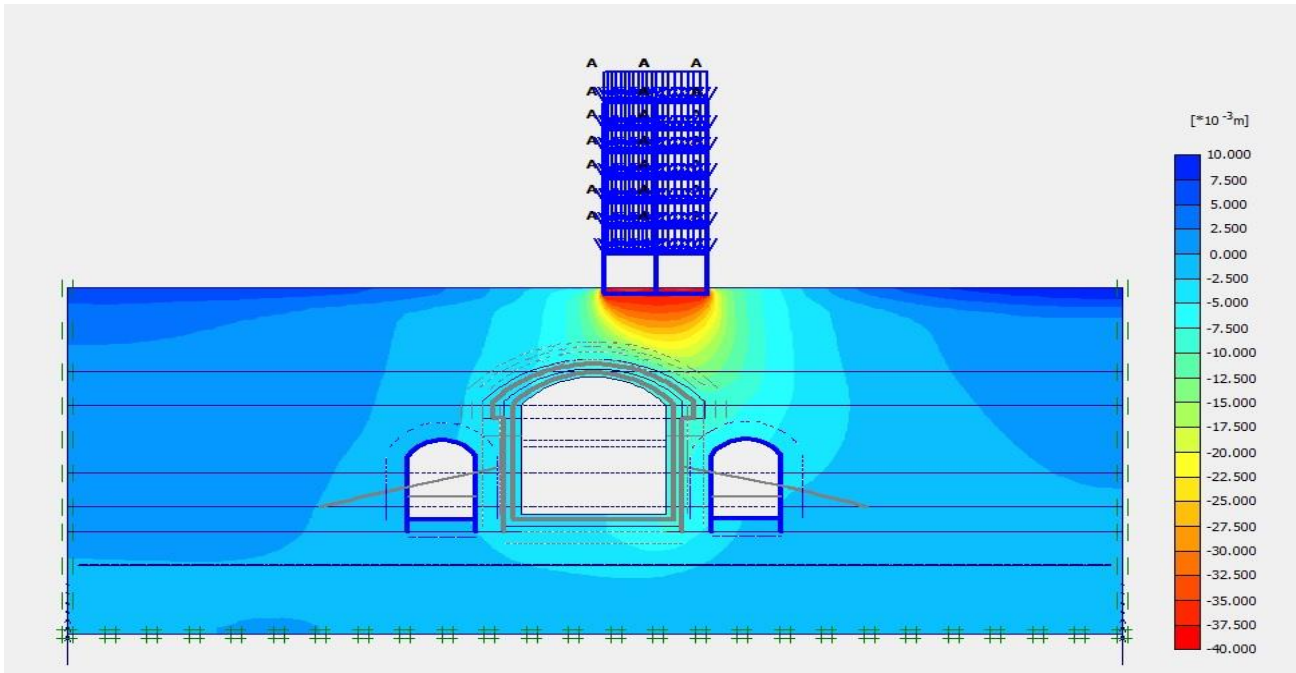
شکل ۲۲. حفاری تا کد -۲۸ متری و اجرای سازه نگهدارنده و بتن ریزی و اجرای المان Anchor (مدل چهارم)

Fig. 22. Drilling up to 28-meter code and execution of supporting structure and concreting and execution of Anchor element (Model IV)



شکل ۲۳. مرحله حفاری سکوه‌های کناری و اجرای المان Anchor (مدل پنجم)

Fig. 23. Drilling stage of side platforms and execution of Anchor element (Model V)



شکل ۲۴. مرحله بعد از حفاری، بهره‌برداری (مدل ششم)
(Fig. 24. Post-drilling, operation stage (model VI))

جدول ۱۰. جابه‌جایی پی سازه، مراحل حفاری (بهره‌برداری)

