

بررسی اثرات نوع خاک و شکل هندسی تونل بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی

فاطمه احمدی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

چکیده

تأسیسات زیرزمینی جزء لاینفک جامعه مدرن بوده و برای کاربردهای متعددی شامل متروها و خطوط راه‌آهن، بزرگراه‌ها، انبار مصالح و انتقال آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. تأسیسات زیرزمینی ساخته شده در نواحی متأثر از فعالیت زلزله باید در برابر هر دو بارگذاری زلزله و استاتیکی مقاومت کنند. با مرور موارد تاریخی اثرات زلزله روی این‌گونه سازه‌ها ملاحظه می‌شود که نرخ خرابی آن‌ها نسبت به سازه‌های روزمینی پایین‌تر است. درعین‌حال در زلزله‌های اخیر مانند زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، زلزله‌های ۱۹۹۵ چی چی تایوان، زلزله‌های ۱۹۹۹ کوکائلی ترکیه، سازه‌های زیرزمینی دچار خسارت عمده‌ای شده‌اند. به همین دلیل بررسی اثرات شکل و نوع خاک در تحلیل لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی لازم و ضروری است. در این پژوهش به مطالعه عددی بررسی اثرات نوع خاک و شکل هندسی تونل بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی پرداخته شده است، بدین منظور برای مدل‌سازی تونل‌های مورد بررسی دو تیپ تونل دایره‌ای و تخم‌مرغی مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های مورد بررسی در دو دسته خاک نیمه سست و خاک متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه دو تونل مورد بررسی تحت تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی با خاک به‌صورت موهر کولمب و بتن تونل از نوع مدل بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. به‌منظور انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی از ۷ رکورد لرزه‌ای حوزه نزدیک و دور استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی ناشی از زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر روی تونل‌ها بیانگر توزیع تنش و تغییر مکان ماندگار کمتر به میزان ۱۵ درصد در تونل‌های تخم‌مرغی شکل نسب به تونل‌های دایره‌ای شکل است.

واژگان کلیدی: تونل زیرزمینی، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، رکورد لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک.

مقدمه

با توجه به توسعه روز افزون مناطق شهری و به تبع آن افزایش نیازهای حمل و نقل درون شهری، در سال های اخیر حمل و نقل زیرزمینی مورد توجه خاصی قرار گرفته است. تونل های حفر شده برای حمل و نقل می تواند برای عبور مترو، اتوبوس های حمل و نقل عمومی و یا خودروهای شخصی مورد استفاده قرار گیرد. احداث تونل ها به دو صورت تکی و یا دوقلو می تواند صورت گیرد. یعنی در بسیاری از مواقع لازم است به جای یک تونل با عرض زیاد دو تونل با عرض کمتر در فاصله کمی از هم حفاری شود. امروزه به دلیل نیاز روز افزون به استفاده از فضاهای زیرزمینی شهری، ضرورت بررسی این سازه ها در برابر زلزله بیش از پیش احساس می شود. با توجه به اینکه سازه هایی با مقطع مستدیر ساخته می شوند، تغییر شکل ها و تنش های ایجاد شده در زمین ناشی از زلزله، با تغییر عمق تغییرات بسیار زیادی داشته و در نهایت شرایط پیچیده تری را فراهم می آورند.

مبانی نظری

عملکرد تأسیسات زیرزمینی طی رویداد زلزله

مطالعات بسیاری خسارت زلزله به تأسیسات زیرزمینی را به ثبت رسانده اند. ASCE خسارت در منطقه لس آنجلس ناشی از زلزله سان فرناندو ۱۹۷۱ توصیف می کند. JSCE عملکرد چندین سازه زیرزمینی شامل تونل های لوله ای غوطه ور طی لرزش در ژاپن را توصیف می کند. Duke و Steven، Leeds، Dowding، Rozen، Owen، Scholl و Sharma و Power، Judd و دیگران، Kaneshiro و دیگران، همگی مختصری از موارد تاریخی خسارت به تأسیسات زیرزمینی را ارائه داده اند. Owen و Scholl کوشش Dowding و Rozen را با ۱۲۷ مورد تاریخی به روز در آوردند. Sharma و Judd یک پایگاه داده وسیع از خسارت لرزه ای به سازه های زیرزمینی با استفاده از ۱۹۲ مورد تاریخی گسترش دادند. Power و دیگران با ۲۱۷ مورد تاریخی، تجدید نظر بیشتری انجام داده اند. مشاهدات کلی زیر در خصوص عملکرد لرزه ای سازه های زیرزمینی می تواند صورت گیرد:

- (۱) سازه های زیرزمینی نسبت به سازه هایی که روی سطح ساخته می شوند، در اثر زلزله متحمل خسارت کمتری می گردند.
- (۲) هر چه عمق تونل بیشتر باشد، میزان خرابی در مقایسه با تونل های کم عمق، کمتر است. این امر را بطور طبیعی می توان به بهبود خواص مصالح با افزایش ناشی از سربار و زائل شدگی امواج زلزله با عمق مرتبط دانست.
- (۳) سازه های زیرزمینی بنا شده در خاک در مقایسه با سازه های زیرزمینی بنا شده در سنگ های مقاوم، دچار خرابی بیشتری می شوند.
- (۴) تونل های دارای پوشش و همچنین تونل هایی که در آن ها تزریق انجام شده است نسبت به تونل های بدون پوشش در سنگ ایمن تراند. بطور کلی پایداری سازی زمین اطراف تونل و بهبود تماس پوشش با محیط بوسیله تزریق در کاهش خسارات مؤثر است.
- (۵) تونل های تحت اثر بارهای متقارن که باعث بهبود اندر کنش میان پوشش و محیط اطراف تونل می گردد، در برابر زلزله پایدارترند. ضخیم کردن پوشش ممکن است منجر به افزایش نیروهای ناشی از زلزله در پوشش گردد.
- (۶) خسارات ایجاد شده در حین زلزله را می توان به پارامترهایی همچون حداکثر سرعت و شتاب زمین بر مبنای بزرگی و فاصله از کانون زلزله مورد نظر مرتبط نمود.
- (۷) مدت زمان حرکت قوی زمین در حین زلزله دارای اهمیت قابل توجهی است. چرا که ممکن است باعث ایجاد گسیختگی ناشی از تغییر مکان های بزرگ گردد.
- (۸) حرکات با فرکانس بالا ممکن است باعث افتادن سنگ ها و قطعات بتنی در امتداد صفحه ضعیف شود. این نوع فرکانس ها که بسرعت با فاصله زائل می گردد، معمولاً در فاصله کمی از منبع زلزله ایجاد می شوند.

(۹) بسته به زاویه و نحوه برخورد موج زلزله به تونل این امواج می توانند تقویت شود. البته این زمانی است که طول موج بین یک تا چهار برابر قطر تونل باشد.

(۱۰) اگر زلزله موجب ناپایداری شیروانی های سنگی یا خاکی گردد، خرابی ناشی از آن می تواند در ورودی تونل ها قابل توجه باشد.

اثر ارتفاع خاک روی سنگ بستر در رفتار لرزه ای اندرکنش تونل ها و خاک

امواج زلزله به هنگام حرکت از سنگ بستر، بسته به نوع و ضخامت خاک از سنگ بستر ممکن است تشدید یا میرا شوند. بنابراین یکی از پارامترهای مؤثر در پاسخ لرزه ای تونل ها، ارتفاع خاک روی سنگ بستر تا زیر تونل می باشد. در این مقاله که توسط محسن عاشق آبادی و محمد علی رهگذر در سال ۱۳۸۹ انجام داده اند به منظور مطالعه این پارامتر بر اندرکنش لرزه ای تونل و خاک چند نوع خاک ماسه ای و رسی در عمق های مختلف نسبت به سنگ بستر تا زیر تونل در نظر گرفته شده و از یک زلزله واقعی با فرکانس محتوای شدید استفاده گردیده است.

