

مدل سازی عددی پاسخ دینامیکی و اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر ایستگاه مترو واقع در مجاورت گسل (مطالعه موردی: ایستگاه‌های خط ۲ مترو تبریز)

علیرضا عباس‌نژاد^{۱*}، ابوالفضل شهامت^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی مرنده، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی مرنده، دانشگاه تبریز

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

چکیده

گسترش استفاده از فضاهای زیرزمینی در شهرها لزوم توجه به طراحی آن در شرایط اضطراری نظیر زلزله، انفجار و غیره را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در این مقاله چهار ایستگاه خط ۲ متروی تبریز، ایستگاه فهمیده، باغمیشه، میدان عباسی و دانشگاه آزاد که در مسیر توسعه شمالی خط ۲ متروی تبریز هستند، انتخاب شده‌اند. از جمله عوامل مؤثر در پایداری این ایستگاه‌ها، وضعیت زمین‌شناسی، ویژگی‌های ژئومکانیکی خاک، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح به کار رفته، بارهای ترافیکی، مقدار جابه‌جایی‌ها در سازه و در خاک و تعیین مقدار نشست سطح زمین است. با در نظر گرفتن مقدار و میزان تأثیرگذاری این عوامل و به‌کارگیری آن‌ها با روش تحلیل عددی المان محدود پایداری ایستگاه‌های موردنظر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS در دو حالت (یک حالت برای سازه سه طبقه بتنی برای ایستگاه فهمیده، باغمیشه و عباسی و حالت دیگر برای سازه دوطبقه بتنی برای دانشگاه آزاد منظور گردید) بررسی شده است. همچنین تحلیل‌ها با در نظر گرفتن چهار شتاب‌نگاشت از چهار زلزله مختلف اتفاق افتاده در گذشته انتخاب شده که سه مورد ورزقان و کوبه و چی‌چی نزدیک گسل و زلزله ایمپریال دور گسل می‌باشد. طبق تحلیل‌های انجام شده، اثر شتاب بر روی خاک بیشتر بوده (هم در زلزله دور و هم نزدیک) ولی در زیرخاک و سازه شتاب یکسانی رخ داده است. اثر زلزله دور دو برابر زلزله‌های نزدیک گسل در جابه‌جایی جانبی طول سازه است. با افزایش ارتفاع سازه تنش سازه در زلزله‌های دور و نزدیک بیشتر می‌شود. مقدار نیرو برشی در نقاط مختلف سازه در زلزله دور نسبت به زلزله نزدیک بیشتر است و همچنین نشست سازه در زلزله ورزقان در ایستگاه‌های مطرح شده بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: خط ۲ متروی تبریز، ایستگاه زیرزمینی مترو، تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی، نرم‌افزار ABAQUS، روش المان محدود، حوزه نزدیک گسل.

۱- مقدمه

ایستگاه دانشگاه آزاد پشت دانشگاه آزاد واقع شده است. آگاهی از وضعیت پایداری و حل مشکلات احتمالی یک سازه، پیش از آغاز ساخت آن به طراح و مجری طرح، این امکان را می‌دهد که بتوانند بررسی فنی و اقتصادی صحیحی از شرایط ساخت و پایداری دائمی سازه انجام دهند. یک مهندس طراح و مجری حفاری و نگهداری ایستگاه مترو نیز می‌تواند با استفاده از تحلیل پایداری ایستگاه مترو نتایج مهمی در مورد پایداری ایستگاه و تجهیزات لازم برای نگهداری آن در هنگام ساخت و بهره‌برداری به‌دست آورد.

آنالیز سازه‌های زیرزمینی به دلیل اندرکنش با محیط پیرامون در حالت دینامیکی بسیار پیچیده می‌باشد. به همین دلیل تحقیقات کمتری در مورد آن‌ها انجام گرفته است. یکی از اولین

اولین بار در دی‌ماه سال ۱۳۶۹، موضوع مطالعات و احداث قطار شهری توسط نمایندگان محترم شهر تبریز در مجلس شورای اسلامی مطرح گردید. با توجه به رشد روزافزون سفرهای درون‌شهری در تبریز و ضرورت استفاده از سامانه حمل‌ونقل ریلی در راستای کاهش مشکلات ترافیکی، مطالعات خطوط قطار شهری تبریز انجام و شبکه قطار شهری تبریز شامل ۴ مسیر، جمعاً ۶۰ کیلومتر و ۶۳ ایستگاه طراحی گردید.

ایستگاه فهمیده، باغمیشه، میدان عباسی و دانشگاه آزاد در مسیر توسعه شمالی خط ۲ متروی تبریز واقع شده‌اند، که ایستگاه فهمیده در محدوده مرکز خرید و ایستگاه باغمیشه در محدوده بازار ماهی و ایستگاه عباسی در خود میدان عباسی و همچنین

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۴۲۲۶۰۰۳

خاک، فرکانس تحریک، ابعاد تونل، عمق ساخت تونل و انعطاف-پذیری پوشش تونل در مقایسه با خاک‌های اطراف تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخته شده است.

Zhang و Liang در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر حفره‌های زیرزمینی بر حرکت لرزه‌های زمین پرداختند. در این مطالعه تأثیر فاصله و طیف امواج ورودی با استفاده از روش المان مرزی اجزای محدود در حوزه زمان با استفاده از تبدیل فرکانس مورد مطالعه قرار گرفت.

Adampira و Alielahi در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تأثیرات لرزه‌ای سطح زمین به منظور دستیابی به روابط و جداول برای اصلاح طیف طراحی استاندارد سازه‌های واقع بر حفره‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حفره‌های زیرزمینی منجر به تشدید در دسته دوره تناوب طولانی و کاهش در دسته دوره تناوب کوتاه می‌شود و ماکزیمم بزرگنمایی در امواجی با طول موج بزرگتر اتفاق می‌افتد. همچنین تأثیر حفره بر پاسخ لرزه‌ای زمین به تدریج با افزایش عمق مدفون حفره از بین رفته می‌رود. از طرفی بیشترین مقادیر بزرگنمایی در نزدیک‌ترین فاصله بین سطح حفره و سطح زمین به علت امواج پراکنده به دام افتاده و اندرکنش‌های بین بخش بالایی حفره و سطح زمین اتفاق می‌افتد. تغییر شعاع حفره از یک دایره به شکل بیضی تأثیر زیادی بر پاسخ لرزه‌ای زمین داشته که به عنوان نتیجه حفره‌هایی با شعاع کمتر (حفره‌های بیضی) الگوی بزرگنمایی بیشتری در مقایسه با حفره‌های دایره‌ای دارند. فضای محصور شده توسط بخش بالایی حفره در بیشتر حفره‌های بیضی می‌تواند دلیل اصلی نتایج ذکر شده باشد، در واقع حفره‌های بیضی شکل دامنه جابه‌جایی بالاتری را به علت گسترش امواج پایدار بین سطح زمین و بخش بالایی حفره ایجاد می‌کنند.

Patil و همکاران در سال ۲۰۱۵ به‌طور وسیع روش‌های متعارف تعیین نیروهای لرزه‌ای در طراحی تونل‌ها را در نظر گرفتن مقادیر گوناگون اندرکنش خاک و تونل را مورد بررسی قرار دادند.

۲- مدل‌سازی عددی

Abaqus قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد.

امروزه به دلیل افزایش حملات تروریستی، تمامی مهندسان سازه و معمار جهان به تکاپو افتاده‌اند که راهکارهایی را برای کنترل خرابی‌ها یا جلوگیری از خرابی‌ها پیدا کنند. در ایران این تلاش به عنوان پدافند غیرعامل شناخته می‌شود. از این رو بر هر دانشجو یا استاد در زمینه مهندسی است که نحوه مدل‌سازی و برخورد با

کسانی که اثر زلزله بر روی سازه‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد نیومارک است. او در سال ۱۹۶۸ یک روش آسان برای محاسبه کرنش‌های نسبی سازه‌های لوله زیرزمینی و تونل‌های طولی ارائه کرد (Bozorgnia و همکاران، ۱۹۹۵).

Kuesel در سال ۱۹۶۹ برای محاسبه نیروهای زلزله بر روی تونل‌های خطی روش ساده‌ای بنا نهاد که در اکثر موارد مبنای کار سایرین است.

Douglas و Warsaw در سال ۱۹۷۱ نتایج آنالیز طراحی یک تونل تحت اثر زلزله را ارائه کردند.

Lee و Trifunac در سال ۱۹۷۹ پاسخ تونل پوشش‌دار را تحت اثر موج برشی مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۸۱، مطالعات Scholl و Owen برای سازه‌های زیرزمینی در مواجهه با ارتعاشات لرزه‌ای سه دسته از تغییر شکل‌ها را شامل تغییر شکل‌های فشاری-کششی، خمش طولی و تغییر شکل‌های لوزی‌شدگی و بیضی‌شدگی را مدنظر قرار می‌دهند.