Table 10. Structure foundation displacement, after excavation

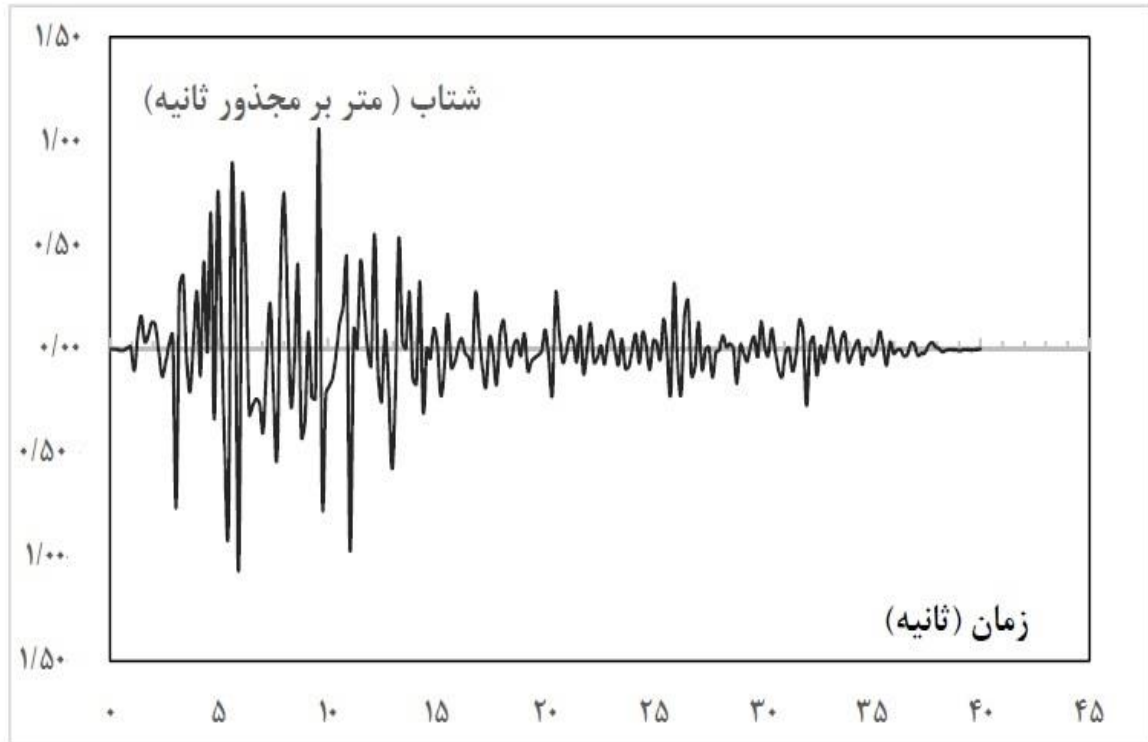
| مرحله (m) | جابه‌جایی‌های قائم زیر پی | | | جابه‌جایی‌های افقی زیر پی | | |
|-----------|---------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | (cm) | | | (cm) | | |
| | V_1 | V_2 | V_3 | u_1 | u_2 | u_3 |
| مدل دوم | -۳/۶۷ | -۳/۵۸ | -۳/۵۸ | -۰/۱۹ | -۰/۱۸ | -۰/۱۸ |
| مدل سوم | -۳/۷۴ | -۳/۶۶ | -۳/۶۷ | -۰/۱۷ | -۰/۱۶ | -۰/۱۶ |
| مدل چهارم | -۳/۷۹ | -۳/۷۲ | -۳/۷۳ | -۰/۱۶ | -۰/۱۶ | -۰/۱۶ |
| مدل پنجم | -۳/۹ | -۳/۸۵ | -۳/۸ | -۰/۱۷ | -۰/۱۷ | -۰/۱۷ |
| مدل ششم | -۳/۹ | -۳/۸۵ | -۳/۸ | -۰/۱۷ | -۰/۱۷ | -۰/۱۷ |

با توجه به نتایج تحلیلها، حفاری ایجاد شده در تمامی مدل‌ها باعث افزایش جابه‌جایی‌های افقی و قائم شده است. که در پی‌های V_2, V_1 و V_3 متوسط $1/2$ برابر نسبت به نتایج مرحله‌ی قبل از حفاری افزایش یافته است. جابه‌جایی‌های افقی نیز در مرحله قبل از حفاری نزدیک به صفر است که با ایجاد حفاری افزایش یافته است و بیشترین تأثیرات

انجام شده است. در فاز ششم حفاری سکوه‌های کناری و اجرای المان Anchor طبق شکل ۲۳ و در فاز هفتم که مرحله بعد از اجرا می‌باشد (مرحله بهره‌برداری) سازه‌های نگهدارنده حذف شده و نشست سازه طبق شکل ۲۴ محاسبه شده است.