از جمله مهمترین مشکلات در تحلیل پدیده اندرکنش خاک و تونل انتخاب مدل مناسب برای خاک است. در این مقاله برای مدل خاک تونل از المان های محدود استفاده شده است. تمامی خاک های مورد استفاده در مدل های خاک تونل مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ ایران می باشد. مشخصات این خاک ها در جدول (۱) آمده است. جهت انجام آنالیز دینامیکی خاک تونل نیاز به ماتریس میرایی سیستم مربوطه می باشد. ضرائب α و β ماتریس میرایی را مطابق روش رایی که در آن درصد میرایی را در مود اول ۵٪ فرض می کند بدست آمده اند. سیستم های خاک سازه در این مقاله به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS v8.6 مدل سازی و تحت زلزله واقعی تحلیل شده جاند.

جدول ۱: مشخصات خاک ها [10]

نوع خاک	G(Pa)		نوع زمین		ρ	E(Pa)		α		β		ν	ξ	φ
	عمق (m)		عمق (m)			عمق (m)		عمق (m)						
	۴۰	۱۰۰	۴۰	۱۰۰		۴۰	۱۰۰	۴۰	۱۰۰					
AS	۹.۸×۱۰. ^۷	۱.۵۱×۱۰. ^۸	I	II	۲۰۰۰	۴.۷×۱۰. ^۸	۴.۲×۱۰. ^۸	۰.۴۲۲	۰.۲۳۹	۰.۰۰۶	۰.۰۱۱	۰.۰۴	۰.۰۵	۳۳
DS	۴.۳۶×۱۰. ^۸	۷×۱۰. ^۸	II	III	۲۰۴۰	۱۲.۲×۱۰. ^۸	۱.۹۶×۱۰. ^۸	۰.۸۹۴	۰.۵۰۹	۰.۰۰۳	۰.۰۰۵	۰.۰۴	۰.۰۵	۳۵
OC	۱.۰۸×۱۰. ^۸	۲.۲۰×۱۰. ^۸	II	I	۱۹۳۷	۳.۰۲×۱۰. ^۸	۶.۱۶×۱۰. ^۸	۰.۴۸۴	۰.۲۹۲	۰.۰۰۶	۰.۰۰۶	۰.۰۴	۰.۰۵	۳۱
NC	۶.۵×۱۰. ^۷	۱.۵۱×۱۰. ^۸	I	II	۱۵۹۰	۱.۸۲×۱۰. ^۸	۴.۲۳×۱۰. ^۸	۰.۳۷۴	۰.۲۶۸	۰.۰۰۷	۰.۰۰۷	۰.۰۴	۰.۰۵	۳۰

تمام مدل های خاک تونل تحت زلزله با محتوای فرکانسی بالا Hav تحلیل گشته اند. در جدول (۲) مشخصات کامل این زلزله آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات زلزله [10]

a.v	بیشینه سرعت	بیشینه شتاب	بزرگی زلزله	تاریخ زلزله	منطقه ثبت شده	خصوصیت زلزله	نوع زلزله
۲،۰۳	۰،۰۹۶	۰،۱۹۸	۵،۴	۱۹۷۰	Lytgi Greek	$a.v > 1.2$	Hav

(۱) میزان تشدید شتاب پاسخ زمین با افزایش ضخامت خاک از روی سنگ بستر افزایش یافته و بیشترین میزان تشدید شتاب در محل تونل است.

(۲) ماسهجهای متراکم و یا خاک های رسی سفت تحت زلزله های با فرکانس های بالا بیشتر تحریک شده ولی خاک های نرم با زلزله های با فرکانس پایین بیشتر تحریک می شوند. این پدیده شبه رزونانس را به دلیل نزدیکی فرکانس اصلی مدل خاکی با فرکانس اصلی زلزله می توان توجیه کرد.

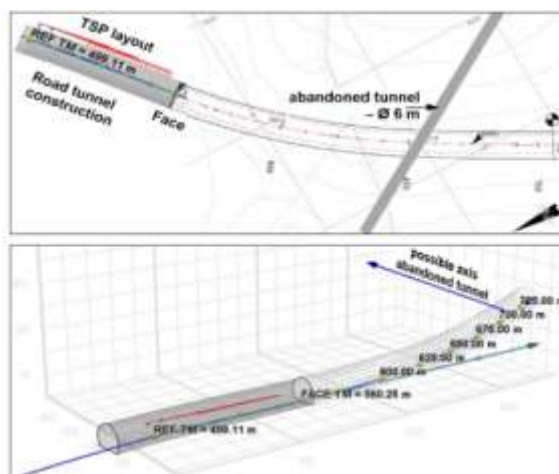
(۳) نوع و ضخامت خاک در مسائل اندرکنش خاک و سازه بسیار اهمیت دارد. هر چه عمق خاک کمتر باشد سرعت موج برشی و مدول برشی نیز کمتر خواهد بود. در نتیجه اثر اندرکنش خاک و سازه در تحلیل بیشتر می گردد.

(۴) با توجه به نمودارها، تنش ها تقریباً در تمام نقاط طول محیط تونل تشدید یافته اند. به طوری که تنش σ_1 روی محیط تونل تا ۱۸ برابر و تنش برشی حداکثر τ تا ۶ برابر افزایش یافته است. نکته جالب توجه اینکه، مقادیر حاکثر تشدید، در محدوده پایین تونل می باشند.

(۵) با افزایش ارتفاع خاک از سنگ بستر تنش ها در اطراف تونل بیشتر از زیر تونل تشدید می شوند. (عاشق آبادی و رهگذر، ۱۳۸۹)

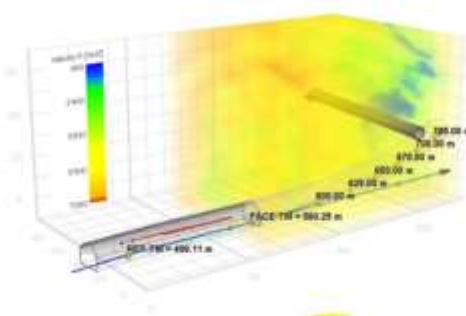
تخمین رفتار لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی در حین حفاری تونل

در پژوهش دیگری توسط Choudhary و همکاران به تخمین رفتار لرزه‌ای تونل‌های سه بعدی پرداخته شده است. در شکل ۱ موقعیت حفاری تونل دیده میشود.



شکل ۱: مدل هندسی تونل و موقعیت آن [11]

در شکل ۲ نحوه توزیع امواج لرزه‌ای و اثرات آن بر روی تونل دیده میشود



شکل ۲: نحوه توزیع امواج P-wave [11]

مدل‌سازی

هر سطح مشترک به صورت یک ضخامت مجازی بیان می‌شود که یک ضخامت مرزی بوده، به طوری که ابعاد فرضی برای تعریف مشخصات مصالح سطح مشترک به کار برده می‌شود. هر چقدر ضخامت مجازی بالاتر باشد، تغییر شکل الاستیک بیشتری تولید می‌شود. عموماً فرض می‌شود که المان‌های سطح مشترک تغییر شکل الاستیک کوچکی دارند، در نتیجه ضخامت مجازی کوچک باید داشته باشند. از سوی دیگر اگر ضخامت مجازی خیلی کوچک باشد شرایط ناموزون عددی اتفاق می‌افتد. ضخامت مجازی از طریق فاکتور ضخامت مجازی ضربدر میانگین اندازه المان‌ها محاسبه می‌شود. مقدار پیش فرض ضریب ضخامت مجازی ۰,۱ می‌باشد، همچنین حالت استاندارد ضریب ضخامت مجازی ۰,۱ است.