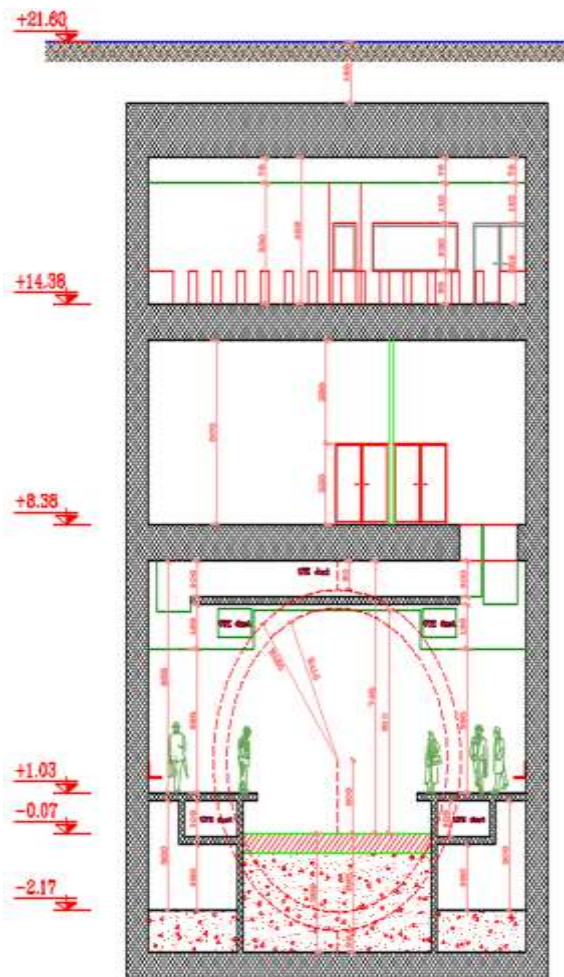
Karl در سال ۱۹۹۲ پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای و استوانه‌ای شکل برای امواج مهاجم افقی و قائم برشی (SH, SV) در محیط همگن و همسان الاستیک در ناحیه نیم فضا در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بزرگنمایی‌ها در حدود ۴ تا ۸ برابر نسبت به حالت بدون تونل در حالت $R/X=2/5$ (فاصله مرکز حفره به شعاع حفره) می‌باشد.

J.W. Liang و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی بزرگنمایی حرکت زمین به علت گروه حفره‌های زیرزمینی پرداختند. در این تحقیق با استفاده که با استفاده از روش بسط سری بسط-فوریه انجام شد، ملاحظه گردید که گروه حفره‌های زیرزمینی به‌طور قابل توجهی باعث تشدید حرکت سطح زمین گردید. حداکثر بزرگ-نمایی جابه‌جایی سطحی برای حفره تکی $2/5$ برابر حالت بدون حفره و حداکثر بزرگنمایی جابه‌جایی سطحی برای حالت دو حفره $2/5$ برابر حالت حفره تکی و 6 برابر حالت بدون حفره است. De Barros و Luco در سال ۱۹۹۴ با روش محاسبه انتگرال مرزی غیرمستقیم، بر مبنای توابع گرین برای یک نیم فضای ویسکوالاستیک به بررسی پراکندگی امواج هارمونیک توسط یک حفره استوانه‌ای بدون پوشش پرداختند. در این تحقیق حفره در محیط نیم فضا در معرض امواج مهاجم SH, SV, P و موج رأیلی با زاویه تابش قائم و مایل نسبت به محور حفره قرار گرفت (Yiouta-Mitra و همکاران، ۲۰۰۷).

در سال ۲۰۰۷ به‌منظور بررسی اثر سازه‌های زیرزمینی بر حرکت لرزه‌ای سطح زمین، تحلیل‌های عددی دینامیکی کرنش مسطح را انجام دادند که در آن یک تونل دایره‌ای در یک محیط نیم‌صفحه ویسکوالاستیک تحت اثر موج هارمونیک SV قرار گرفته است. روش عددی این تحقیق روش تفاضل محدود و استفاده از نرم‌افزار FLAC بوده و در این تحقیق به بررسی اثرات ویژگی‌های

اما ایستگاه دانشگاه آزاد در دو طبقه طراحی شده طول و عرض این هم طبق اعداد فوق، طراحی شده و ارتفاع متوسط ایستگاه از بالاترین نقطه در سقف تا پایین ترین نقطه در کف ۷/۵۷ متر است و کف ایستگاه آن در عمق ۱۴/۵۵ متری از سطح زمین واقع شده است. بنابراین این ایستگاه از نظر رده بندی عمق ایستگاه‌ها، از نوع ایستگاه‌های زیرزمینی با عمق متوسط است. طراحی این ایستگاه‌ها به طور میانگین در عمق حدود ۵۰ متری زیر سطح خاک قرار گرفته است. در شکل (۱) پلان تپ طبقات ایستگاه خط ۲ متروی تبریز ارائه شده است. همچنین در شکل (۲) برش ایستگاه‌های مترو فهمیده، باغمیشه و عباسی و در شکل (۳) برش ایستگاه زیرزمینی دانشگاه آزاد نشان داده شده است.

برای انجام این مدل سازی ابتدا دو سازه سه طبقه بتنی و دو طبقه بتنی، با توجه به نقشه های سازمان مترو تبریز داده شده در نرم افزار Abaqus طراحی شده است.

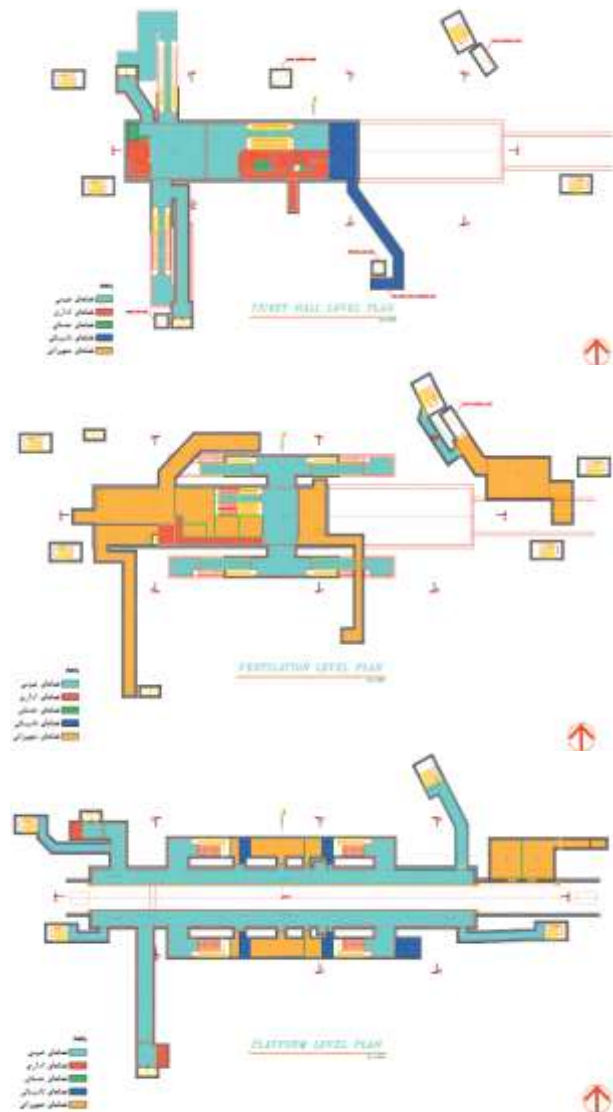


شکل ۲- برش ایستگاه‌های مترو (فهمیده، باغمیشه و عباسی)
(مهندسین مشاور پژوهش عمران راهور، ۱۳۸۷)

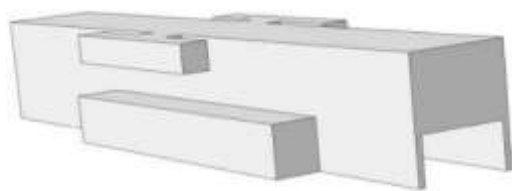
این بار را یاد گرفته و آن را تعمیم دهد تا بتواند نتیجه ای درست از آن گرفته و قدم مثبتی را در این راستا بردارد. این امر میسر نمی شود مگر با مطالعه فراوان و آشنایی با انواع مدل سازی هایی که در رابطه با بار انفجار در نرم افزارهای المان محدود مختلف انجام می شود.