جدول ۱۱. مشخصات رکورد Irpinia
Table 11. Record specifications

| ID رکورد زلزله | محل زلزله | ایستگاه ثبت شده | |
|----------------|------------------------------|----------------------|----------------|
| P0293 | Irpinia, Italy 1980/11/23 | Sturno ENEL/SEA99 | ITALY/A-STU000 |



شکل ۲۵. پاسخ شتاب زیر پی قبل از حفاری

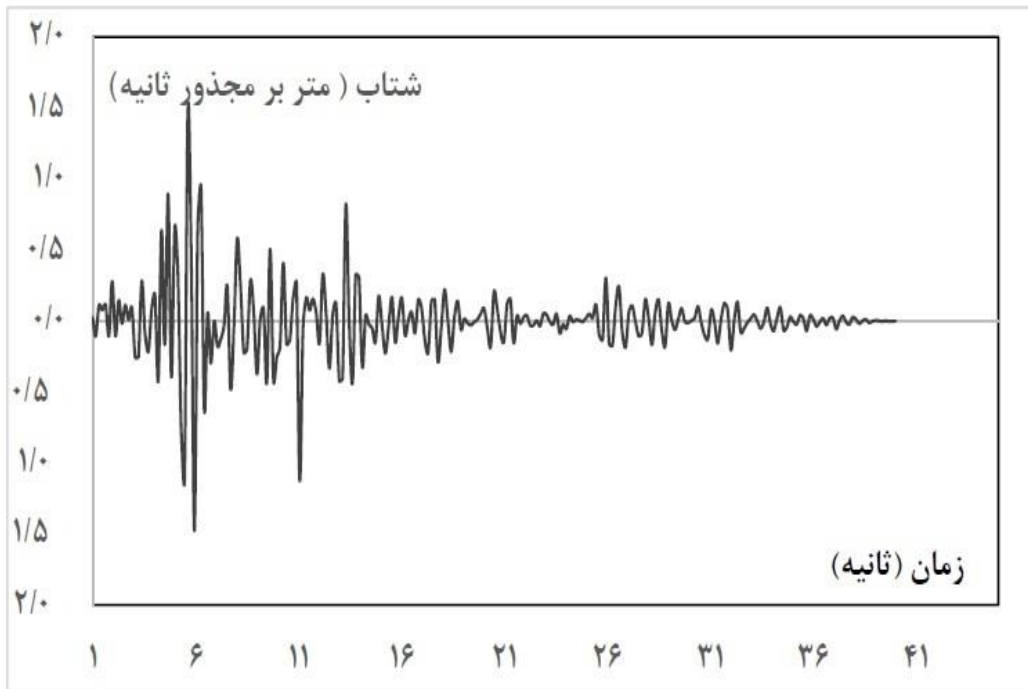
Fig. 25. Acceleration response under foundation before excavation

تنظیمات استاندارد استفاده شده است که برای رسیدن به زمان انتهایی تخمینی با دقت کافی براساس مش بندی تولید شده تعیین می‌نماید. اگر سرعت موج برشی خاک در یک مدل تفاوت‌های قابل توجه را نشان دهد و یا مش بندی خیلی کوچک باشد، تعداد استاندارد مراحل اضافی می‌تواند خیلی بزرگ باشد. در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ گام زمانی ۰/۰۲ انتخاب شده که از حاصل تقسیم مدت زمان وقوع زلزله بر گام زمانی به دست آمده است. نتایج تحلیلها در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ ارائه شده است.

در مدل ششم (مرحله بهره‌برداری) ایجاد شده است.