سطوح مشترک به صورت خط تیره در سمت راست خط هندسی برای نشان دادن طرفی که در آن اندرکنش با خاک انجام می-پذیرد، نشان داده می-شود، (R_{inter}). این فاکتور ضخامت سطح مشترک (اصطکاک دیوار و چسبندگی) را به مقاومت خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک) مربوط می-سازد.

عموماً برای اندرکنش خاک و سازه واقعی، سطح مشترک ضعیفتر و دارای انعطاف پذیری بیشتری نسبت به لایه خاک وابسته به آن است. این بدان معنی است که اندازه R_{inter} باید از یک کمتر باشد. مقدار R_{inter} را در حالت اندرکنش بین انواع مختلف خاک و سازه را می-توان در نوشتجات یافت. در صورت نبود اطلاعات کافی R_{inter} برابر $\frac{2}{3}$ در نظر گرفته می-شود. مشخصات سطح مشترک از مشخصات خاک در داده های وابسته به آن و با استفاده از فاکتور کاهش مقاومت بنا به قوانین زیر محاسبه می-شود.

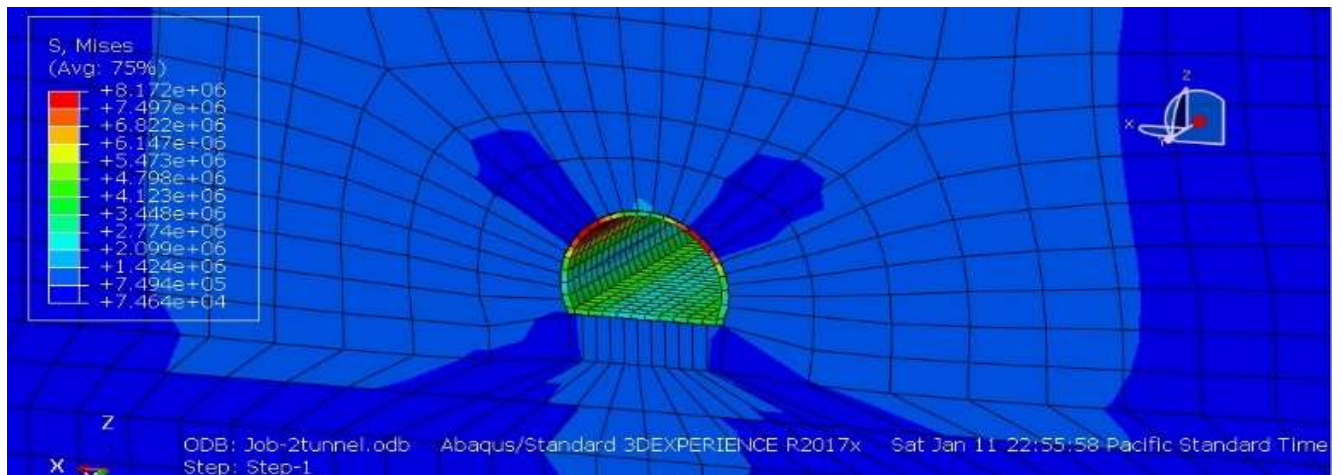
$$C_i = R_{inter} C_{soil}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil}$$

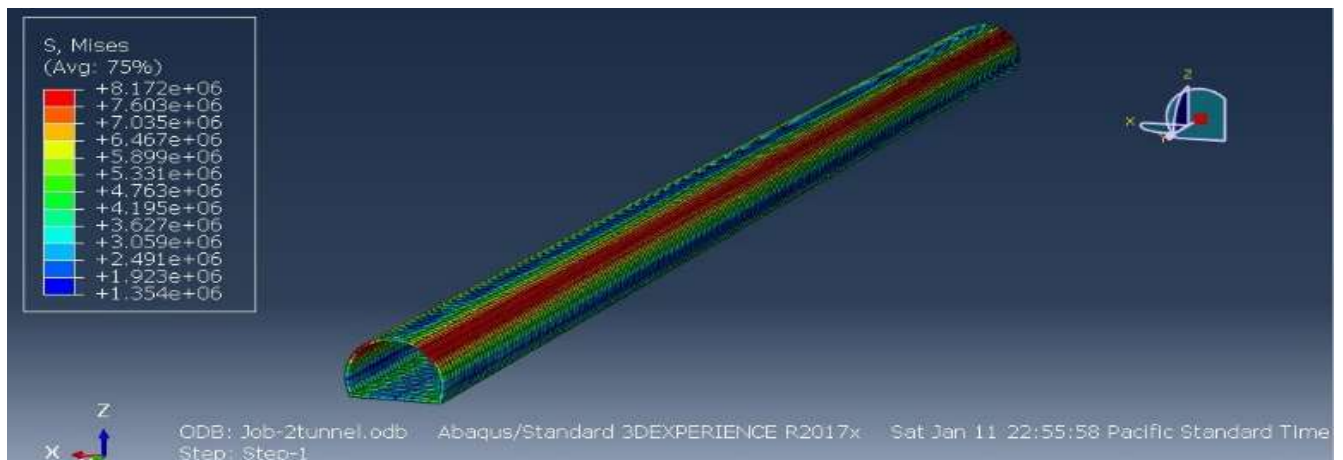
$$\varphi_i = 0 \quad \text{if} \quad R_{inter} < 1, \quad \text{Otherwise} \quad \varphi_i = \varphi_{soil}$$

بررسی توزیع تنش در تونل های مورد بررسی

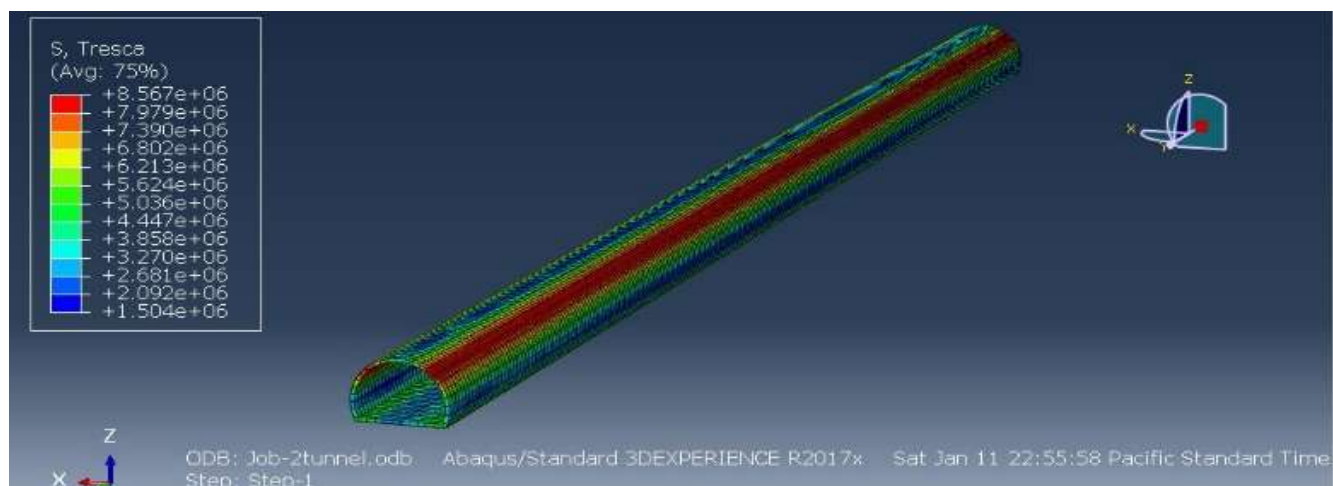
همانطور که در شکل زیر دیده میشود در دو ناحیه مشخص شده توزیع تنش در اطراف تونل تخم مرغی شکل افزایش قابل ملاحظه ای داشته است اما این توزیع تنش نسبت به تونل دایره ای کمتر است.