۱-۲- مشخصات هندسی ایستگاه

بر اساس نقشه های معماری، ایستگاه های میدان عباسی و میدان فهمیده و باغمیشه در سه طبقه طراحی شده و طول این ایستگاه در حدود ۱۱۶/۱۵ متر بوده و عرض مفید آن ۲۸/۸۰ متر است. ارتفاع متوسط ایستگاه از بالاترین نقطه در سقف تا پایین ترین نقطه در کف ۷/۵۷ متر است و کف ایستگاه آن در عمق ۱۹/۵۰ متری از سطح زمین واقع شده است.



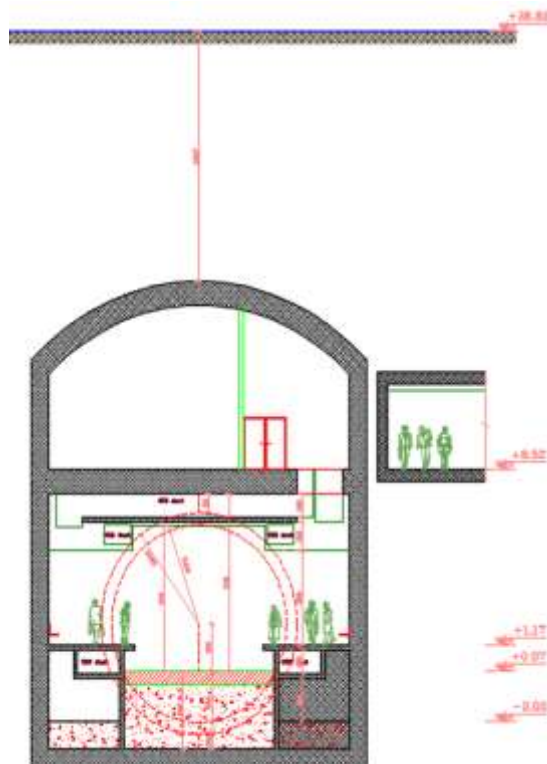
شکل ۱- پلان تپ طبقات ایستگاه خط ۲ متروی تبریز
(مهندسین مشاور پژوهش عمران راهور، ۱۳۸۷)



شکل ۴- نمای سازه سه بعدی مدل شده در محیط ABAQUS



شکل ۵- نمای خاک سه بعدی مدل شده در محیط ABAQUS



شکل ۳- برش ایستگاه زیرزمینی (دانشگاه آزاد) (مهندسی مشاور پژوهش عمران راهور، ۱۳۸۷)

۲-۲-۱- مصالح سازه و خاک

جهت معرفی مشخصات المان‌های به کار گرفته شده در مدل سازه از سه جنس مصالح به شرح جدول (۱) استفاده شده است:

جدول ۱- معرفی مشخصات المان‌ها	
المان سازه‌ای	جنس
طبقات	Concrete Story
دال بتنی	Concrete
خاک	Soil

برای بتن از مدل Concrete Damage Plasticity استفاده شده است و یک ماده همگن و ایزوتروپیک فرض گردیده است. داده‌های در نظر گرفته شده به صورت جدول (۲) می‌باشد. همچنین پارامترهای مربوط به رفتار فشاری و کششی بتن به- ترتیب در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۲- سایر مشخصات مربوط به شکل پذیری بتن

دانسیته	۲۳۵۰
مدول الاستیسیته بتن	۲/۴e۹
ضریب پواسون	۰/۲۵
زاویه اتساع	۳۶
گریز از مرکزیت	۰/۱
Fb۰/Fc۰	۱/۱۶
k	۰/۱۶۶
ویسکوزیته	۰

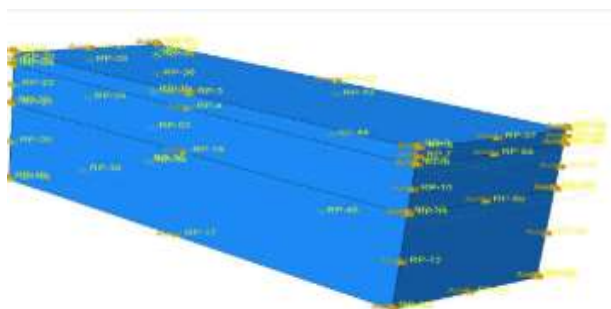
۲-۲-۲- مدل سازی ایستگاه

در این قسمت المان‌های سازه‌ای از جمله سازه طبقات، دال بتنی و خاک در اندازه واقعی برحسب متر ترسیم و ذخیره می‌گردد. جهت مدل سازی سازه طبقات، دال بتنی و خاک از المان Solid استفاده می‌گردد، گرچه می‌توان از Solid و یا Shell نیز استفاده نمود اما با توجه به این که Wire به صورت دوگره‌ای می‌باشد مدل سازی و Orientation تیرها و ستون‌ها بایستی با دقت خاصی صورت گیرد اما هزینه محاسبات و آنالیز نرم افزار به صورت قابل توجهی کاهش میابد و دقت و درستی نتایج تا حدود زیادی افزایش میابد که این امر در مورد مدل سازی به صورت Solid به علت افزایش المان‌ها و گره‌ها و متعاقباً افزایش نیروهای گرهی ایجاد شده در سازه و پیچیده شدن روابط حل معادلات هزینه محاسبات به شدت افزایش یافته و دقت نتایج کاهش می‌یابد. برای مدل سازی سازه و همچنین خاک از المان Solid استفاده شده است. ابعاد خاک در همه مدل‌ها ۱۳۷×۴۴ متر و به عمق ۵۰ متر در نظر گرفته شده بدین صورت که با بزرگ تر کردن بیش از حد ابعاد خاک سبب بالا رفتن هزینه‌های محاسباتی می‌گردد. در شکل‌های (۴) و (۵) به- ترتیب نماهای سازه سه بعدی و دوبعدی مدل شده در محیط ABAQUS نشان داده شده است.

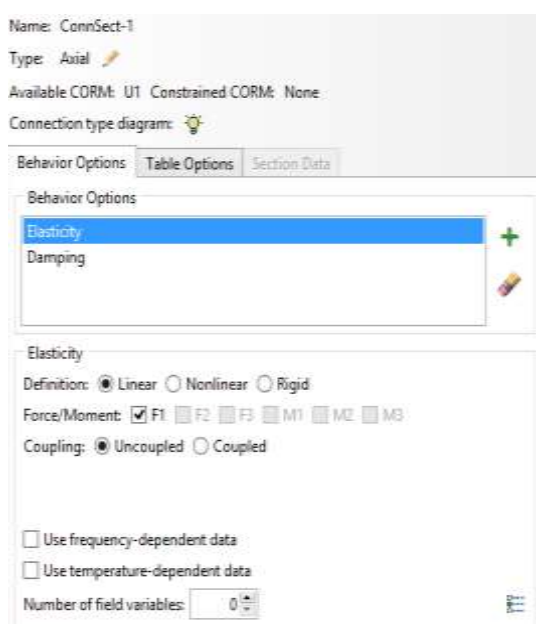
به دست می‌آید (Ashghabadi و Matinmanesh, ۲۰۱۱).

$$F_d = C_d \dot{u} \quad (1)$$

\dot{u} سرعت در میرایی ویسکوز C_d ضریب میرایی ویسکوز F_d نیروی میرایی ویسکوز (مقدار ثابت) و همچنین برای محاسبه سختی فنر، سختی هر لایه خاک را وارد کرده‌ایم. دو نوع المان فنر و میراگر در نرم‌افزار ABAQUS وجود دارد. در ABAQUS/Standard فقط المان یک گروهی وجود دارد. در فقط از نوع ABAQUS/Explicit دو گروهی می‌توان استفاده کرد. با توجه به این که در این پایان‌نامه برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه ABAQUS/Explicit زمانی از استفاده شده است المان‌های فنر و میراگر در ماژول Interaction با استفاده از منوی با استفاده از منوی Greate connector section تعریف می‌شود. برای تعریف فنر و دمپر از آیکن Greate connector section که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶- نمای سازه پس از اعمال Interaction مدل شده در محیط ABAQUS



شکل ۷- تعریف فنر و دمپر به سازه

جدول ۳- رفتار فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

فشار کششی	تنش Yield stress
۰	۵۰۰۰۰۰
۰/۰۰۳	۲۰۰۰۰۰

جدول ۴- رفتار کششی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

ترک‌خوردگی کرنش Cracking Strain	تنش Yield stress
۰	۵۰۰۰۰۰
۰/۰۰۲	۱۰۰۰۰۰

برای مدل‌سازی عددی بستر خاکی محل احداث ایستگاه‌ها، سه نوع لایه برای سازه سه طبقه (خاک دستی، مارن و رس) و برای سازه دو طبقه دو نوع لایه (مارن و رس) در نظر گرفته شده است. در جدول (۵) مشخصات لایه‌های خاک در نظر گرفته شده در مدل عددی ارائه شده است (کاغذچی، ۱۳۹۳).