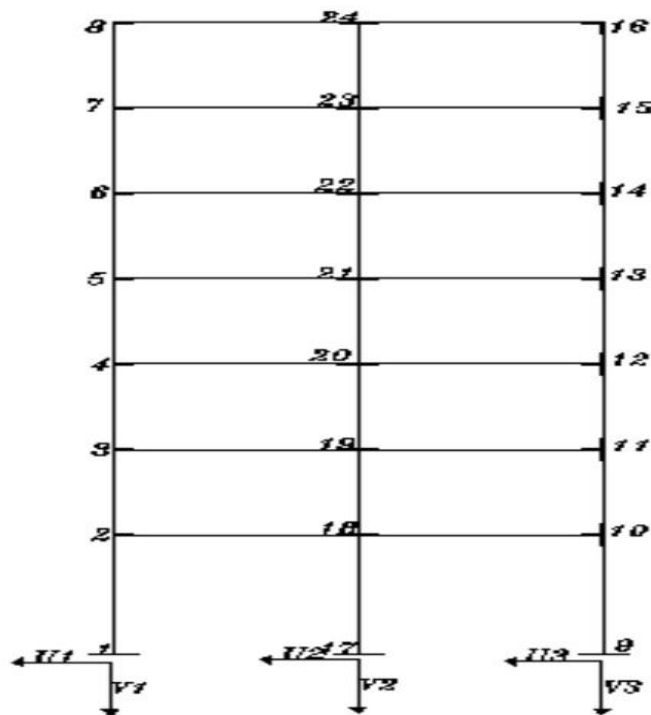
۷- تحلیل دینامیکی غیر خطی خاک

در نرم‌افزار PLAXIS تحلیل دینامیکی با رکورد Irpinia و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در دو مرحله‌ی جداگانه قبل و بعد از حفاری انجام گرفته و پاسخ شتاب در زیر پی (نقطه A) محاسبه شده است. هدف از این بخش بررسی تأثیر حفاری بر پاسخ شتاب و استفاده از آن در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ به عنوان ورودی جهت تحلیل سازه میباشد. در نرم‌افزار PLAXIS برای تعیین گام‌های زمانی از