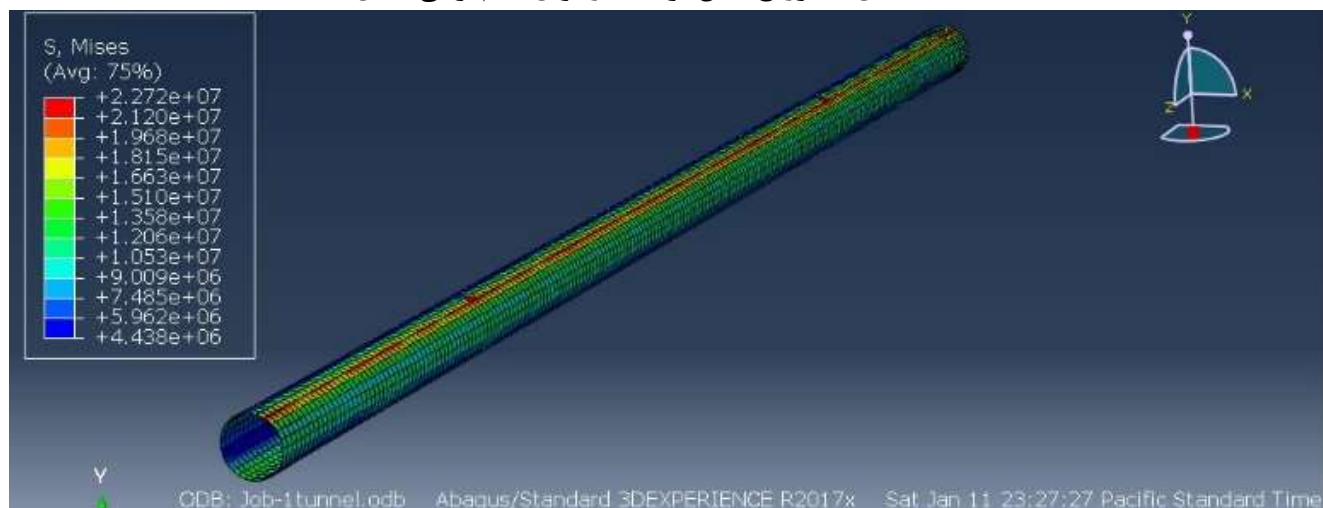
شکل ۳: توزیع تنش مایز در تونل تخم مرغی و خاک اطراف



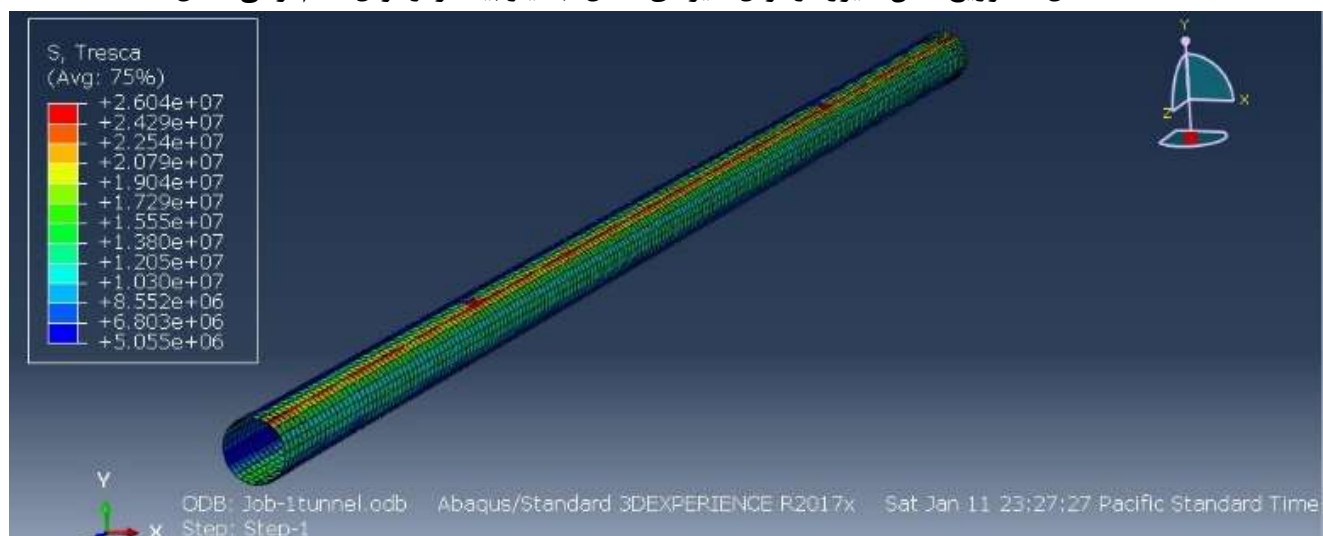
شکل ۴: توزیع تنش مایز در تونل تخم مرغی شکل



شکل ۵: توزیع تنش ترسکا در تونل تخم مرغی شکل



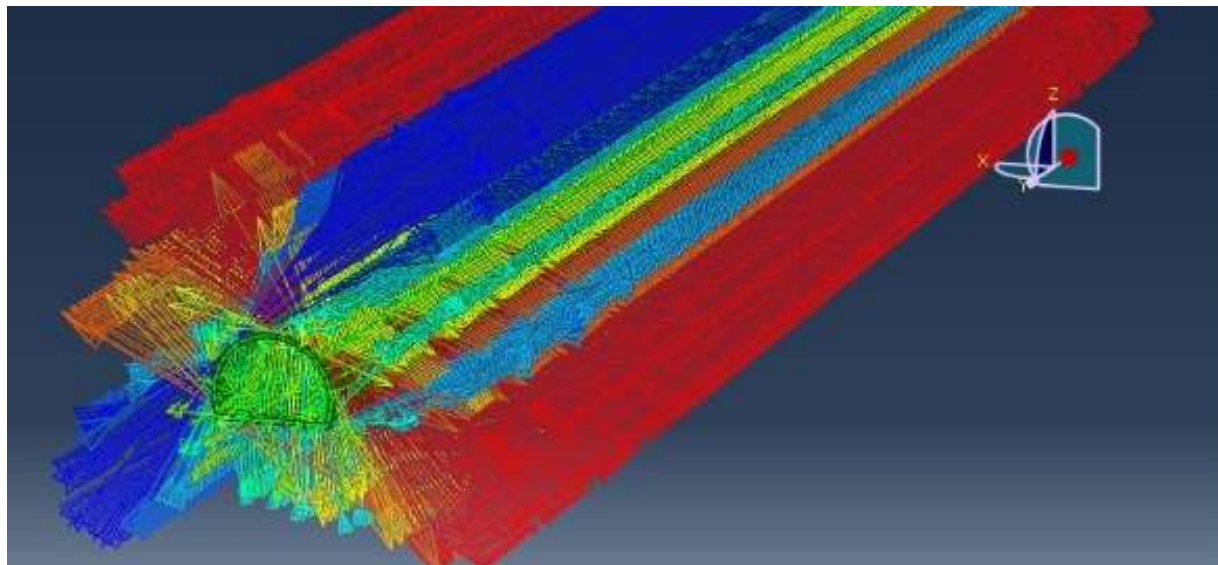
شکل ۶: توزیع تنش مایز در تونل دایره‌ای شکل (بسیار بیشتر از تونل تخم مرغی شکل)