جدول ۵- مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

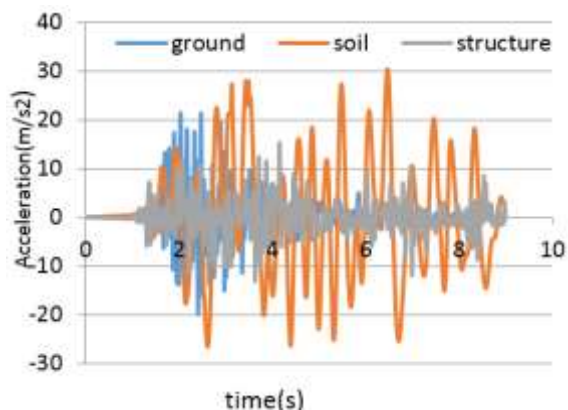
	خاک دستی	خاک مارن	خاک رس
Density (kg/m ³)	۱۵۲۰	۱۶۵۰	۱۸۰۰
E (kg/m ²)	۵e۷۵	۵e۱۲۰	۵e۲۹۸
Poisson	۰/۳	۰/۳	۰/۳۵
Friction Angel	۲۰	۲۰	۲۵
Dilation angel	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Cohesion (kg/m ²)	۳e۵	۴e۱۰	۶e۱۲

۲-۲-۲- قسمت برهم‌کنش

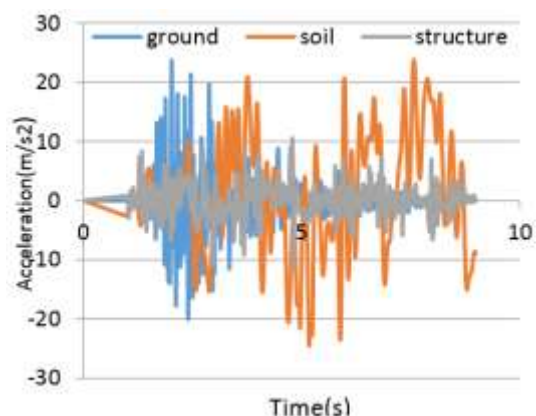
برای بارگذاری مرده سازه از آنالیز dynamic explicit با زمان آنالیز ۱ ثانیه‌ای استفاده شده است و نیز از یک آنالیز dynamic explicit دیگر در دو حالت با بارگذاری‌های لرزه‌ای با زمان آنالیز ۷/۹۸ ثانیه‌ای برای زلزله ورزقان و زمان آنالیز ۷/۹۹ ثانیه‌ای برای زلزله ایلمپریاولی و زمان آنالیز ۸ ثانیه‌ای برای زلزله کوبه و زمان آنالیز ۹/۱۱۵ ثانیه‌ای برای زلزله چی‌چی تایوان با عنوان Step 2 استفاده شده است. در قسمت Interaction برای اعمال تماس اصطکاکی سازه و خاک از گزینه Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شده است و همچنین برای فنر و دمپر گذاشتن روی خاک بانام Axial در لایه‌های مختلف خاک باسختی فنر متفاوت و دمپر متفاوت تعریف شده است. در شکل (۶) نمای سازه پس از اعمال Interaction مدل شده در محیط ABAQUS نمایش داده شده است. با توجه به نیمه بی‌نهایت بودن مدل واقعی، انرژی لرزه‌ای وارد شده به مدل بایستی از طریق مرزها خارج شود (میرایی هندسی). روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی (Absorbent boundary) وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرز ویسکوز است. در این روش المان‌های میراگر در مرزها قرار داده شده که ضریب این المان‌های میراگر از روابط زیر

۳-۲-۲- بارگذاری

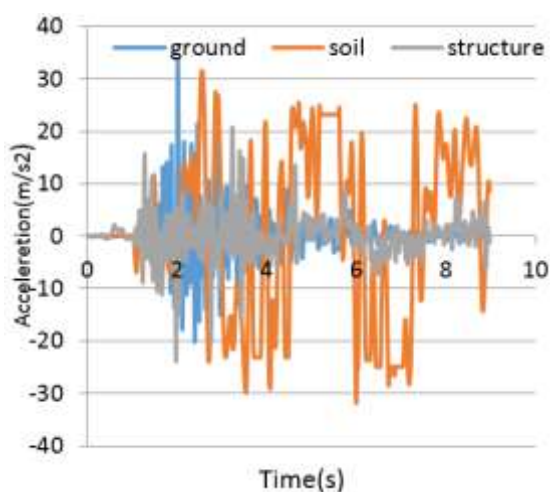
برای مدل سازی بارهای ثقلی و بارهای جانبی، دو step تعریف شده است. در step اول بار ثقلی به صورت یک فشار یکنواخت برابر 5600 kg/m^2 (بار تانک) سطح خاک وارد شده است. بارگذاری لرزه ای در step 2 برای اعمال شتاب در زیر بستر از گزینه acceleration در جهت y استفاده شده که به صورت جدول از شتاب نگاشت، ورزقان، کوبه، چی چی تایوان و ایمپریاولی استفاده شده است.



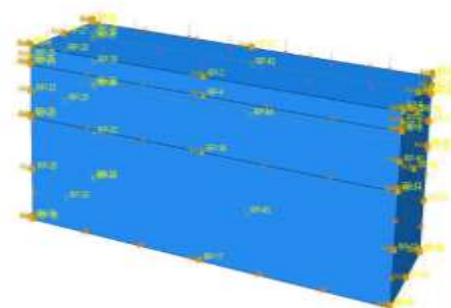
شکل ۱۰- اثر شتاب بر روی سازه و خاک ایستگاه فهمیده و باغمیشه- زلزله ورزقان



شکل ۱۱- اثر شتاب بر روی سازه و خاک ایستگاه میدان عباسی- زلزله ورزقان



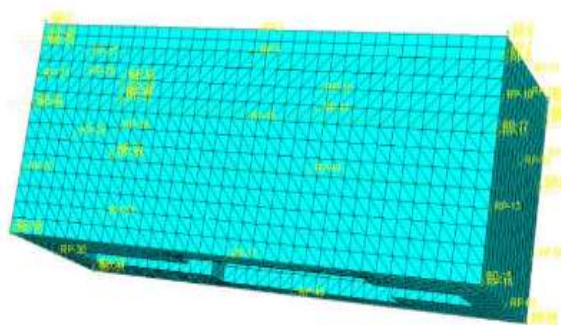
شکل ۱۲- اثر شتاب بر روی سازه و خاک ایستگاه دانشگاه آزاد- زلزله ورزقان



شکل ۸- مدل سازه پس از اعمال بارگذاری و شرایط مرزی مربوطه

۳-۲-۲- قسمت Mesh

در قسمت Mesh برای مش بندی و اجزای محدود از گزینه Tet برای سازه و خاک استفاده شده که در شکل (۹) مدل با مش بندی اعمال شده را نشان می دهد.

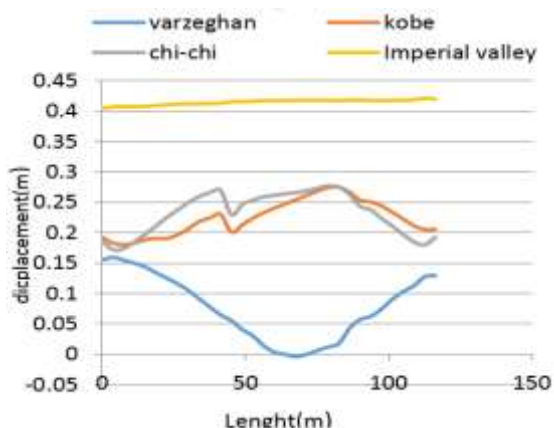


شکل ۹- مدل سازه پس از مش بندی المان ها

۳- بحث و نتایج

۳-۱- اثر شتاب بر روی سازه و خاک

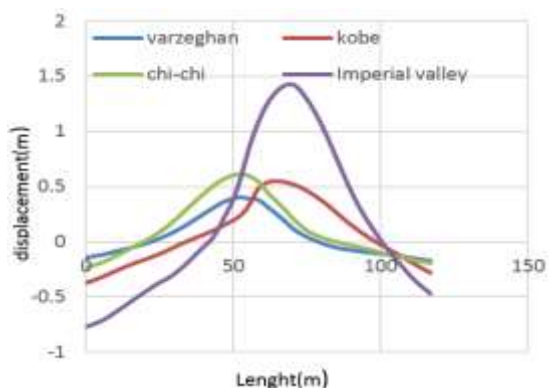
در شکل (۱۰) اثر شتاب زمین مربوط به زلزله ورزقان و پاسخ آن در خاک و سازه برای ایستگاه میدان فهمیده نشان داده شده است. همچنین در شکل های (۱۱) و (۱۲) پاسخ خاک و سازه