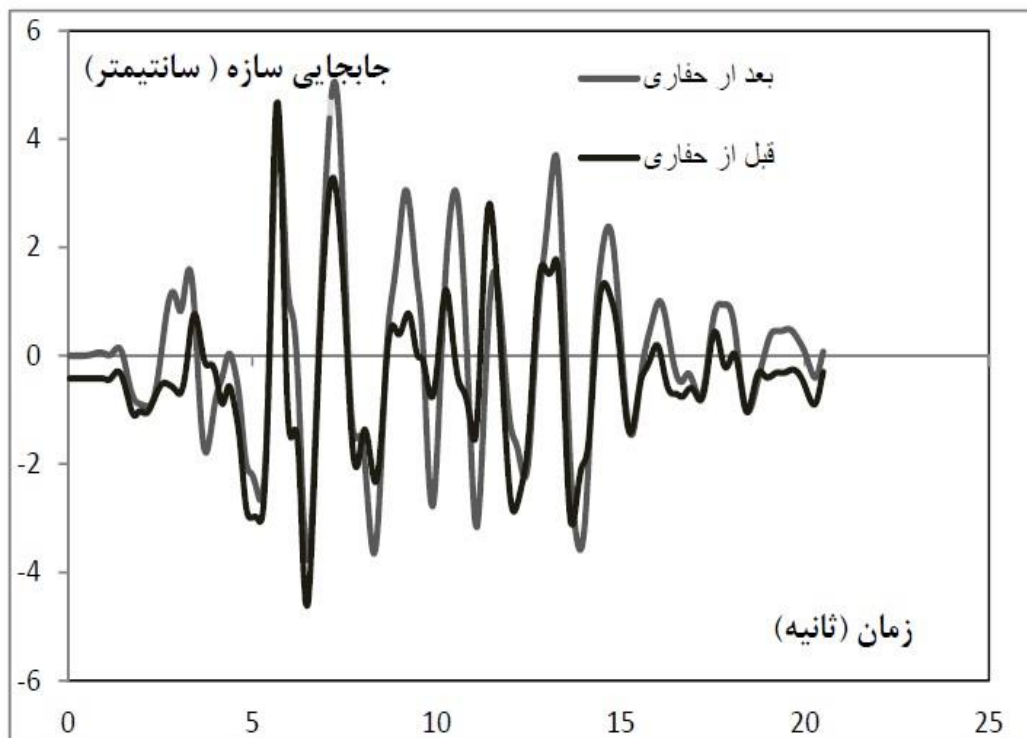
شکل ۲۶. پاسخ شتاب زیر پی بعد از حفاری

Fig. 26. Acceleration response under foundation after Excavation



شکل ۲۷. اعمال جابه‌جایی‌ها به تکیه‌گاه سازه در نرم‌افزار SAP 2000

Fig. 27. Applying displacements to structural support in SAP 2000 software



شکل ۲۸. مقایسه تغییر مکان سازه از زلزله

Fig. 28. Comparison of Structural Change

۸- تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه

در این بخش، سازه در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ مدل سازی شده و نتایج جابه جایی های تحلیل استاتیکی به پی سازه اعمال طبق شکل ۲۷ و با استفاده از پاسخ شتاب (خروجی PLAXIS) تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه در دو مرحله ای انجام گرفته است. در نهایت تغییرات پاسخ سازه در اثر حفاری بررسی شده که نتایج تحلیلها در شکل ۲۸ ارائه گردیده است.

با توجه به شکل ۲۸، تأثیر حفاری در پاسخ جابه جایی طبقه هفتم سازه نسبت به مرحله قبل از حفاری بیشترین جابه جایی سازه ۱/۱۵ برابر افزایش داشته است.

۹- نتیجه گیری

حفاریها از جمله تونلها می توانند باعث حرکت زمین شوند که این حرکتها به صورت نشست در سطح زمین نمایان می شوند. تونلها

ممکن است در مناطق شهری با تراکم جمعیت زیاد ساخته شوند، بنابراین نشست ایجاد شده بر ساختمانها و تأسیسات قرار گرفته در بالای تونل تأثیرگذار است. در این پژوهش ابتدا، جهت درست آزمایی نرم افزارها از مدل کاستالدو و همکاران استفاده شده که در سال ۲۰۱۴ در مقاله های که به بررسی تأثیر حفاری ایستگاه مترو ناپلز ایتالیا به مجاور ساختمان فلزی پرداخته بودند. تمامی مراحل پژوهش ایشان مدلسازی و تحلیل گردید. پس از صحت سنجی، پژوهش حاضر در یک تونل موردی واقع در تهران با استفاده از دو نرم افزار PLAXIS و SAP ۲۰۰۰ انجام شده است. برای تحلیل دینامیکی غیرخطی خاک از نرم افزار PLAXIS استفاده گردیده که به دلیل عدم قابلیت آن در تحلیل غیرخطی سازه ای از نرم افزار SAP 2000 جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه کمک گرفته شده است. در بخش اول در نرم افزار PLAXIS نشست زیر پی در دو مرحله ی قبل و بعد از حفاری محاسبه شده است. بخش دوم نیز در PLAXIS

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127(3): 203-224.
- [3] Moormann, C. (2004). "Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database." *Soils and foundations* 44(1): 87-98.
- [4] Doğangün, A., et al. (2007). "A study on seismic behavior of minarets considering soil-structure interaction."
- [5] Wang, J. (1993). "Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach, monograph, monograph 7." Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York.
- [6] Hashash, Y. M., et al. (2001). "Seismic design and analysis of underground structures." *Tunneling and underground space technology* 16(4): 247-293.
- [7] Cottonaro, R. D., et al. (2019). "Retrofitting of existing tunnels with concrete lining: a preliminary experimental investigation." *Retrofitting of existing tunnels with concrete lining: a preliminary experimental investigation*: 95-104.
- [8] Lunardi, G., et al. (2019). "Refurbish and static reinforcement of tunnels: innovative construction methods and materials." *Refurbish and static reinforcement of tunnels: innovative construction methods and materials*: 12-20.
- [9] Castaldo, P. and M. De Iuliis (2014). "Effects of deep excavation on seismic vulnerability of existing reinforced concrete framed structures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 64: 102-112.
- [10] Doğangün, A., et al. (2007). "A study on seismic behavior of minarets considering soil-structure interaction."
- [11] Castaldo, P., et al. (2013). "Probabilistic analysis of excavation-induced damages to existing structures." *Computers and Geotechnics* 53: 17-30.
- [12] Fatah El Zadeh, *Mechanical and Dynamic Modeling of Earth Structures in PLAXIS*, Publisher by Noavar (1394). (In Persian)
- [13] Gohari, Vafaiepor, *Finite Element Code for soil and Rock Analyses PLAXIS*, Publisher by Forozesh (1392)

تحلیل دینامیکی برای هر دو مرحله انجام گرفته و پاسخ شتاب در زیر پی محاسبه شده که هدف از این بخش بررسی تأثیر حفاری بر پاسخ شتاب و استفاده از آن در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ به عنوان ورودی جهت تحلیل سازه می باشد. در بخش سوم سازه در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ مدل سازی شده و نتایج جابه جایی هایی بخش اول به پی اعمال و با استفاده از پاسخ شتاب (خروجی PLAXIS) تحلیل دینامیکی غیر خطی زمانی سازه در دو مرحله انجام گرفته است. هدف اصلی از این پژوهش بررسی تأثیر حفاری تونل بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه ی مجاور بوده که در آن میزان تغییرات نشست زیر پی و تعیین نقش سازه های نگهبان و همچنین میزان تغییرات شتاب زیر پی و جابه جایی سازه ی موجود در اثر حفاری تونل محاسبه گردیده است. با توجه به اینکه اکثر محققین با تمرکز بر عواملی از قبیل نوع خاک، خصوصیات زمین شناسی، شرایط تنش اولیه، تأثیر آنیزوتروپی خاک، ضریب فشار جانبی در ارزیابی تأثیر حفاری تونل بر آسیب های وارده بر ساختمان تلاش نموده و کمتر به بررسی تأثیر وجود سازه های تونل و مراحل اجرا و عوامل مرتبط با آن بر نشست سازه پرداخته اند. لذا در این پژوهش مراحل اجرا و تأثیرات سازه های نگهبان حفاری در پاسخ دینامیکی و استاتیکی سازه موجود تأثیر داده شده و این نوآوری پژوهش می باشد. نتایج تحلیل ها نشان می دهد که در اثر حفاری تونل، نشست زیر پی سازه افزایش یافته است و بیشترین نشست ایجاد شده در اثر حفاری در مدل ۶ (مرحله بهره برداری) می باشد که متوسط ۱/۲ برابر، نشست نسبت به مرحله قبل از حفاری افزایش یافته است و تأثیر سازه های نگهبان در مراحل اجرا نسبت به مرحله بهره برداری که در آن دیوارهای کناری بتنی اجرا میشود در کاهش نشست ۴ درصد مؤثر بوده است. حداکثر شتاب زیر پی ۱/۵ برابر افزایش گردیده و در سازه نیز جابه جایی ۱/۲۵ برابر نسبت به پاسخ مرحله قبل از حفاری افزایش یافته است. کاربرد این تحقیق در شناسایی آسیب پذیری سازه ها قبل و بعد از ساخت می تواند مفید واقع شود.

مراجع

- [1] Castaldo, P., et al. (2014). "Structural safety of existing buildings near deep excavations." *International Journal of Structural Engineering* 5(2): 163-187.
- [2] Long, M. (2001). "Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations." *Journal of*

[15] Steven L. KRAMER, Geotechnical seismic, Mir Hoseini.
Research Earthquake Esfahan (1385). (In Persian)

(In Persian).

[14] Pak Neiat, Analyese dynamic Earthquake, Publisher by
Motafakeran (1392). (In Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Faraj Mohammadi, F. Behnamfar, S. J. Mohammadi, (2021). Effects of Urban Tunnel Excavation in Tehran in Response to Existing Static and Dynamic Structures in Terms of Soil and Structure Interaction Amirkabir J. Civil Eng., 53(5): 1889-1916.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17201.6493](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17201.6493)