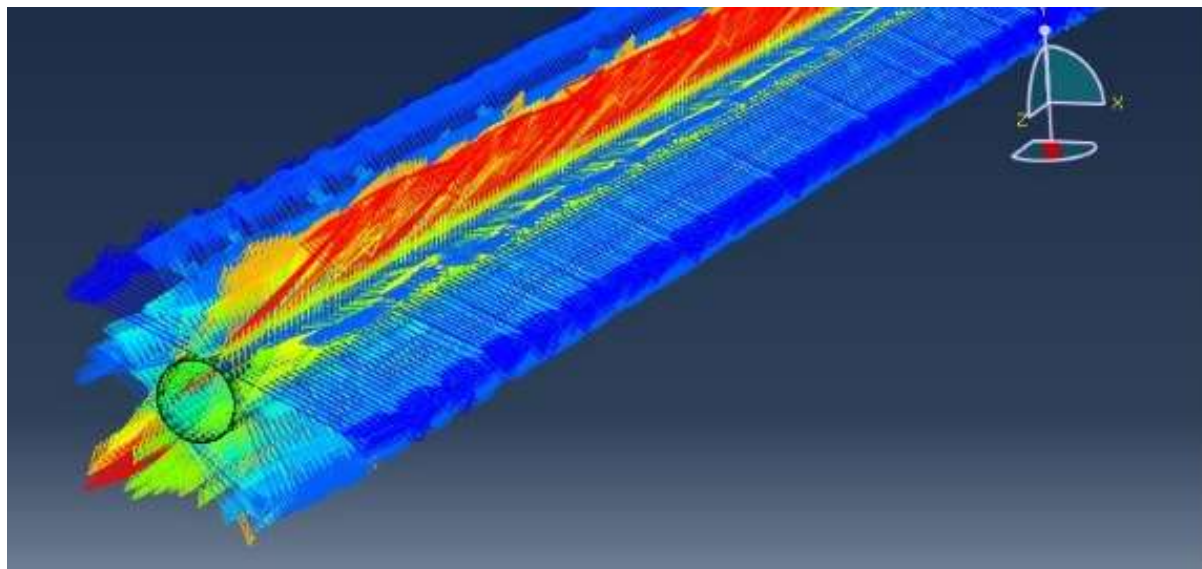
شکل ۷: توزیع تنش ترسکا در تونل دایره‌ای شکل (بسیار بیشتر از تونل تخم مرغی شکل)

بررسی توزیع لنگر در تونل‌های مورد بررسی

در شکل زیر توزیع لنگر در اطراف تونل تخم‌مرغی شکل دیده میشود توزیع لنگر در تونل دایره‌ای شکل مناسب تر از تونل تخم‌مرغی شکل است. در شکل ۸ اثرات توزیع لنگر در اطراف تونل با مقطع تخم‌مرغی دیده میشود همانطور که مشخص است یک شکل مثلثی از توزیع لنگر دیده میشود و قسمت پایینی تونل یک لنگر یکنواخت دارد و بدنه گنبدی تونل نیز لنگری با توزیع کاملاً یکنواخت دارد و از این جهت چون توزیع لنگر یکنواخت است تقریباً از تمامی ظرفیت سطح مقطع تونل تخم‌مرغی جهت تحمل لنگر استفاده میگردد اما در تونل دایره‌ای شکل در شکل ۹ وضعیت توزیع لنگر نشان میدهد که توزیع تنش به شکل ستاره‌ای است و توزیع تنش در اطراف تونل در نواحی روبروی یکدیگر ماکزیموم است همچنین توزیع لنگر چندان یکنواخت نیست.



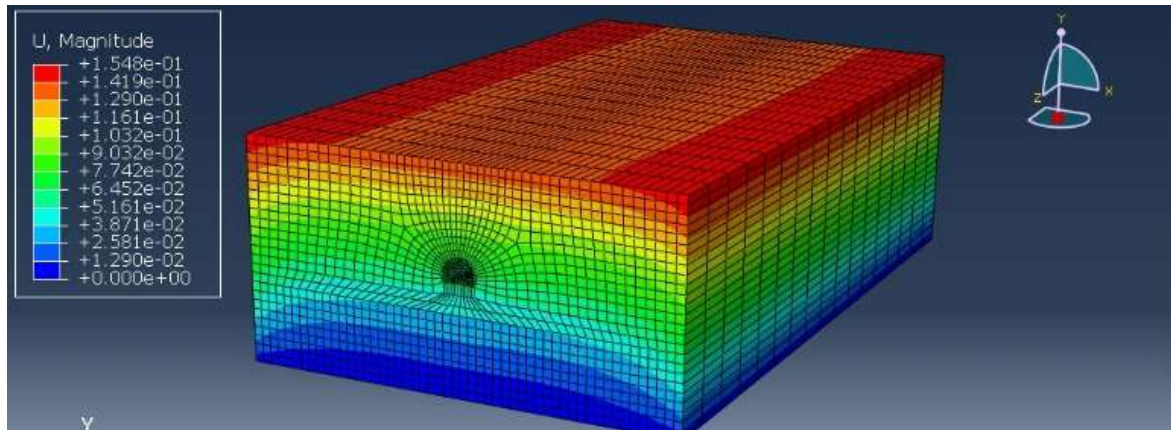
شکل ۸: توزیع لنگر در اطراف تونل تخم‌مرغی شکل



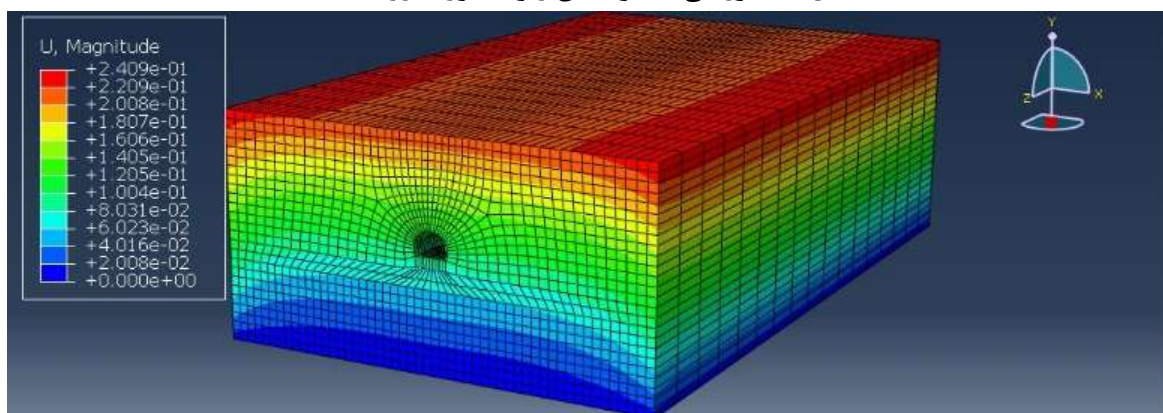
شکل ۹: توزیع لنگر در اطراف تونل دایره‌ای شکل

اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بر روی توزیع تنش و تغییر مکان بر روی تونل با مقطع تخم‌مرغی شکل

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ خروجی تغییر مکان لرزه‌ای ناشی از زلزله حوزه دور و نزدیک loma prieta دیده می‌شود همانطور که دیده می‌شود تغییر مکان‌های ماکزیموم ایجاد شده توسط زلزله loma prieta تحت زلزله حوزه نزدیک بیش از ۵۰ درصد بیشتر از حوزه دور است.