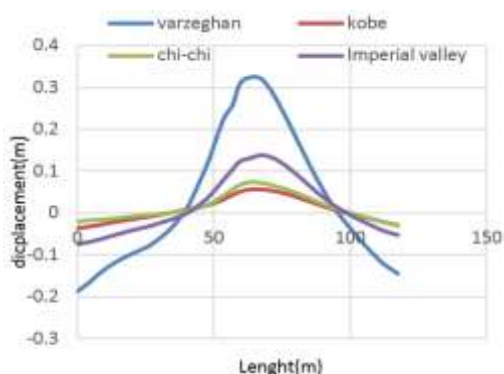
شکل ۱۵- جابه‌جایی جانبی در طول سازه در لحظه پوش - ایستگاه دانشگاه آزاد

۳-۳- جابه‌جایی قائم روی سازه

جابه‌جایی قائم در تمام ایستگاه‌ها و تحت تمامی رکوردها در وسط سازه رخ می‌دهد (شکل ۱۶) تا (۱۸). اما زمین لرزه‌های کوبه و چی‌چی کمترین جابه‌جایی قائم را در تمام ایستگاه‌ها ایجاد کرده در حالی که در ایستگاه فهمیده زلزله امپریال و در دو ایستگاه دیگر زلزله ورزقان، بیشترین جابه‌جایی قائم را ایجاد کرده است.



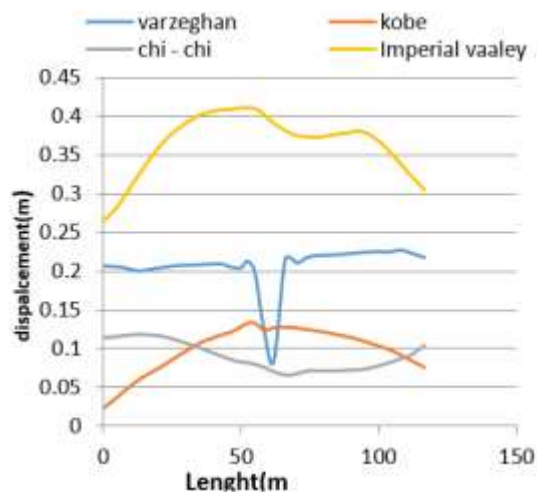
شکل ۱۶- مقدار جابه‌جایی قائم در طول سازه در لحظه پوش - ایستگاه فهمیده، باغمیشه



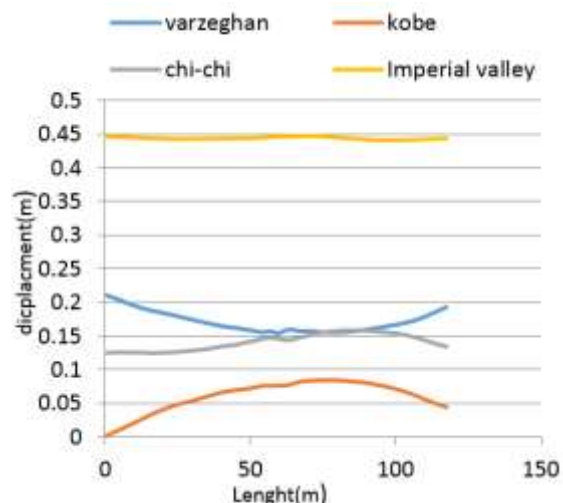
شکل ۱۷- مقدار جابه‌جایی قائم در طول سازه در لحظه پوش - ایستگاه عباسی

۲-۳- جابه‌جایی جانبی بر روی سازه

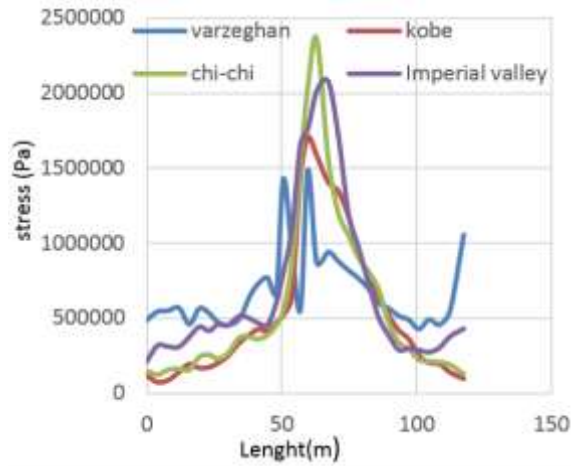
در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) جابه‌جایی جانبی سازه ایستگاه‌ها در راستای طولی، تحت زلزله‌های مختلف بررسی شده است. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) می‌توان متوجه شد جابه‌جایی جانبی سازه تمام ایستگاه‌ها تحت رکورد زلزله امپریال بیشتر از بقیه بوده و در طول سازه‌ها اثر ثابتی دارد، در حالی که سه رکورد دیگر اثرات کمتری داشته اما در طول سازه جابه‌جایی‌ها اختلاف بیشتری دارند. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) می‌توان متوجه شد جابه‌جایی جانبی سازه تمام ایستگاه‌ها تحت رکورد زلزله امپریال بیشتر از بقیه بوده و در طول سازه‌ها اثر ثابتی دارد، در حالی که سه رکورد دیگر اثرات کمتری داشته اما در طول سازه جابه‌جایی‌ها اختلاف بیشتری دارند.



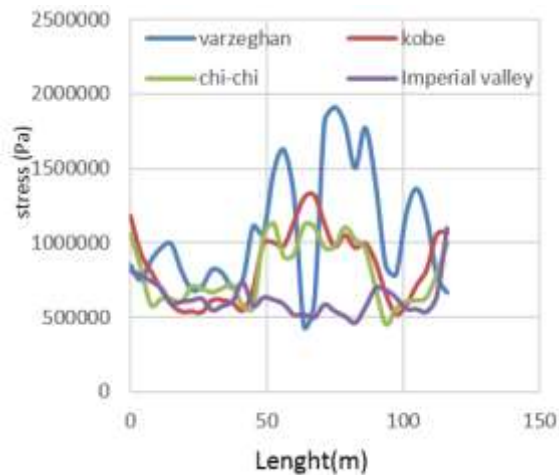
شکل ۱۳- جابه‌جایی جانبی در طول سازه در لحظه پوش - ایستگاه فهمیده، باغمیشه



شکل ۱۴- جابه‌جایی جانبی در طول سازه در لحظه پوش - ایستگاه عباسی



شکل ۲۰- مقدار تنش در عمق سازه در لحظه پوش- ایستگاه عباسی

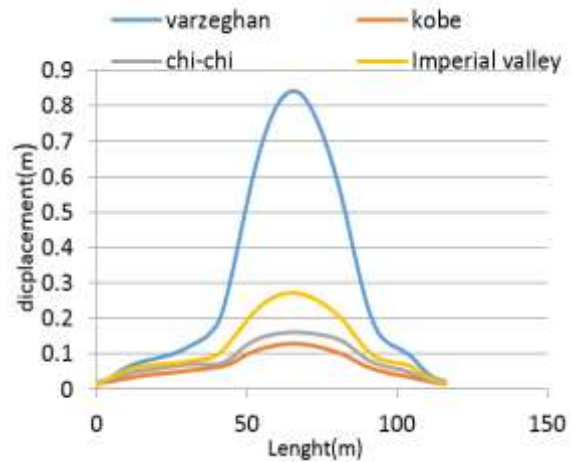


شکل ۲۱- مقدار تنش در عمق سازه در لحظه پوش- ایستگاه دانشگاه آزاد

۳-۵- نیروی برشی در نقاط مختلف سازه

جهت بررسی توزیع تنش‌های برشی در سازه، نیروهای برشی حداکثر به دست آمده از تحلیل در نقاط مختلف سازه تحت زلزله- های متفاوت استخراج گردیده است. نقاط انتخابی برای استخراج نیروهای برشی، در شکل (۲۲) علامت گذاری و ارائه شده است، که در گراف‌های ارائه شده در شکل‌های (۲۳) تا (۲۵) نتایج حاصل از تحلیل تنش‌های برشی به صورت نیروی‌های برشی در نقاط انتخابی، نمایش داده شده است.