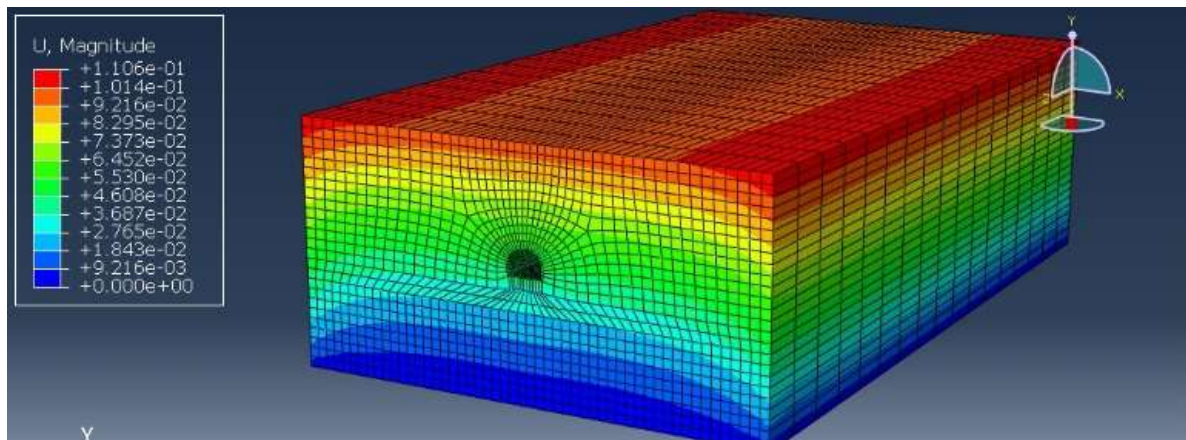


شکل ۱۰: خروجی تغییر مکان زلزله حوزه دور loma prieta

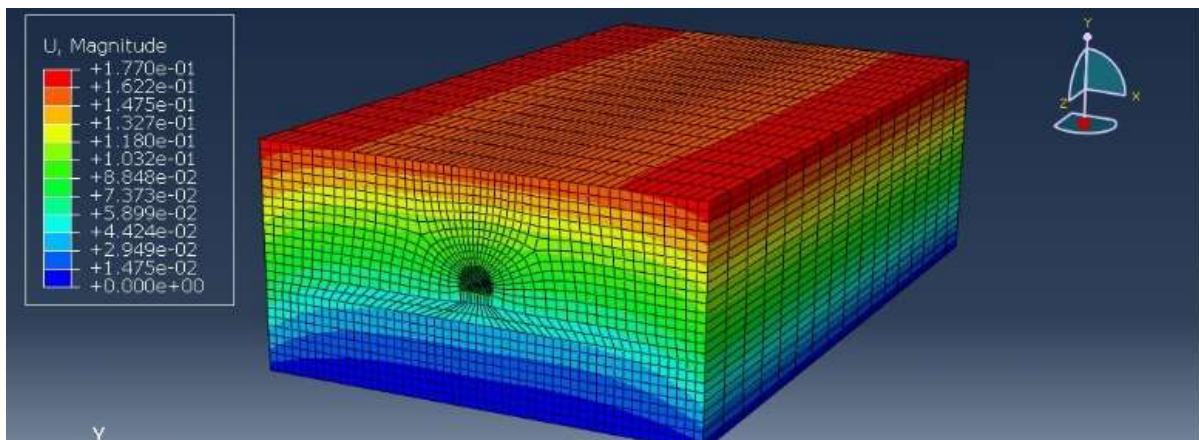


شکل ۱۱: خروجی تغییر مکان زلزله حوزه نزدیک loma prieta

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ خروجی تغییر مکان لرزه‌ای ناشی از زلزله حوزه دور و نزدیک Tabas دیده می‌شود همانطور که دیده می‌شود تغییر مکان‌های ماکزیموم ایجاد شده توسط زلزله Tabas تحت زلزله حوزه نزدیک بیش از ۵۰ درصد نسبت به حوزه دور بیشتر است.

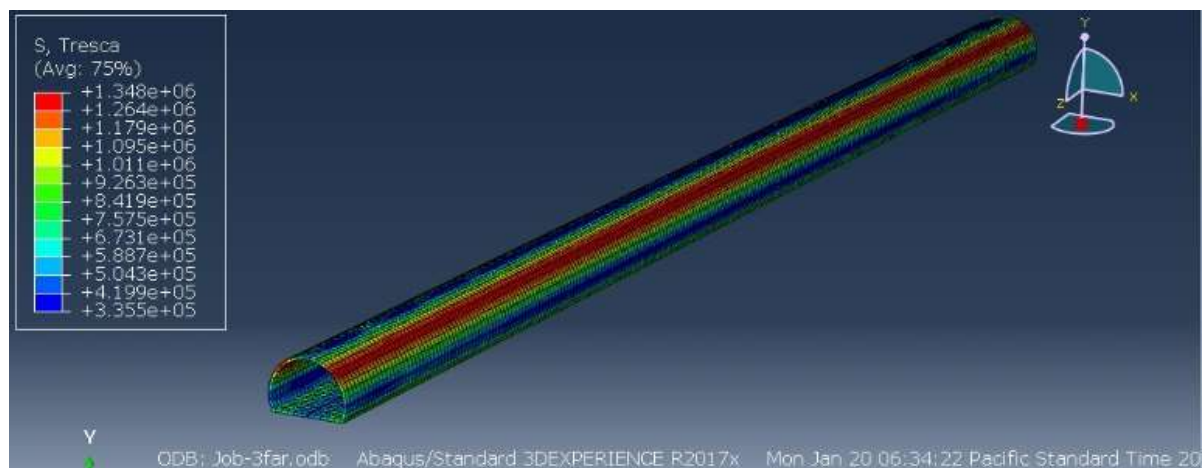


شکل ۱۲: خروجی تغییر مکان زلزله حوزه دور Tabas

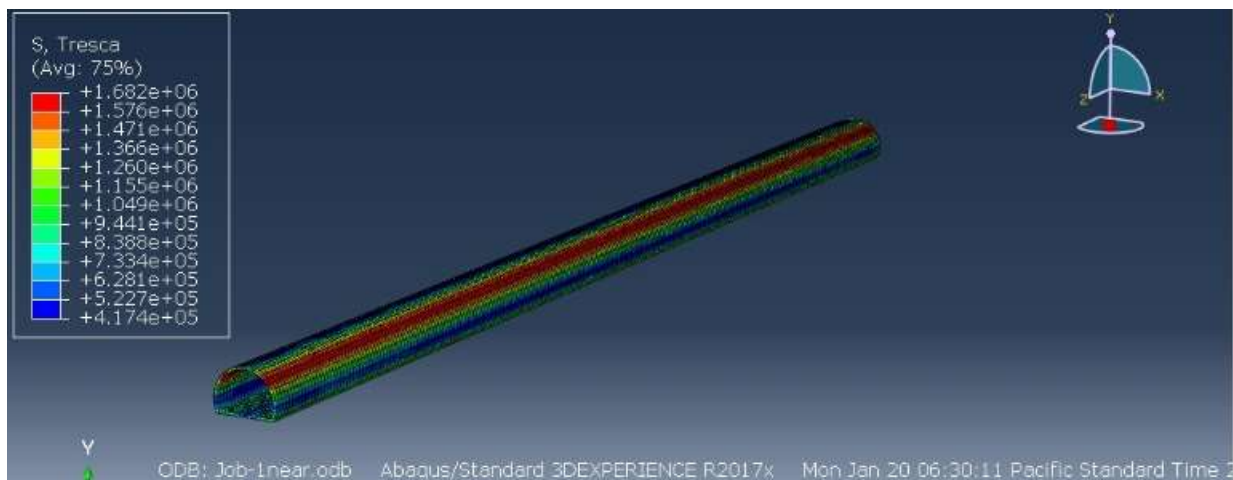


شکل ۱۳: خروجی تغییر مکان زلزله حوزه نزدیک Tabas

در شکل های ۱۴ و ۱۵ خروجی تنش های ترسکا ناشی از زلزله حوزه دور و نزدیک loma prieta دیده میشود همانطور که دیده میشود تنش های ترسکا ایجاد شده توسط زلزله loma prieta تحت زلزله حوزه نزدیک بیش از 25 درصد بیشتر از حوزه دور است.

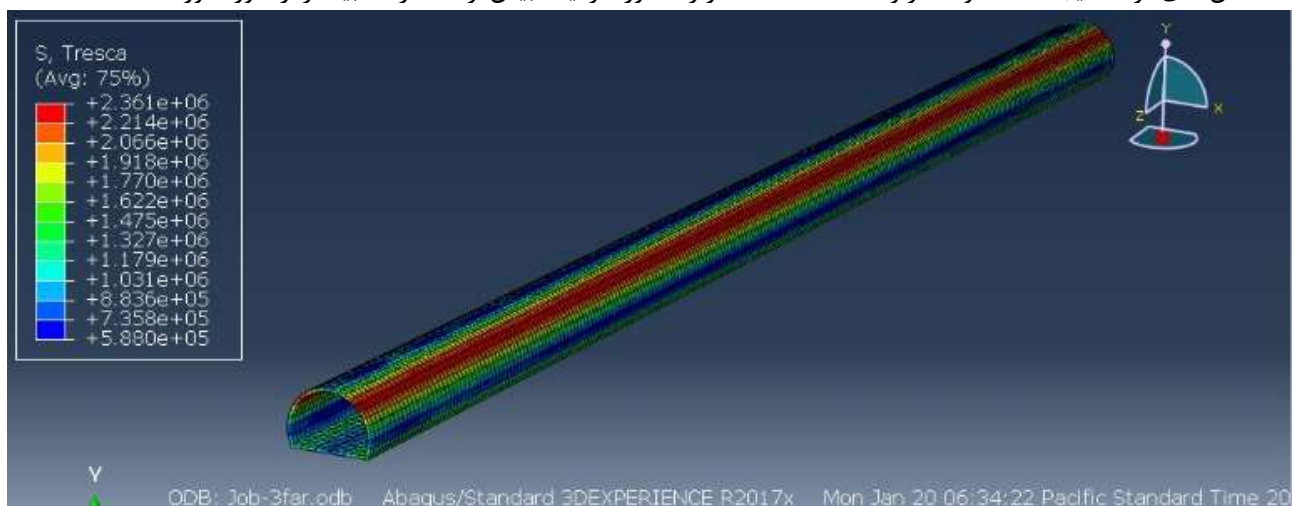


شکل ۱۴: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه دور loma prieta

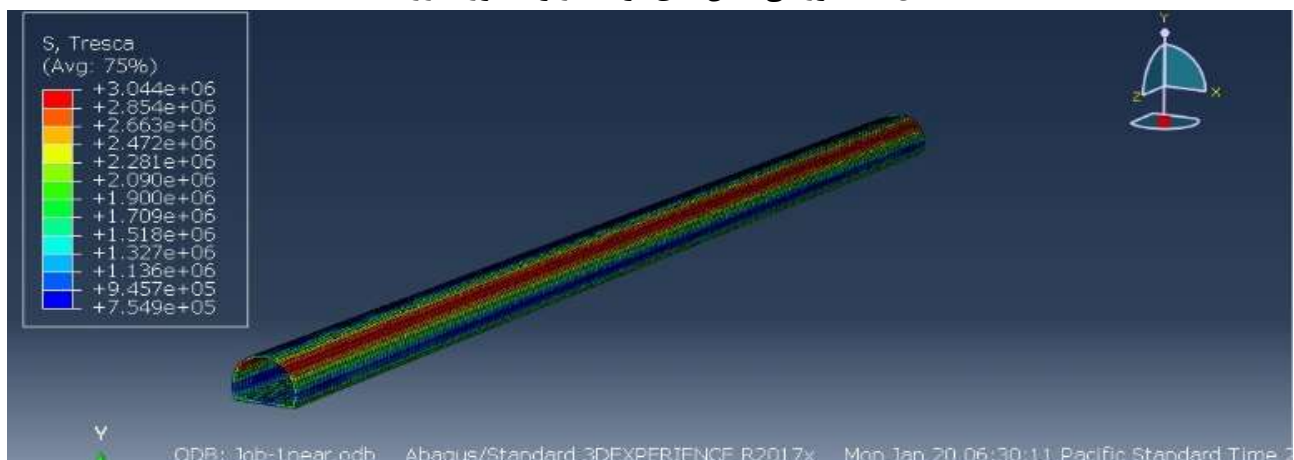


شکل ۱۵: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه نزدیک loma prieta

در شکل های ۱۶ و ۱۷ خروجی تنش های ترسکا ناشی از زلزله حوزه دور و نزدیک Tabas دیده میشود همانطور که دیده میشود تنش های ترسکا ایجاد شده توسط زلزله Tabas تحت زلزله حوزه نزدیک بیش از ۲۵ درصد بیشتر از حوزه دور است.

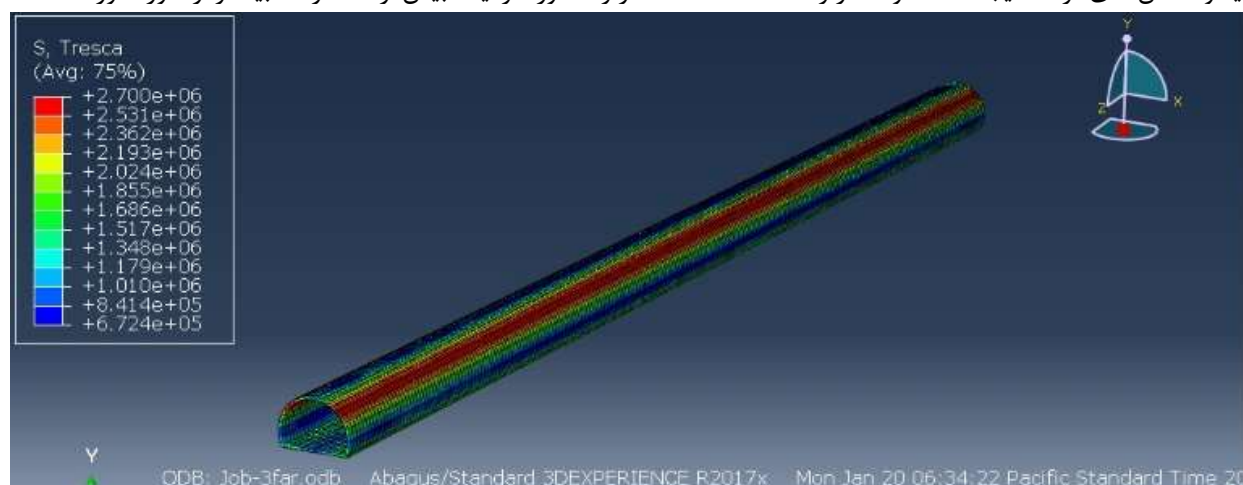


شکل ۱۶: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه دور Tabas

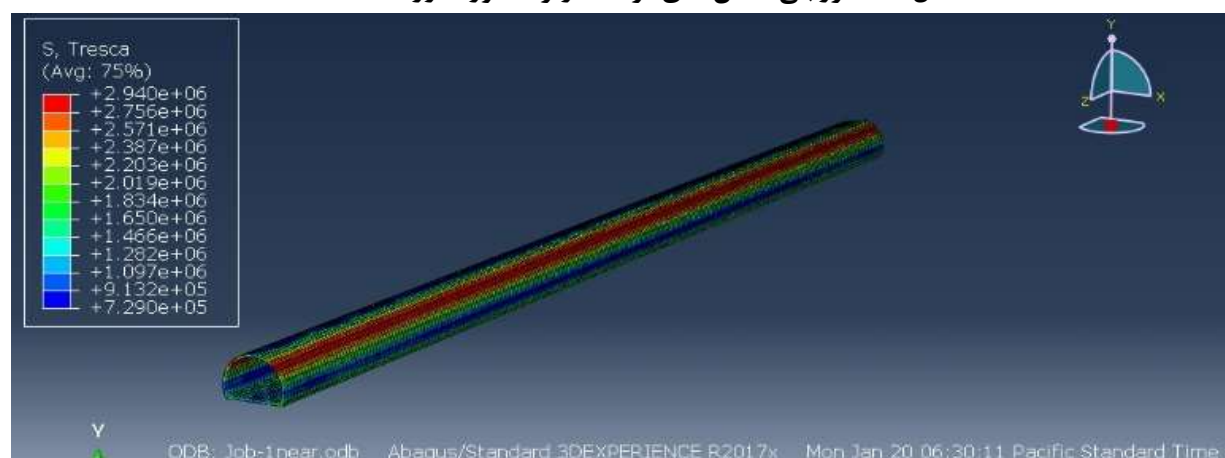


شکل ۱۷: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه نزدیک Tabas

در شکل های ۱۸ و ۱۹ خروجی تنش های ترسکا ناشی از زلزله حوزه دور و نزدیک landers دیده میشود همانطور که دیده میشود تنش های ترسکا ایجاد شده توسط زلزله landers تحت زلزله حوزه نزدیک بیش از ۲۵ درصد بیشتر از حوزه دور است.