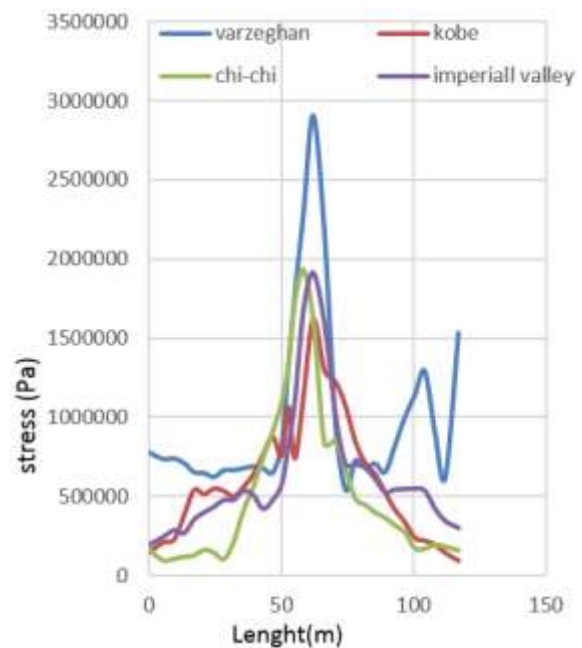
همان‌طور که مشخص است، تحت تمامی رکوردها در وسط سازه ایستگاه بیشترین نیروی برشی ایجاد شده است. همچنین زلزله امپریال و ورزقان نیروی برشی بیشتری در سازه ایستگاه‌ها ایجاد کرده‌اند.



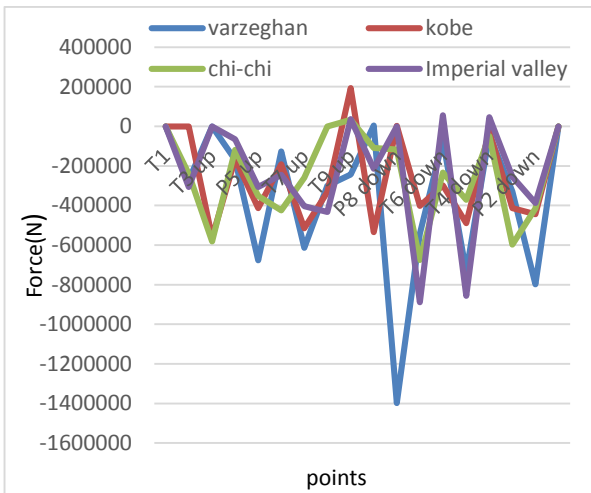
شکل ۱۸- مقدار جابه‌جایی قائم در طول سازه در لحظه پوش- ایستگاه دانشگاه آزاد

۴-۳- تنش در عمق سازه

همان‌طور که از شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) قابل استناد است، در عمق سازه ایستگاه‌های فهمیده و عباسی تحت همه رکوردها در وسط سازه شاهد بیشترین تنش هستیم اما در ایستگاه آزاد نظم خاصی در تنش عمق سازه قابل مشاهده نیست.



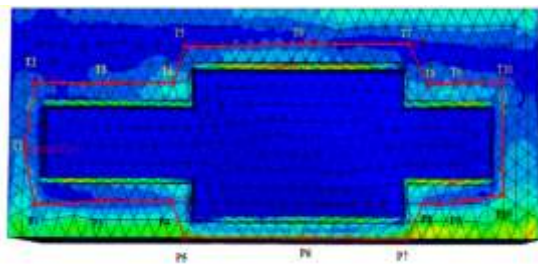
شکل ۱۹- مقدار تنش در عمق سازه در لحظه پوش- ایستگاه فهمیده، باغ‌میشه



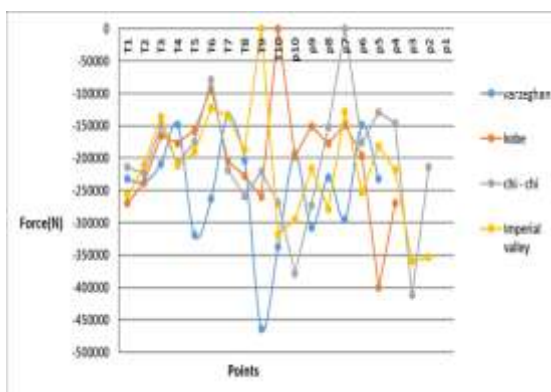
شکل ۲۵- مقدار نیرو برشی در نقاط مختلف سازه در لحظه پوش - ایستگاه دانشگاه آزاد

۳-۶- نیروی محوری در نقاط مختلف خاک

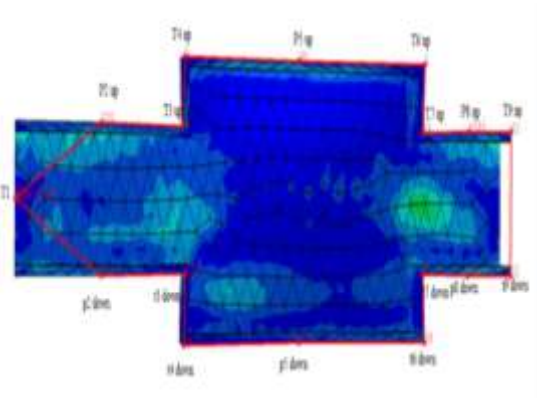
به منظور بررسی توزیع تنش‌های محوری ناشی از زلزله در نقاط مختلف خاک اطراف سازه، نیروهای محوری حداکثر حاصل از تحلیل عددی در نقاط مختلف تحت زلزله‌های متفاوت استخراج گردیده است. نقاط انتخابی برای استخراج نیروهای محوری، در شکل (۲۶) ارائه شده است و در گراف‌های ارائه شده در شکل‌های (۲۷) تا (۲۹) نتایج حاصل از تحلیل تنش‌های محوری به صورت نیروی‌های محوری در نقاط انتخابی، نمایش داده شده است.



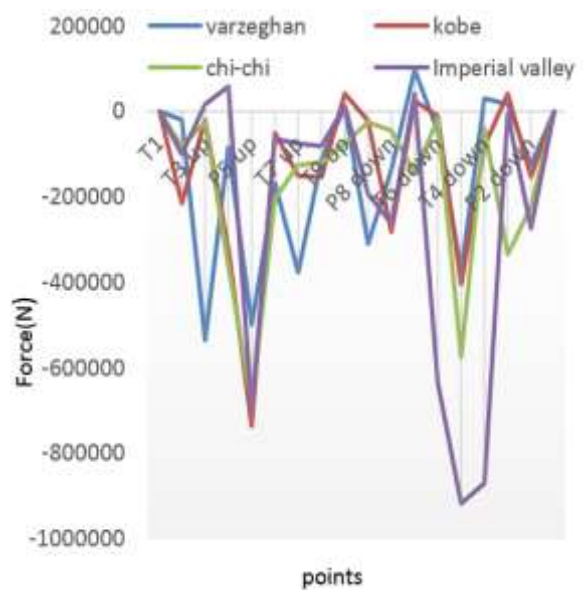
شکل ۲۶- محل نقاط انتخاب شده در خاک



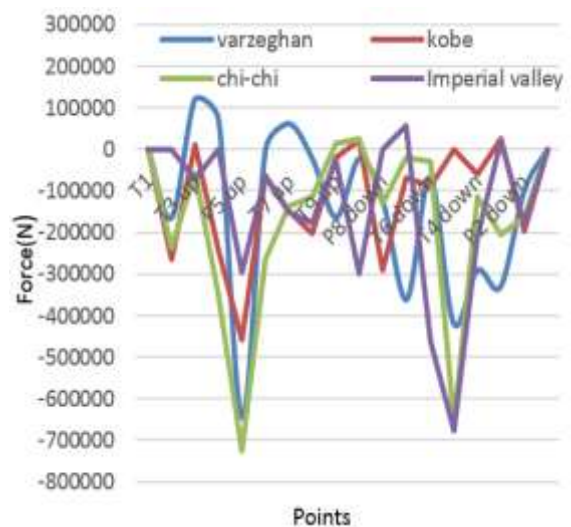
شکل ۲۷- مقدار نیرو محوری در نقاط مختلف خاک در لحظه پوش - ایستگاه فهمیده، باغمیشه



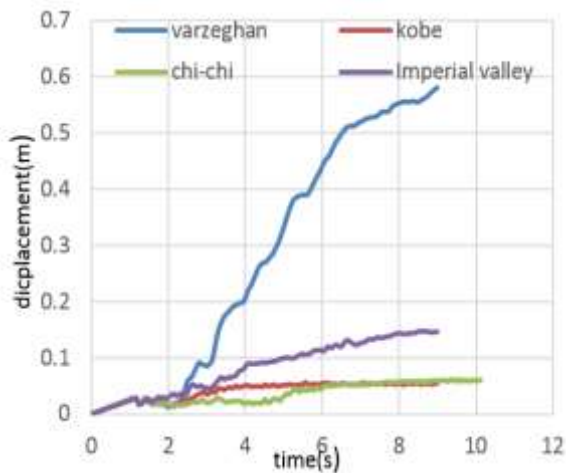
شکل ۲۲- محل نقاط انتخاب شده در سازه



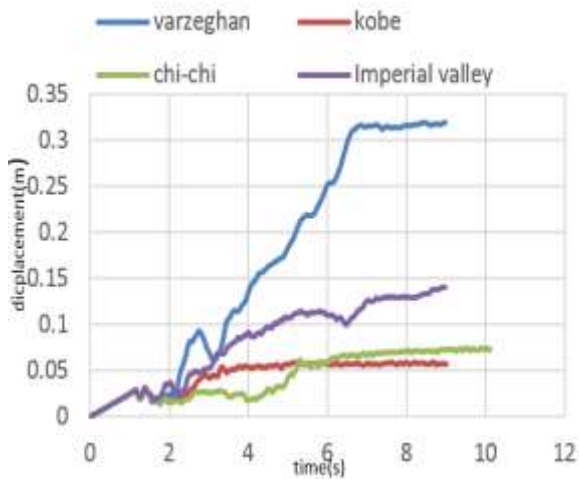
شکل ۲۳- مقدار نیرو برشی در نقاط مختلف سازه در لحظه پوش - ایستگاه فهمیده، باغمیشه



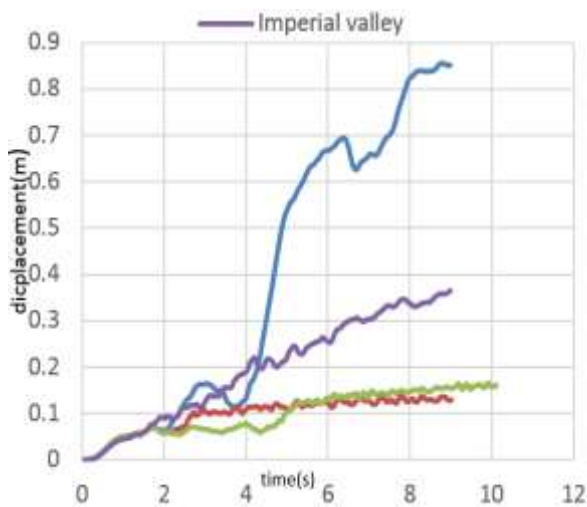
شکل ۲۴- مقدار نیرو برشی در نقاط مختلف سازه در لحظه پوش - ایستگاه عباسی



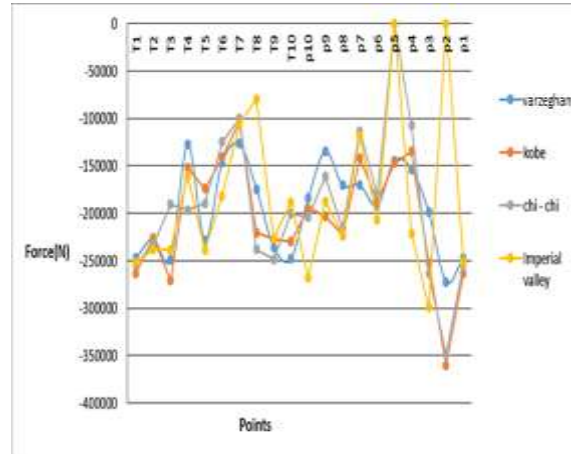
شکل ۳۰- مقدار نشست سازه- ایستگاه فهمیده، باغمیشه



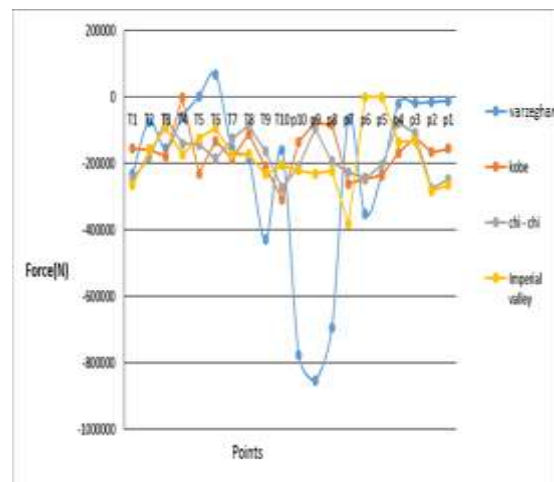
شکل ۳۱- مقدار نشست سازه- ایستگاه عباسی



شکل ۳۲- مقدار نشست سازه- ایستگاه دانشگاه آزاد



شکل ۲۸- مقدار نیرو محوری در نقاط مختلف خاک در لحظه پوش- ایستگاه عباسی



شکل ۲۹- مقدار نیرو محوری در نقاط مختلف خاک در لحظه پوش- ایستگاه دانشگاه آزاد

همان‌طور که مشخص است، تحت تمامی رکوردها در نقاط میانی، بیشترین نیروی محوری ایجاد شده است. همچنین زلزله امپریال و ورزقان نیروی محوری بیشتری ایجاد کرده‌اند.

۳-۷- نشست سازه

بر اساس تحلیل‌های عددی صورت گرفته، مقدار نشست سازه ایستگاه‌ها در اثر نیروهای ناشی از زلزله‌های مختلف در شکل‌های (۳۰) تا (۳۲) ارائه شده است. همان‌طور که از گراف‌های ارائه شده برمی‌آید، رکوردهای زلزله ورزقان به‌طور قابل توجهی بیشترین نشست را در تمامی ایستگاه‌ها سبب شده و دو زلزله چی‌چی و کوبه کمترین نشست را در همه ایستگاه‌ها ایجاد کرده‌اند.

Kuribayashi E, Iwasaki T, Kawashima K, "Dynamic behavior of a subsurface tubular structure", Proceedings of the Fifth Symposium on Earthquake Engineering, 1974, India.

Lee VJ, Karl J, "Diffraction of SV waves by underground", Circular, Cylindrical Cavities, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 11 (8) 445-456.

Lee V, Trifunac MD, "Response of tunnels to incident SH-waves", Journal of the Engineering Mechanics Division, 1979, 105 (4), 643-659.

Liang J, Zhang J, Ba Z, "The effect of underground cavities on design seismic ground motion", Proceedings of 15 World Conference Earthquake Engineering, Lisbon, Paper ID, 2012.

Liang JW, Zhang H, Lee VW, A, "Series solution for surface motion amplification due to underground group cavities: Incident P waves", Acta Seismologica Sinica, 2004, 17 (3), 296-307.

Luco J, De Barros F, "Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23 (3), 321-340.

Owen GN, Scholl RE, "Earthquake engineering of large underground structures", Report Number FHWA/RD-80/195, prepared for the Federal Highway Administration and National Science Foundation, 1981.

P. Yiouta-Mitra G, Kouretzis G, Bouckovalas A, Sofianos, "Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures", Dynamic Response and Soil Properties, 2007, 1-10.

Patil M, Choudhury D, Ranjith PG, Zhao J, "Seismic analysis of tunnels in soft soils: a state-of-the-art review", In: Proc of the International Conference on Soft Ground Engineering (ICSGE 2015), December 3-4, 2015, Singapore, pp. 625-634.

۴- نتیجه گیری

- ۱) با بررسی نتایج در ایستگاه‌های مطرح شده اثر شتاب بر روی خاک بیشتر بوده (هم در زلزله دور و هم نزدیک) ولی در زیرخاک و سازه شتاب یکسانی رخ داده است.
- ۲) مقدار جابه‌جایی قائم سازه در ایستگاه فهمیده و باغمیشه اثر زلزله دور نسبت به دو ایستگاه عباسی و دانشگاه آزاد بیشتر بوده ولی برعکس اثر زلزله ورزقان در ایستگاه عباسی و دانشگاه آزاد نسبت به ایستگاه فهمیده و باغمیشه بیشتر است.
- ۳) اثر زلزله دور دو برابر زلزله‌های نزدیک گسل در جابه‌جایی جانبی طول سازه است.
- ۴) با افزایش ارتفاع سازه تنش سازه در زلزله‌های دور و نزدیک بیشتر می‌شود.
- ۵) مقدار نیرو برشی در نقاط مختلف سازه در زلزله دور نسبت به زلزله نزدیک بیشتر است و در وسط سازه مقدار بیشتری نسبت به سایر نقاط دارد که در طراحی سازه‌ای ایستگاه باید مدنظر قرار گیرد.
- ۶) نشست سازه در زلزله ورزقان در ایستگاه‌های مطرح شده بیشتر است.

۸- مراجع

- کاغذچی م، "ارزیابی پتانسیل روانگرایی با استفاده از روش انرژی خط ۲ متروی تبریز"، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۳.
- مهندسین مشاور پژوهش عمران راهور، "گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک"، مرحله اول، جلد اول، تجزیه و تحلیل اطلاعات، ۱۳۸۷.
- Alielahi H, Adampira M, "Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications", International Journal of Civil Engineering, building adjacent to deep excavation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79, 149-170. Doi:10.1007/s40999-016-0020-7.
- Asheghabadi MS, Matinmanesh H, "Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil-Tunnel Interaction", The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (pp.3162-3169). Doi:10.1016/j.proeng.2011.07.399.
- Bozorgnia Y, Niazi M, Campbell KW, "Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake [J]", Earthquake Spectra, 1995, 11 (4), 515-525.
- Douglas WS, Warsaw R, "Design of Seismic Joint for San Francisco Bay Tunnel", Journal of the Structural Division, ASCE, 1971, 97, ST4.
- Kuesel TR, "Earthquake design criteria for subways", Journal of the Structural Division, ASCE, 1969, ST6, 1213-1231.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Modeling of the Dynamic Response and Effect of Far and Near Earthquakes on the Metro Station Located In The Vicinity of the Fault-a Case Study of Tabriz Metro Line 2 Stations

Alireza Abbasnejad^{*}, Abolfazl Shahamat

Technical Faculty of Marand, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 19 October 2021; **Review:** 21 December 2021; **Accepted:** 25 December 2021

Keywords:

Line 2 Tabriz metro, Underground metro station, Dynamic analysis of underground structures, ABAQUS software, Finite element method, Near zone fault.

1. Introduction

For the first time in January 1991, the issue of studies and construction of urban trains was proposed by the esteemed representatives of the city of Tabriz in the Islamic Consultative Assembly. Due to the increasing growth of intercity travel in Tabriz and the need to use a 2-rail transportation system in order to reduce traffic problems, studies of Tabriz city train lines were conducted and Tabriz city train network including 4 routes, a total of 60km and 63 stations were designed.

The analysis of underground structures is very complex due to the interaction with the surrounding environment in a dynamic state. For this reason, less research has been done. One of the first people who investigated the effect of earthquakes on underground structures is Newmark, in 1968 he presented an easy method to calculate the relative strains of underground pipe structures and long tunnels (Bozorgnia et al., 1995). In 1969, Kuesel established a simple method for calculating earthquake forces on linear tunnels, which in most cases is the basic of later works. Douglas and Warshaw in 1971 presented the results of tunnel design analysis under the influence of earthquakes. Lee and Trifunac in 1979 investigated the response of the lined tunnel under the shear wave effect. In 1981, Owen and Scholl's studied three types of deformations, including compressive-tensile, longitudinal bending, and rhomboidal and elliptical deformations as the result of seismic vibrations in underground structures.

Fahmideh, Baghmisheh, Abbasi Square and Azad University Station are located in the northern development route of Tabriz Metro Line 2, that the Fahmideh station is located in shopping center and Baghmisheh station is located in fish bazar region and Abbasi station is in Abbasi square and also Azad university station is located behind university. Awareness of the stability situation and solving possible problems of a structure, before starting its construction, allows the designer and executor of the project to perform a correct technical and economic study of the construction conditions and permanent stability of the structure. A design engineer and operator of drilling and maintenance of a subway station can also use the stability analysis of the subway station to obtain important results about the stability of the station and the necessary equipment for its maintenance during construction and operation.

^{*} Corresponding Author

E-mail addresses: abbasnejad@tabrizu.ac.ir (Alireza Abbasnejad), shahamat@tabrizu.ac.ir (Abolfazl Shahamat).

2. Methodology

2.1. Numerical modeling

Abaqus has the ability to solve problems from a simple linear analysis to the most complex nonlinear modeling. This software has a very extensive set of elements that any geometry can be modeled by these elements.

Today, due to the increase in terrorist attacks, all structural engineers and architects in the world are trying to find solutions to control or prevent damage. In Iran, this effort is known as passive defense. Therefore, it is up to each student or professor in the field of engineering to learn how to model and deal with this burden and generalize it so that he can get a right result from it and take a positive step in this direction. This subject is not possible except with a lot of study and familiarity with the types of modeling that is done in relation with the explosion charge in different finite element software.

2.2. Station modelling

In this section, structural elements such as floor structures, concrete slabs and soil in real size in meters are drawn and stored. Solid element is used to model the structure of floors, concrete slabs and soil, although solid or shell elements can also be used, but due to the fact that the wire is in two nodes, modeling and orientation of beams and columns must be done with special care. But the cost of software calculations and analysis is significantly reduced and the accuracy and accuracy of results increase significantly, that this issue in the case of solid modeling, due to the increase of elements and nodes and consequently the increase of node forces created in the structure and the complexity of equations for solving equations, the cost of calculations increases sharply and the accuracy of the results decreases. 3D numerical model is illustrated in Fig. 1.

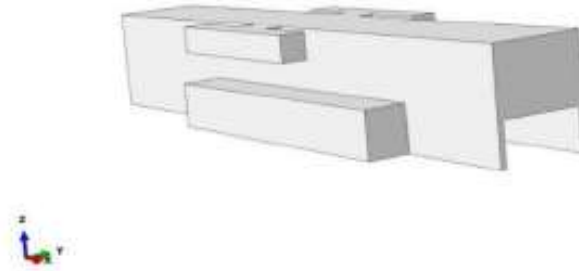


Fig. 1. Three-dimensional view of structure in ABAQUS environment

3. Results and discussion

According to the results, soil acceleration in the effect of Varzaqan earthquake in every 4 stations is more than structure. The lateral displacement of the structure in all stations under the Imperial Earthquake record is higher than the others and it has a constant effect along the structures, while the other three records have less effects but differ more along the displacement. Vertical displacement occurs at all stations and under all records in the middle of the structure. But the Kobe and Chichi earthquakes caused the least vertical displacement in all stations, while in Fahmideh station, Imperial earthquake and in the other two stations, Varzeqan earthquake, caused the most vertical displacement. Also results show that in the depth of Fahmideh and Abbasi stations, under all records in the middle of the structure, highest stress occurs but in the Azad university station, a special order can be seen in the depth of the structure. It turns out from analytical model, the highest shear force is created in the middle of the station structure in all records. Also, the Imperial and Varzaqan earthquakes have created more shear force in the structures of the stations. And the subsidence curvature shows that Varzeqan earthquake records caused the most subsidence in all stations and two earthquakes in Chichi and Kobe caused the least subsidence in all stations. The location of selected points in soil are shown in Fig. 2.

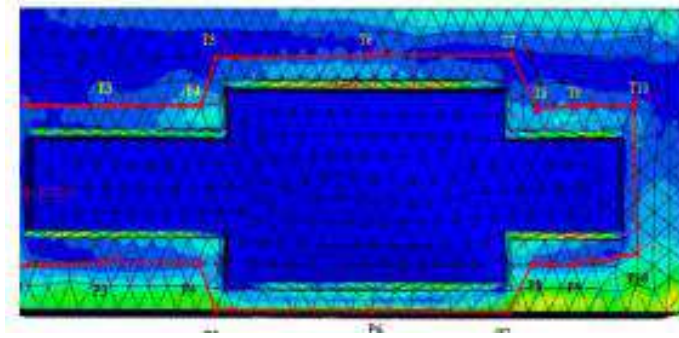


Fig. 2. The location of selected points in soil

4. Conclusions

1. By examining the results, the effect of acceleration on the soil was greater (both in distant and near earthquakes) but under the soil and structure, the same acceleration was occurred.
2. The amount of vertical displacement in Fahmideh and Baghmisheh stations was greater than the two stations of Abbasi and Azad University, but on the contrary, the effect of Varzeqan earthquake in Abbasi station and Azad University was more than Fahmideh and Baghmisheh stations.
3. The effect of a distant earthquake is equal to the earthquakes near the fault in the lateral displacement in the length of the structure.
4. As the height of the structure increases, the structural stress increases in near and far earthquakes.
5. The amount of shear force in different parts of the structure in a distant earthquake is more than a near earthquake and in the middle of the structure it is more than other points that should be considered in the design of station structures.
6. Structural subsidence in Varzeqan earthquake is greater in the mentioned stations.

5. References

- Bozorgnia Y, Niazi M, Campbell KW, "Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake [J]", *Earthquake Spectra*, 1995, 11 (4), 515-525.
- Douglas WS, Warshaw R, "Design of Seismic Joint for San Francisco Bay Tunnel", *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1971, 97, ST4.
- Kuesel TR, "Earthquake design criteria for subways", *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1969, ST6, 1213-1231.
- Lee V, Trifunac MD, "Response of tunnels to incident SH-waves", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1979, 105 (4), 643-659.
- Owen GN, Scholl RE, "Earthquake engineering of large underground structures", Report Number FHWA/RD-80/195, prepared for the Federal Highway Administration and National Science Foundation, 1981.