شکل ۱۸: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه دور landers



شکل ۱۹: خروجی تنش های ترسکا زلزله حوزه نزدیک landers

نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه عددی بررسی اثرات نوع خاک و شکل هندسی تونل بر پاسخ لرزه ای تونل های زیرزمینی پرداخته شده است بدین منظور برای مدل سازی تونل های مورد بررسی دو تیپ تونل دایره ای و تخم مرغی مورد بررسی قرار گرفته است. خاک های مورد بررسی در دو دسته خاک نیمه سست و خاک متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه دو تونل مورد بررسی تحت تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی با خاک به صورت موهر کولمب و بتن تونل از نوع مدل بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم افزار ABAQUS انجام شده است به منظور انجام تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی از ۷ رکورد لرزه ای حوزه نزدیک و دور استفاده شده است. نتایج به شرح زیر است:

- ۱- خروجی توزیع تنش های ترسکا نشان میدهد که توزیع تنش در تونل دایره ای شکل مناسب تر از توزیع تنش در تونل با مقطع تخم مرغی شکل بوده است و این میزان کاهش تنش برابر ۲۰ درصد میباشد.
- ۲- همچنین نتایج توزیع تنش اصلی نشان میدهد که توزیع تنش های اصلی در تونل دایره ای شکل کمتر از تونل تخم مرغی شکل بوده است و به طور کلی تنش های کمتری در تونل دایره ای تشکیل شده است و توزیع تنش یکنواخت تر است.

۳- نتایج تغییر مکان های لرزه‌ای تونل دایره‌ای نشان می‌دهد که در ابتدای نمودار میزان تغییر مکان تخم‌مرغی با تونل دایره‌ای برابر می‌باشد زیرا زلزله وارده هنوز به ماکزیموم شدت خود نرسیده است و تونل‌ها و خاک اطراف در ناحیه الاستیک باقی مانده اند اما در نهایت با افزایش شدت زلزله خاک اطراف تونل‌ها ها وارد فاز غیرخطی شده و نواحی پلاستیک در خاک اطراف تونل‌ها رخ می‌دهد و تغییر مکان های تونل دایره‌ای افزایش پیدا میکند. و از اینرو میتوان به این موضوع اشاره نمود که تغییر مکان های تونل با مقطع تخم‌مرغی کمتر به طرز موثری کاهش یافته است.

۴- نتایج تغییر مکان های لرزه‌ای تونل‌ها در خاک‌های نرم و سخت نشان می‌دهد که میزان تغییر مکان در خاک‌های نرم بیشتر از خاک‌های سخت بوده است همچنین میزان تغییر مکان در تونل تخم‌مرغی کمتر از تونل دایره‌ای بوده است که دلیل این امر اندرکنش خاص این تونل با خاک اطراف است.

۵- رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک بدلیل مولفه قائم بزرگ و همچنین اثرات پالس رکورد لرزه‌ای اثرات تخریبی بسیار شدید تری نسبت به رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور دارند به همین دلیل تغییر مکان های حاصله ناشی از رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک بر روی تونل‌ها حتی در مواردی در حدود ۵۰ درصد بیشتر از رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور بوده است.

پیشنهادهای آتی

بررسی اثرات شکل هندسی تونل بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی دو قلو.

فهرست منابع

۱. باباگلی ر، ۱۳۹۰. ارزیابی ظرفیت در تحلیل و طراحی تونل‌های متروی شهری تحت اثر امواج زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان.
۲. زردی، مومینوند ح، بدو ک، ۱۳۸۹. تأثیر فاصله تونل‌های دوقلو و سطح آب زیرزمینی بر جابجائی ها، نیروهای وارد بر سیستم نگهداری تونل و نشست سطح زمین در اثر زلزله (مطالعه موردی، تونل متروی تبریز) پنجمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ماه، ص ۸-۱.
۳. عاشق‌آبادی م ص، رهگذر م ع، ۱۳۸۹. اثر ارتفاع خاک روی سنگ بستر در رفتار لرزه‌ای تونل‌ها و خاک، اولین همایش ملی سازه - زلزله، ژئوتکنیک مازندران، بابلسر، ایران، آذر ماه، ص ۸-۱.
۴. قاسم‌پور ن، کیانی م، ۱۳۸۹. بررسی پایداری تونل‌های تکی و دوقلوی خط ۲ قطار شهری تبریز در برابر بارهای زلزله. چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ۱۱ تا ۱۲ آبان ماه، ص ۸-۱.
۵. مؤمن زاده م ر، منصوری م ر، عظیمی نژاد آ، ۱۳۹۲. مقایسه ای بین رفتار تونل‌های دوقلو و تکی با در نظر گرفتن اندر کنش خاک و سازه، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، ۳۰ مهر و ۱ آبان ماه، ص ۸-۱.

6. Asheghabadi MS, Matinmanesh H. 2011. Finite element seismic analysis of cylindrical tunnel in sandy soils with consideration of soil tunnel interaction. Sciencedirect. 14:3162-3169.
7. Hashash YMA, Hook JJ, Schmidt B, 2001. Seismic design and analysis of underground structures. Sciencedirect. 16:247-293.
8. Hatambeigi M, Pashang Pishhe Y, Pashang Pishhe m, 2012. The dynamic behavior of shield circular tunnels and surrounding granular soils during earthquakes.
9. Huabei Liu, Erxiang Song, 2005. Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations. Sciencedirect. 32:223-244.

10. Lee KM , Tang DKW, 2003. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. NRC Canada. 41: 523-539
11. Abaqus theory manual. Version 11.6 Hibbitt. 2011. Pawtucket (RI): Karlsson and Sorensen, Inc.
12. Abuhajar, O., El Naggar, H., and Newson, T. (2011), Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density. Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada.
13. Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., Panji, M, (2012), "Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity", International Journal of Civil Engineering. Vol. 11, No. 1; pp. 45-54.
14. Alielahi, Hamid, Kamalian, Mohsen, Adampira, Mohammad, (2015), "Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 71- 63-79.
15. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. Tunnelling and Under-ground Space Technology; 44, 10-22.
16. Crichlow, Joel M., (1982), "The Effect of Underground Structure on Seismic Motions of the Ground Surface", Geophys. J. R. astr. SOC, 70, pp. 563-575.
17. Hadly P.K., Askar, A., Cakmak, A.S., (1989), "Scattering of Waves by Inclusions in a Nonhomogeneous Elastic Half Space Solved by Boundary Element Methods", Technical Report NCEER-89-0027.
18. Luco, JE, De Barros, FCP., (1994) , "Dynamic Displacements and Stresses in the Vicinity of a Cylindrical Cavity Embedded in a Half-space", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23, pp. 321-340.
19. Lanzano, G., Bilotta, E., Russo, G., Silvestri, F., and Madabhushi, S.P.G. (2012) Centrifuge modelling of seismic loading on tunnels in sand. Geotechnical Testing Journal, 35(6), 854-869.
20. Sgarlato, G., Lombardo, G., and Rigano, R. (2011) Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy. Engineering Geology, 122, 281-291.
21. Sica, S., Russo, A.D., Rotili, F., and Simonelli, A.L. (2015) Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils. Natural Hazards, 71(3), 1913-1935.
22. Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G. Sofianos, A., (2007), "Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures", Dynamic Response and Soil Properties, Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics.