

بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای و خسارات ایجاد شده در تونل‌ها با در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله

محمد رضا مؤمن زاده^{۱*}؛ محمدرضا منصوری^۲؛ آرمین عظیمی نژاد^۲؛ پنا م زرفام^۲

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی زلزله؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۳/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی	چکیده
حوزه نزدیک گسل	تونل‌ها یکی از سازه‌های مهم عمرانی هستند که به عنوان یک شریان حیاتی مطرح می‌باشند.
هندسه تونل	برخلاف تصور عمومی که اثر زلزله بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی را ناچیز می‌دانستند، موارد فراوانی در مطالعات محققین در سال‌های اخیر وجود دارد که اهمیت اثرات تخریبی زلزله را بر این نوع سازه‌ها نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر خسارت وارده بر پوشش تونل لازم است رفتار غیرخطی مناسب در نظر گرفته شود، که این مورد کمتر در تحقیقات پژوهشگران دیده شده است.
ارتفاع روباره خاک	در این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود <i>ABAQUS6-11-1</i> ، در نظر گرفتن مدل غیرخطی درآگرپراگر اصلاح شده برای خاک و مدل غیرخطی آسیب پلاستیسیته بتن برای پوشش تونل، اثر پارامترهای هندسه پوشش تونل، ارتفاع روباره و نوع خاک پیرامون تونل در تعیین ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی، نیروی برشی و تغییر مکان افقی نقطه تاج پوشش تونل تحت دو رکورد زلزله حوزه نزدیک گسل با در نظر گرفتن مولفه قائم آن‌ها بررسی شده است. با بررسی‌های انجام گرفته مشخص شد که در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله بیشترین اثر را در تشدید پاسخ ماکزیمم نیروی محوری دارد. همچنین با بررسی‌های انجام شده در این مقاله هر چه ارتفاع روباره خاک پیرامون تونل بیشتر، ابعاد هندسی پوشش بزرگ‌تر و خاک پیرامون تونل سخت‌تر باشد؛ مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی افزایش و مقدار ماکزیمم تغییر شکل افقی نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه‌ای بین توزیع و مقدار خسارت ایجاد شده در پوشش تونل‌ها در حالات مذکور انجام شده است، که بحرانی‌ترین سناریوی آسیب، مربوط به تونلی با هندسه کوچک‌تر، خاک پیرامون نرم‌تر و ارتفاع روباره کمتر است.
پاسخ لرزه‌ای	
مولفه قائم زلزله	
نوع خاک	
خسارت پوشش تونل	

۱- مقدمه

خرابی‌های جدی در برخی تونل‌ها گردید. در سال‌های اخیر موارد فراوانی در کشورهای مختلف دیده شده که زلزله، خرابی‌های جدی به سازه‌های زیرزمینی وارد کرده است [1]. حال اگر تونل‌ها در مجاورت گسل قرار داشته باشند، وقوع زلزله باعث به وجود آمدن صدمات و آسیب‌های بیشتری به سایت مورد نظر می‌شود. برای مثال زلزله ۱۹۹۵ کوبه (*kobe*) ژاپن صدمات جبران‌ناپذیری به تاسیسات سه ایستگاه زیرزمینی راه‌آهن که در نزدیکی گسل نوجیما قرار داشت، وارد کرد. در محل ایستگاه دایکای (*Daikay*) ستون‌های مرکزی بر اثر تغییر شکل حاصل از زلزله دچار

برخلاف سازه‌های روزمینی که نیروهای زلزله در قالب نیروهای اینرسی ظاهر می‌شود، در سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها که به مقدار قابل توجهی دارای درجه مهارشدگی به علت حفاظت توسط زمین هستند، طراحی و آنالیز بر مبنای نگرشی انجام می‌گیرد که ملاک اصلی آن تغییرشکل زمین و سازه است. این‌ها فاکتورهای سهیم در عملکرد بهتر لرزه‌ای برای سازه‌های زیرسطحی نسبت به سازه‌های روسطحی هستند. تا قبل از سال ۱۹۹۵، تونل‌ها در برابر بارهای دینامیکی طراحی نمی‌شدند، اما زلزله‌های دهه ۱۹۹۰، باعث

* تهران، میدان پونک، انتهای بزرگراه اشرافی اصفهانی به سمت حصارک، میدان دانشگاه آزاد اسلامی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی زلزله، طبقه دوم، کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵/۷۷۵؛ شماره‌ی تلفن: ۴۴۸۶۸۴۲۸-۰۲۱؛

نمابر: ۴۴۸۶۵۱۰۵-۰۲۱؛ ایمانامه: mr.momenzadeh@srbiau.ac.ir

زلزله‌های نزدیک گسل مثل کوبه و چای‌چای (*chi chi*) نشان می‌دهد که در زلزله‌های نزدیک گسل، دو عامل بسیار مهم بر زلزله تاثیر می‌گذارد:

(الف) تاثیر جهت‌پذیری پیشرو یا پسرو که به مکانیزم گسیختگی و جهت گسترش گسلش وابسته است.
(ب) تغییر مکان ماندگار که به علت لغزش گسل به وجود می‌آید [8].

مولفه قائم زلزله یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل است. پارامترهای موثر بر مولفه قائم زلزله عبارتند از:

(الف) بزرگی زلزله؛ با افزایش بزرگی زلزله طیف پاسخ مولفه قائم افزایش می‌یابد.

(ب) فاصله از گسل؛ با افزایش فاصله از گسل مقدار طیف مولفه قائم کاهش می‌یابد.

(پ) جنس خاک؛ مقدار طیف مولفه قائم زلزله در پرریوده‌های بالا برای خاک‌های مختلف بسیار نزدیک به هم هستند، ولی در پرریوده‌های پایین برای خاک‌هایی که قدمتشان کمتر از ۱۱۰۰۰ سال است از سایر خاک‌ها بیشتر است.

(ت) نوع گسل؛ مقدار طیف قائم و افقی برای گسل‌های معکوس با عمق کانونی سطحی و زیاد از مقادیر مربوط به گسل امتداد لغز بیشتر است و برای پرریوده‌های بزرگ‌تر از ۱ ثانیه برای انواع گسل‌ها بر یکدیگر منطبق است [8].

با توجه به مطالب ذکر شده، بررسی اثر مولفه قائم در زلزله حوزه نزدیک گسل و تاثیر آن بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک و تونل موجب کاهش خطا در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای تونل می‌شود. استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی در شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای واقعی سازه، تنها با وجود تاریخچه زمانی شتاب مناسب (سازگار با شرایط خاک محلی سایت) امکان‌پذیر است. یکی از عواملی که در رسیدن به پاسخ‌های واقعی سازه هنگام وقوع زلزله در حوزه نزدیک گسل، موثر است، در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله در سایت مورد نظر است.

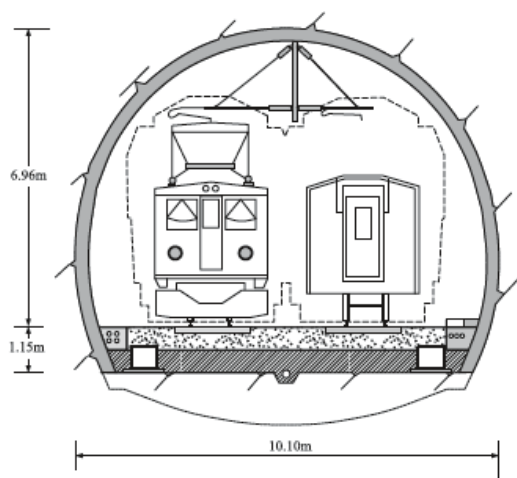
در این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار *المان محدود Abaqus6-11-1*، دو هندسه تونل نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل تحت آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی تحت دو رکورد

شکستگی برشی شده و قابلیت باربری خود را از دست دادند [2].

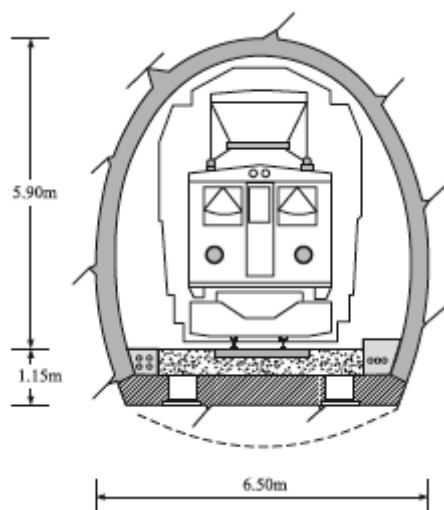
به طور کلی روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی عبارتند از: روش‌های تجربی، روش مدل‌فیزیکی، روش‌های ریاضی، تحلیل شبه‌استاتیکی و روش‌های عددی. روش‌های عددی که با استفاده از روش‌های اجزای مجزا، تفاضل محدود، اجزای محدود و ... انجام می‌شود، دارای بیشترین کارایی در تحلیل مسایل پیچیده بوده و از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در تعیین پاسخ‌های لرزه‌ای تونل برخوردار است.

ونگ (*Wang*) و پنزین (*Penzien*)، با بهره‌گیری از روش‌های ریاضی به تخمین نیروهای وارده بر پوشش تحت بارگذاری ساده شده با توجه به هندسه تونل (دایره‌ای، مستطیلی) پرداختند [3] و [4]. هاشاش (*Hashash*) روابط تحلیلی و ننگ و پنزین، را با آنالیز عددی *المان محدود PLAXIS* مقایسه کرد [5] و [6]. در اکثر مطالعات معتبر انجام شده بار زلزله و شرایط مدل‌سازی دینامیکی به طور تقریبی شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین از در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله در تحلیل‌ها چشم‌پوشی شده است. به طور مثال ونگ و هاشاش بار زلزله را به طور تقریبی به شکل بار متمرکز گره‌ای یا مثلث وارون در نظر گرفته و از اثرات غیرخطی بودن پوشش و خاک پیرامون تونل صرف نظر کرده‌اند.

معمولاً در زلزله نزدیک گسل، مولفه قائم ممکن است از مولفه افقی بزرگ‌تر باشد. ویژگی دیگر رکورد زلزله نزدیک گسل این است که ماهیت پالس‌گونه دارد. از آن‌جا که پرریود این پالس مقدار بزرگی است اکثر سازه‌ها رفتاری شبیه به رفتار در ناحیه شتاب ثابت در طیف پاسخ خواهند داشت. به علت این که حرکت به صورت یک پالس است، میرایی مانند رکورد زلزله‌های دور از گسل موثر نخواهد بود. در مناطق نزدیک گسل، حرکات زمین به طور شدید تحت تاثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین است. پژوهشگران فواصل متفاوتی بین ۱۰ تا ۵۰ کیلومتر را به عنوان محدوده حوزه نزدیک پیشنهاد داده‌اند. مثلاً *UBC-97* فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر نسبت به کانون را به عنوان حوزه نزدیک در نظر گرفته است [7]. مطالعات انجام شده بر روی تعداد زیادی از



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) هندسه پوشش تونل با مقطع نعلی شکل - ب) هندسه پوشش تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای [10]

مدل‌سازی خاک و تونل به صورت دوبعدی و با شرایط کرنش مسطح (*Plane strain*) انجام شده است. ضخامت پوشش تونل‌ها ۳۰ سانتی‌متر بوده و دو ردیف آرماتور خمشی $\Phi 20@20cm$ در جوجه داخلی و خارجی پوشش با المان *wire* در نرم افزار *ABAQUS* مدل‌سازی شده است. برای تعریف مشخصات غیرخطی بتن پوشش تونل از مدل رفتاری (*Concrete Damage Plasticity*) استفاده شده است. این مدل رفتاری پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل برای بتن در نرم‌افزار *Abaqus* است.

زلزله منجیل و کوبه، با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم قرار گرفته است. برای تعریف مشخصات مصالح غیرخطی پوشش بتن‌آرمه تونل در نرم‌افزار *Abaqus* از مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده بتن (*Concrete Damage Plasticity*) و برای مدل‌سازی خاک‌ها، از مدل رفتاری دراگرپراگر اصلاح شده (*Cap Model*) استفاده شده است. همچنین برای رسیدن به نتیجه‌ای جامع‌تر در آنالیزها از دو نوع خاک *A* و *B* با دو ارتفاع روباره ۵ و ۲۰ متر استفاده شده است.

برای ارزیابی خسارت در پوشش با توجه به تعریف مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده، امکان مقایسه توزیع خسارت و ماکزیمم عرض ترک ایجاد شده در انتهای رکورد زلزله در این مقاله فراهم شده است.

با توجه به این که بار زلزله در اکثر آیین‌نامه‌های تحلیل و طراحی لرزه‌ای تونل‌ها مانند *FHWA* و *Hashash* (2001) به صورت تقریبی در نظر گرفته شده و همچنین از اثرات غیرخطی بودن پوشش تونل و خاک پیرامون آن صرف نظر شده است [6] و [9]، هدف اصلی در این مقاله تخمین دقیق نیروها و تغییرشکل‌ها و خسارات ایجاد شده در پوشش تونل‌ها با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک و پوشش تونل تحت رکورد تاریخیچه زمانی غیرخطی با شرایط مدل‌سازی پیشرفته و نزدیک به واقعیت است.

مشخصات مدل‌های مورد استفاده در

تحلیل‌های عددی

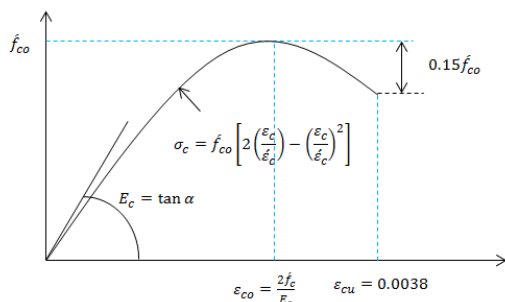
مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحلیل‌های عددی در ادامه تشریح شده است.

۱-۲- هندسه و مصالح پوشش تونل‌ها

به طور کلی هرچه انحنا و قوس‌های ایجاد شده در طراحی تونل بیشتر باشد، مقاومت لرزه‌ای تونل بیشتر و هزینه نگهداری و بهره‌برداری تونل کمتر می‌شود.

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی ابعاد هندسی مقطع تونل است. در این پژوهش دو مقطع با ۲ هندسه نعلی و نیم‌دایره‌ای، در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور استفاده از نمونه‌های اجرایی، ابعاد تونل نعل اسبی بر اساس یک خط عبور واگن و ابعاد مقطع نیم‌دایره‌ای بر اساس دو خط عبور واگن مطابق با مقاطع معمول در تونل‌های مترو استفاده شده است.

البته میزان غیرخطی شدن آن در کرنش‌های کوچک، ناچیز است.



شکل ۲- نمایی از مدل Hognestad [13]

از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش بررسی خسارات ایجاد شده در پوشش تونل‌ها است، *Damage* (خسارت) برای پوشش تونل‌ها تعریف شده است. برای بتن پوشش تونل، دو نوع خسارت در این مدل تعریف شده است:

الف) خسارت فشاری (*Compression Damage*)

ب) خسارت کششی (*Tensile Damage*)

خسارت فشاری بتن (d_c) که بر حسب کرنش غیر الاستیک، تعریف می‌شود، شیب باربرداری منحنی را مطابق شکل ۳ کنترل می‌نماید. در بتن، هر چه کرنش‌های پلاستیک بیشتر شود، شیب بازگشت منحنی به میزان بیشتری از شیب اولیه (مدول الاستیسیته) کاسته می‌شود. که این امر ناشی از خسارت ایجاد شده در مصالح ترد است. به این ترتیب خسارت فشاری (d_c) از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (2)$$

مقدار مقاومت کششی بتن را بین ۷٪ تا ۱۰٪ مقاومت فشاری آن در نظر می‌گیرند. برخلاف رفتار فشاری، بتن به صورت ناگهانی و با شیب تندی مقاومت خود را از دست داده و عملاً به مقاومت صفر می‌رسد. به این ترتیب خسارت کششی (d_t) از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (3)$$

در شکل ۴ نمایی از تاثیر خسارت کششی در رفتار باربرداری در فاز کششی نشان داده شده است.

در مکانیسم آسیب فرض بر این است که کاهش سختی در اثر ایجاد و گسترش ترک‌های ریز (*Micro Crack*) بوده، به طوری که بتوان این کاهش سختی را با پارامتری به نام آسیب (*Damage*) اندازه‌گیری و مشخص کرد. در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود. در این مدل مکانیسم اصلی شکست خردشدن فشاری بتن است. برای تعریف رفتار فشاری بتن باید تنش‌های فشاری را به صورت تابعی از کرنش‌های غیرالاستیک تعریف کرد. برای تنش‌های فشاری و کرنش باید مقادیر مثبت به کار رود. این مدل توانایی شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای بتن را نیز به خوبی داراست. معیار خرابی این مدل رفتاری، دراگرپراگر و تابع تسلیم آن *Lubliner* است [11] و [12].

مشخصات پلاستیک این مدل رفتاری به جز زاویه اتساع داخلی بتن، در نرم‌افزار *Abaqus* مقادیر پیش فرض دارد. زاویه اتساع داخلی، نسبت کرنش حجمی به کرنش برشی مصالح است. زاویه اتساع داخلی بتن، معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ درجه فرض می‌شود و بر روی شکل‌پذیری مصالح و در نتیجه شکل‌پذیری کل مدل تاثیر دارد. با افزایش این زاویه مقدار شکل‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. در عمل زاویه اتساع داخلی بتن وابسته به پارامترهایی نظیر فشار محصور کننده و کرنش پلاستیک است و با افزایش این دو پارامتر معمولاً این زاویه کاهش می‌یابد.

البته مطالعات اندکی بر روی وابستگی زاویه اتساع داخلی به سایر پارامترها انجام شده است. با انتخاب مقدار ۰٫۱ برای پارامتر خروج از مرکزیت معیار جریان پتانسیل، عملاً فرض می‌شود مقدار زاویه اتساع داخلی با تغییر فشار محصور کننده تغییر چندانی نکند.

برای تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن غیرمحصور می‌توان از نتایج آزمایشگاهی استفاده نمود یا این که از مدل‌های رفتاری موجود در این زمینه مانند مدل *Hognestad* بهره برد (شکل ۲). رابطه ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$\sigma_c = f_{co} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

رابطه ۱ از ابتدا رفتار بتن را غیرخطی فرض می‌کند.

جدول ۱- مشخصات غیرخطی کششی بتن در مدل آسیب

پلاستیسیته [۱۴]	
کرنش پلاستیک	تنش کششی (KN/m^2)
۰	۲۵۰
۰,۰۰۱	۲,۵

جدول ۲- مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در مدل رفتاری پلاستیسیته آسیب دیده [۱۴]

پارامتر	شرح	مقدار
ψ	زاویه اتساع بتن (درجه)	۲۰
ϵ	خروج از مرکزیت بتن	۰,۱
fbo/fco	نسبت تنش تسلیم فشاری دومحوره به تک محوره	۱,۱۶
K	نسبت تنش ثانویه به ماکزیمم مقدار کشش	۰,۶۶۷
μ	پارامتر ویسکوزیته در معادلات تعادل بتن	۰,۰۱

جدول ۳- مشخصات الاستیک بتن مسلح پوشش تونل [۱۴]

پارامتر	شرح	واحد	بتن	آرماچورها
ϑ_{lining}	ضریب پواسون	-	۰,۲	۰,۳
ρ_{lining}	جرم مخصوص	(kg/m^3)	۲۲۵۰	۷۸۵۰
E_{lining}	مدول الاستیسیته	(GN/m^2)	۲۰,۶۴	۲۱۰

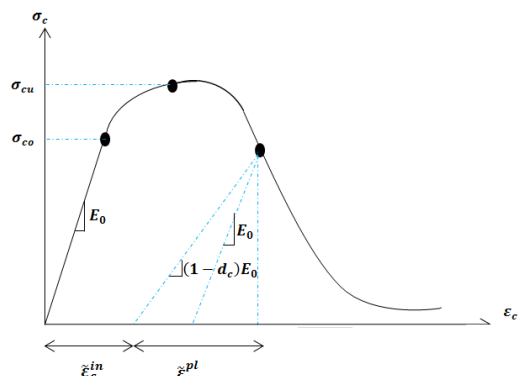
هندسه مدل و مصالح خاک‌ها

هر کدام از مدل‌های المان محدود خاک و تونل با دو ارتفاع روباره ۵ و ۲۰ متر مدل‌سازی شده‌اند. ابعاد مدل المان محدود خاک بر طبق پیشنهاد ونگ به صورت زیر پیشنهاد شده است [3].

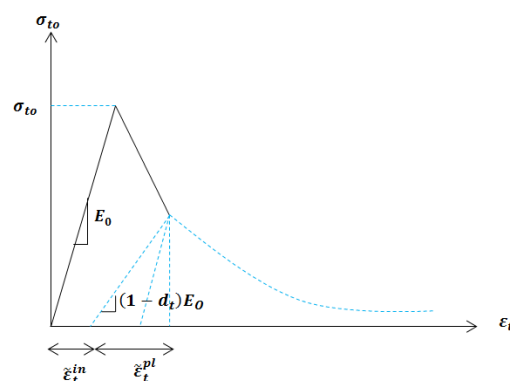
$$(۴) \quad (\text{عرض سازه}) \geq 10 \cdot (\text{عرض مدل خاک})$$

$$(۵) \quad (\text{طول موج برشی}) \geq 0.25 \cdot (\text{ارتفاع مدل خاک})$$

ابعاد خاک مدل‌سازی شده برای مدل‌های با ارتفاع روباره ۵ متر، $45 \times 100m$ و برای مدل‌های با ارتفاع روباره ۲۰ متر، $60 \times 100m$ است. در شکل‌های ۶ و ۷ به عنوان نمونه، مدل‌های المان محدود خاک و تونل نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در ارتفاع ۵ متر نشان داده شده است. با توجه به ۲ هندسه تونل، ۲ نوع خاک و ۲ ارتفاع روباره و ۲ رکورد زلزله به همراه مولفه قائم آن در مجموع در این مقاله ۱۶ مدل المان محدود خاک و تونل تحت آنالیز دینامیکی

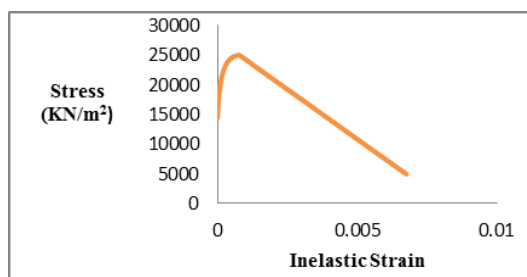


شکل ۳- تاثیر خسارت فشاری بر شیب باربرداری در فاز فشاری [13]



شکل ۴- تاثیر خسارت کششی بر شیب باربرداری در فاز کششی [13]

منحنی تنش تسلیم فشاری بر حسب کرنش غیرخطی بتن در شکل ۵، مشخصات غیرخطی کششی بتن در جدول ۱ و مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در جدول ۲ آمده است. همچنین مشخصات الاستیک مصالح فولاد و بتن پوشش تونل، در جدول ۳ آمده است [13].

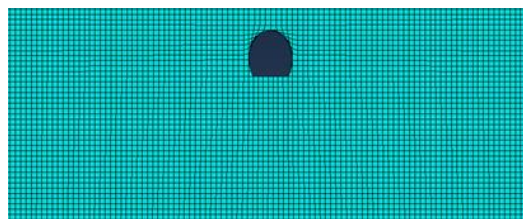


شکل ۵- منحنی تنش کرنش غیرالاستیک فشاری بتن [۱۴]

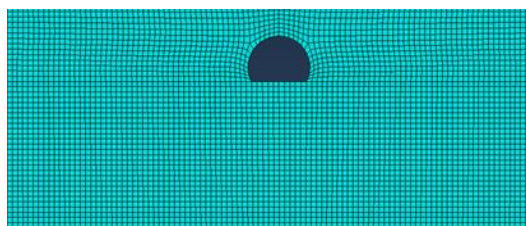
غیرخطی قرار گرفته‌اند.

باید دقت شود در تحلیل‌های دینامیکی مدول الاستیسیته دینامیکی خاک مطابق رابطه زیر در آنالیز به کار رود [15]:

$$E_{Dynamic} = 2(1 + \nu_s)\rho_s Cse^2 \quad (6)$$



شکل ۶- مدل المان محدود خاک و تونل نعلی شکل با ارتفاع روباره ۵ متر



شکل ۷- مدل المان محدود خاک و تونل نیمدایره‌ای با ارتفاع روباره ۵ متر

برای تعریف مصالح خاک از مدل دراگرپراگر اصلاح شده استفاده شده است. مدل پلاستیسیته دراگرپراگر با کلاهک به واسطه در نظر گرفتن اثر تاریخچه تنش، مسیر تنش، اتساع (*Dilation*) و اثر تنش اصلی (*Intermediate Principal Stress*) در نرم‌افزارهای المان محدود برای گستره وسیعی از مسایل ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل دراگرپراگر اصلاح شده به منظور مدل‌سازی مصالح چسبنده بکار می‌رود که یک حالت جاری شدن وابسته به فشار را مانند مصالح خاکی و سنگی ارائه می‌دهد. این مدل بر پایه افزایش یک سطح جاری شدن بر مدل پلاستیسیته دراگرپراگر است که یک مکانیسم سخت شونده‌گی غیرارتجاعی را برای منظور نمودن حالت بهم فشردگی خمیری (*Plastic Compaction*) تامین می‌کند تا اتساع حجم را در ماده، هنگامی که تحت برش جاری

می‌شود، کنترل نماید.

سطح تسلیم این مدل شامل یک کلاهک بیضوی، یک سطح گسیختگی برشی مطابق با معیار دراگرپراگر اصلاح شده و یک ناحیه انتقال هموار بین سطح گسیختگی برشی و کلاهک می‌باشد.

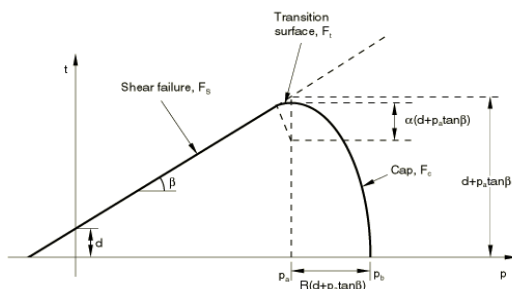
سطح جاری شدن کلاهکی به دو دلیل اصلی به مدل دراگر پراگر افزوده شد:

نخست این که سطح جاری شدن را در حالت فشردگی هیدرواستاتیک محدود می‌کند. بنابراین یک مکانیسم سخت شونده‌گی غیرارتجاعی را جهت منظور نمودن حالت بهم فشردگی خمیری تامین می‌نماید.

دوم این که از طریق تامین نرم‌شونده‌گی که تابعی از افزایش حجم غیر ارتجاعی است، اتفاق می‌افتد و در کنترل اتساع حجم در ماده هنگامی که تحت برش جاری می‌گردد، کمک می‌نماید.

در شکل ۸ سطح گسیختگی مدل دراگرپراگر اصلاح شده نشان داده شده است. مشخصات الاستیک و پلاستیک خاک‌های *A* و *B* مطابق مدل دراگرپراگر اصلاح شده در جدول ۴ آمده است.

لازم به ذکر است که پارامتر نسبت تنش جریان (*Flow Stress Ratio*) (*K*)، شکل سطح تسلیم مدل را در صفحه π کنترل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در صورتی که مقدار این پارامتر برابر یک انتخاب شود، شکل سطح تسلیم به صورت دایره کامل خواهد بود و در این حالت نامتغیر سوم تنش در سطح تسلیم بی‌اثر می‌شود. هرگاه مقدار این پارامتر کاهش داده شود، شکل سطح منحنی محاطی دارای سه گوش خواهد شد [۱۶].



شکل ۸- سطح گسیختگی مدل دراگرپراگر اصلاح شده (Cap Model) [۱۶]

برای حفظ تحدب شکل سطح تسلیم، مقدار این پارامتر نمی‌تواند کوچک‌تر از ۰٫۷۸۸ اختیار شود. در مدل‌سازی با فرضیات کرنش مسطح و نیز خاک‌هایی که زاویه اصطکاک مؤثر آنها ناچیز است، مقدار این پارامتر برابر یک انتخاب می‌شود. پارامترهای β (زاویه اصطکاک دراگرپراگر) و d (چسبندگی مصالح دراگرپراگر) در شرایط کرنش مسطح (*Plane strain*) به کمک روابط زیر به دست می‌آیند [۱۶]:

$$\tan \beta = \frac{3\sqrt{3} \tan \varphi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}} \quad (7)$$

$$d = \frac{3\sqrt{3}C}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}} \quad (8)$$

۳- شرایط مدل‌سازی دینامیکی

۳-۱- میرایی خاک

میرایی مصالح در خاک عموماً از مشخصات ویسکوزیته، اصطکاک و توسعه پلاستیسیته ناشی می‌شوند. جهت انجام آنالیزهای خاک و سازه نیاز به ماتریس میرایی خاک است، ضرایب α و β ماتریس میرایی، مطابق روش رایلی محاسبه شده است [۱۷].

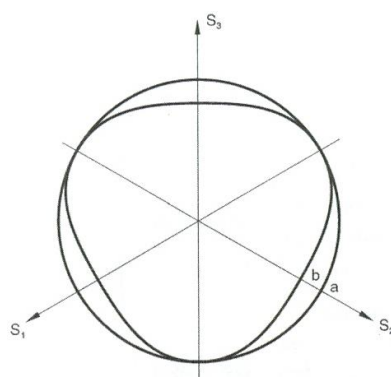
$$[c] = \alpha [m] + \beta [k] \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (10)$$

مقادیر α ، β ، درصد میرایی، فرکانس‌های مود اول مدل برای محیط شامل خاک و تونل‌های با مقطع نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل با ارتفاع روباره‌های ۵ و ۲۰ متر در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات الاستیک و پلاستیک خاک‌های A و B مطابق مدل دراگرپراگر اصلاح شده (*Cap Model*) [۱۶]

پارامتر	شرح	واحد	خاک A	خاک B
E_s	مدول الاستیسیته دینامیکی	(GN/m^2)	۱٫۰۱	۰٫۳۵
ρ_s	جرم مخصوص	(kg/m^3)	۱۹۲۵	۱۷۹۰
e_0	نسبت تخلخل اولیه	-	۱٫۵	۰٫۸۸۹
K	نسبت تنش جریان	-	۱	۱
α	شعاع سطح انتقالی	-	۰٫۱	۰٫۰۵
β	زاویه اصطکاک دراگرپراگر	deg	۴۴٫۵۶	۲۶
d	چسبندگی مصالح در مدل دراگرپراگر	-	۰٫۰۰۰۰۱	۶۸۰
R	خروج از مرکزیت کلاهک	-	۰٫۴	۱
ψ	زاویه اتساع دراگرپراگر	deg	۰٫۱	۰٫۱
ν_s	ضریب پواسون	-	۰٫۲۸	۰٫۳۷
C_{se}	سرعت موج برشی مؤثر	(m/s)	۴۸۰	۳۲۵



شکل ۹- اثر پارامتر K در شکل سطح تسلیم [۱۶]

جدول ۵- مقادیر α و β ماتریس میرایی خاک‌های A و B برای محیط شامل تونل نعلی شکل [۱۷]

ارتفاع روباره: ۲۰ متر		ارتفاع روباره: ۵ متر		پارامتر
خاک A	خاک B	خاک A	خاک B	
۰٫۰۵۸۹	۰٫۰۷۶۸	۰٫۰۶۵	۰٫۰۹۸۴	α
۰٫۰۰۵۵	۰٫۰۱۱۱	۰٫۰۰۵۹	۰٫۰۱۰۱	β
۵	۴	۵	۴	میرایی (درصد)
۱٫۲۵	۰٫۳۱	۰٫۹۵	۰٫۲۹	فرکانس مود اول (Hz)

جدول ۶- مقادیر α و β ماتریس میرایی خاک‌های A و B برای محیط شامل تونل نیم‌دایره‌ای [17]

پارامتر	ارتفاع روباره: ۵ متر		ارتفاع روباره: ۲۰ متر	
	خاک A	خاک B	خاک A	خاک B
α	۰,۱۲۳	۰,۰۹۱	۰,۱۱۲	۰,۰۷۵
β	۰,۰۱۳۴	۰,۰۰۷۷	۰,۰۱۵۸	۰,۰۰۷۵
میرایی (درصد)	۴	۵	۴	۵
فرکانس مدل در مود اول (Hz)	۰,۳۹	۱,۳۵	۰,۳۸	۱,۶۵

۳-۲- مرزهای جاذب انرژی

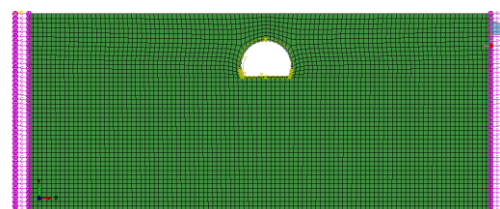
با توجه به نیمه بی‌نهایت بودن مدل واقعی، انرژی لرزه‌ای وارد شده به مدل بایستی از طریق مرزها خارج شود (میرایی هندسی). روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی (*Absorbent boundary*) وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرز ویسکوز است. در این روش المان‌های میراگر در مرزها قرار داده شده که ضریب این المان‌های میراگر از روابط زیر به دست می‌آید [18].

$$F_d = C_d \cdot \dot{u} \quad (11)$$

$$C_d = \rho \cdot C_{se} \cdot A \quad (12)$$

دو نوع المان فنر و میراگر در نرم‌افزار ABAQUS وجود دارد. در ABAQUS/Standard فقط المان یک‌گره‌ای وجود دارد. در ABAQUS/Explicit فقط از نوع دوگره‌ای می‌توان استفاده کرد. با توجه به این که در این مقاله برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی از ABAQUS/Explicit استفاده شده است المان‌های فنر و میراگر در مازول Interaction با استفاده از منوی Springs/Dashpots تعریف می‌شود.

در شکل ۱۰ به عنوان نمونه مدل‌سازی این المان‌ها در مرزهای آزاد مدل المان محدود، برای تونل نیم‌دایره‌ای با ارتفاع روباره ۵ متر نشان داده شده است [13].



شکل ۱۰- نحوه مدل‌سازی مرزهای جاذب انرژی در نرم‌افزار ABAQUS

۳-۳- نحوه مدل‌سازی المان سطح مشترک خاک و تونل

هر سطح مشترک به صورت یک ضخامت مجازی بیان می‌شود. هر چقدر این ضخامت بیشتر باشد، تغییر شکل الاستیک بیشتری تولید می‌شود. با توجه به این که اطراف تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی خاک وجود دارد، *interface* خاک و سازه باید به نحو درستی تعریف شود.

اصطکاک بین خاک و سازه از دو رفتار نرمال و مماسی تشکیل شده است. روش اصطکاک تعریف شده در مدل‌ها روش کلمب است که در آن ضریب اصطکاک را با تقریب خوبی برابر $0.6 \tan \phi$ در نظر گرفته و از طرفی کشش بین خاک و تونل حذف می‌شود [۱۹]. ضریب اصطکاک محاسبه شده برای خاک‌های A و B در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- مقادیر ضریب وزاویه اصطکاک برای مدل‌سازی

interface در خاک‌های A و B [13]		
پارامتر	خاک A	خاک B
ϕ (زاویه اصطکاک)	۴۴,۵۶	۲۶
μ (ضریب اصطکاک)	۰,۵۹	۰,۲۹

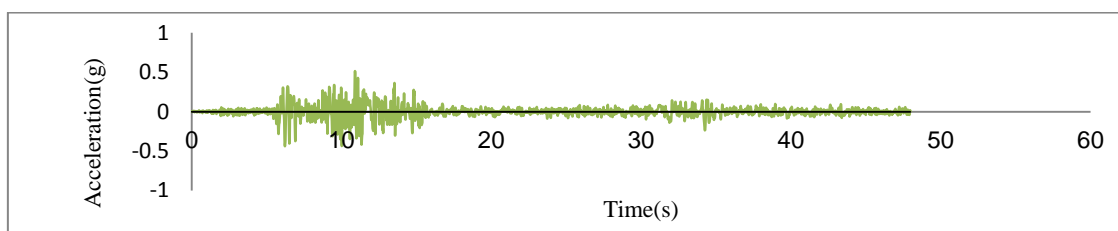
۳-۴- مشخصات رکوردهای زلزله

استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی در شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای واقعی سازه، تنها با وجود تاریخچه زمانی شتاب مناسب (سازگار با شرایط خاک محلی سایت) امکان‌پذیر است. در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله در سایت موردنظر باعث کاهش خطای بین مدل‌سازی و عمل می‌شود. مشخصات رکورد زلزله منجیل و کوبه با در نظر گرفتن اثر مولفه قائم آن در جدول ۸ و شناسنامه رکوردهای تاریخچه زمانی این دو زلزله در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است.

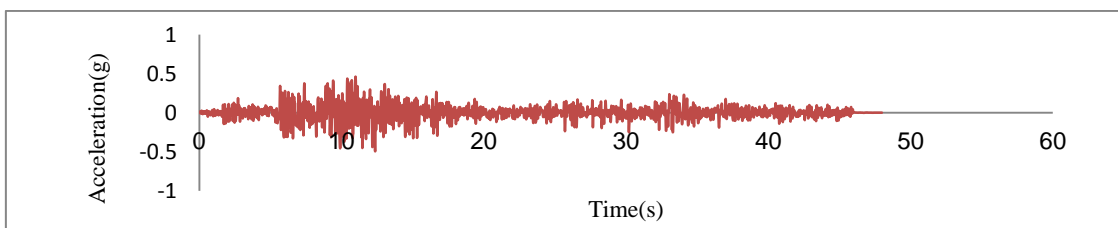
بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای و خسارات ایجاد شده در تونل‌ها با در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله؛ ص ۱۳-۳۲

جدول ۸- مشخصات رکوردهای زلزله منجیل و کوبه

<i>Kobe Vertical component</i>	<i>Kobe Horizontal component</i>	<i>Manjil Vertical component</i>	<i>Manjil Horizontal component</i>	پارامتر
۶/۹	۶/۹	۷/۴	۷/۴	<i>Mw</i>
۰/۶	۰/۸۲	۰/۴۸	۰/۵۱	<i>PGA(g)</i>
۰/۷۴	۰/۸۱	۵۳	۴۳/۸	<i>PGV(cm/s)</i>
۴۸	۴۸	۴۶	۵۳	<i>Duration (sec)</i>

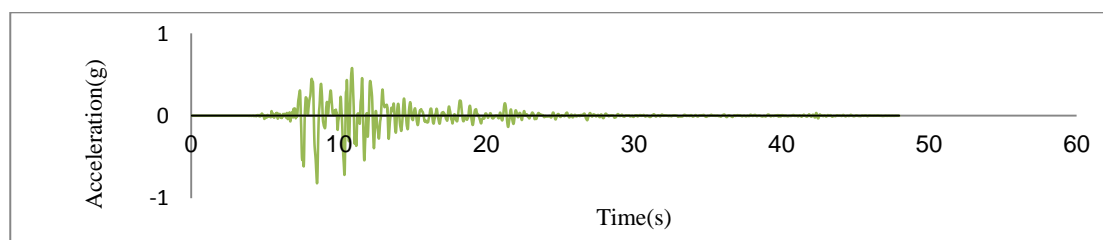


(الف)

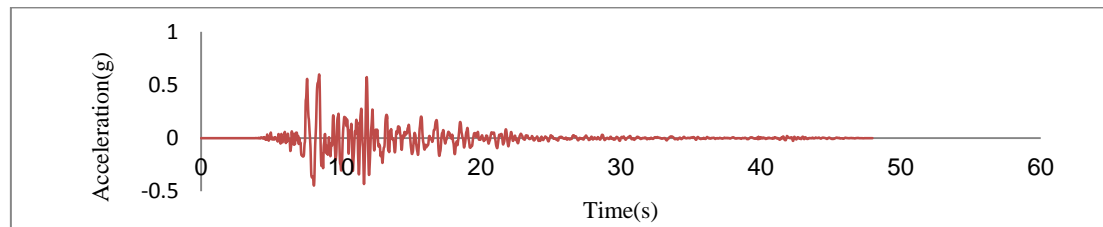


(ب)

شکل ۱۱- الف) مؤلفه افقی رکورد تاریخچه زمانی شتاب زلزله منجیل ب) مؤلفه قائم رکورد تاریخچه زمانی شتاب زلزله منجیل

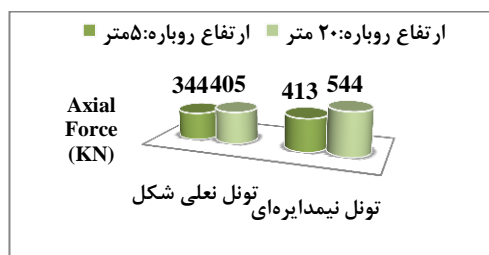


(الف)

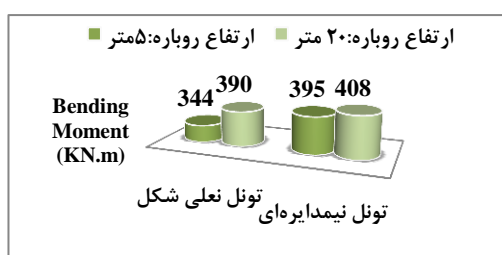


(ب)

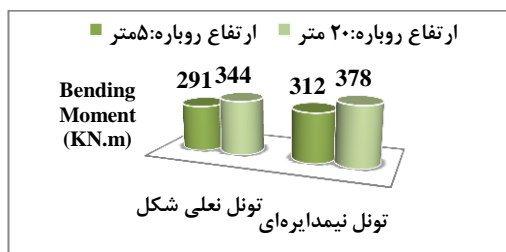
شکل ۱۲- الف) مؤلفه افقی رکورد تاریخچه زمانی شتاب زلزله کوبه ب) مؤلفه قائم رکورد تاریخچه زمانی شتاب زلزله کوبه



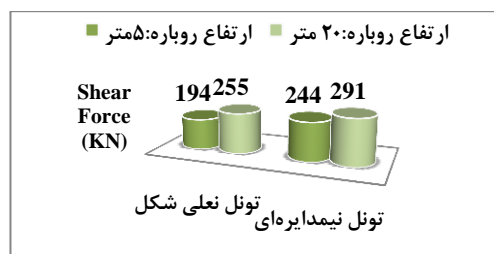
شکل ۱۴- مقایسه ماکزیمم نیروی محوری پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله منجیل



شکل ۱۵- مقایسه ماکزیمم لنگر خمشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله منجیل



شکل ۱۶- مقایسه ماکزیمم لنگر خمشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله منجیل



شکل ۱۷- مقایسه ماکزیمم نیروی برشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله منجیل

۳-۵- ابعاد و مشخصات مش بندی مدل المان محدود خاک و سازه

با انجام آنالیز همگرایی مش روی مدل‌های المان محدود خاک و سازه، ابعاد مش بهینه تعیین شده است. مطابق جدول ۹ مشخصه‌های مش بندی مدل المان محدود خاک و تونل برای المان‌های خاک، آرماورها و تونل در نرم‌افزار ABAQUS تعیین شده است.

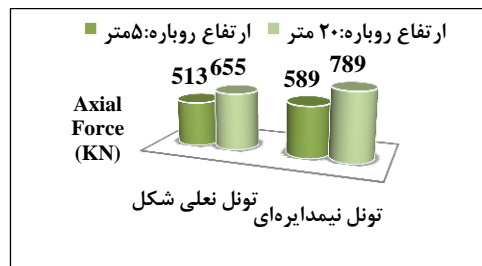
جدول ۹- مشخصه‌های مش بندی مدل المان محدود خاک

سازه [13]			
Element			پارامتر
Tunnel	Reinforcing bar	soil	
0.1	0.1	1	Global size
Plane strain	Beam	Plane strain	Element family
Explicit	Explicit	Explicit	Element library
Linear	linear	linear	Geometric order
CPE4R	B21	CPE4R	Name mesh

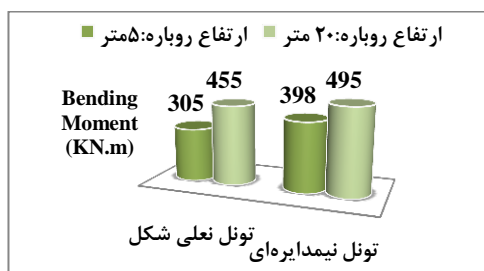
۴- اثر پارامترهای مختلف بر نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌ها

در این بخش مقایسه‌ای بین نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در خاک‌های A و B با ارتفاع روباره ۵ و ۲۰ متر تحت رکوردهای تاریخیچه زمانی منجیل و کوبه، انجام شده است.

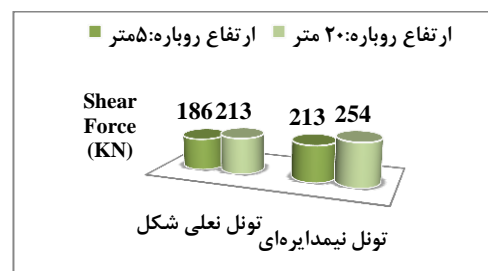
در شکل‌های ۱۳ تا ۲۴ مقایسه‌ای بین ماکزیمم نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی پوشش تونل تحت رکورد زلزله‌های منجیل و کوبه برای خاک‌های A و B با دو ارتفاع روباره ۵ و ۲۰ متر برای تونل‌های با مقطع نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل انجام شده است.



شکل ۱۳- مقایسه ماکزیمم نیروی محوری پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله منجیل

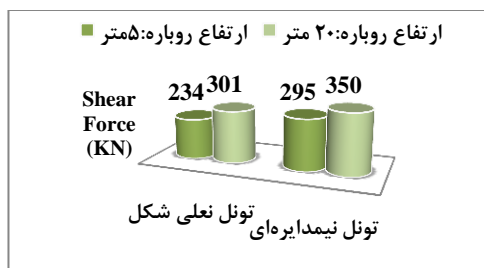


شکل ۲۲- مقایسه ماکزیمم لنگر خمشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله کوبه

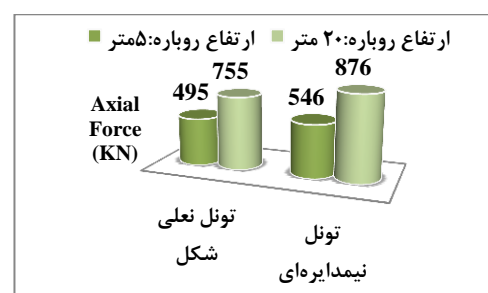


شکل ۱۸- مقایسه ماکزیمم نیروی برشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله

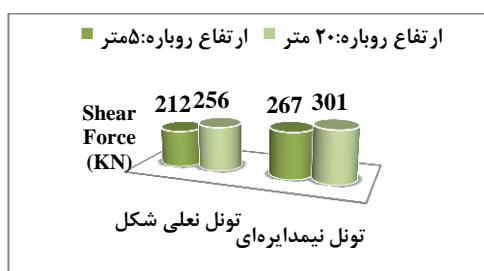
منجیل



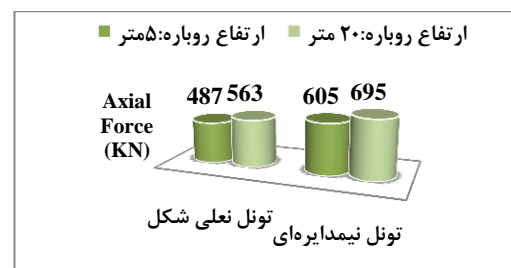
شکل ۲۳- مقایسه ماکزیمم نیروی برشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله کوبه



شکل ۱۹- مقایسه ماکزیمم نیروی محوری پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله کوبه



شکل ۲۴- مقایسه ماکزیمم نیروی برشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله کوبه

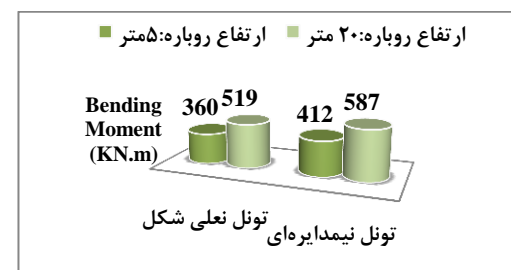


شکل ۲۰- مقایسه ماکزیمم نیروی محوری پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک B تحت رکورد زلزله کوبه

با بررسی شکل‌های ۱۳ تا ۲۴ نتیجه می‌شود:

۱- هر چه ارتفاع روباره خاک بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پوشش تونل افزایش می‌یابد. دلیل این امر اثر توام نیروهای ثقلی و زلزله در پوشش تونل است.

۲- با توجه به این که ضخامت پوشش تونل‌ها، ۰٫۳ متر و دو ردیف آرماتور خمشی $\Phi 20@20cm$ ، در دو مقطع نعلی و نیم‌دایره‌ای استفاده شده است و ارتفاع و دهانه در تونل نعلی شکل به ترتیب ۵٫۹ و ۶٫۵ متر و در تونل نیم‌دایره‌ای ۸٫۱ و ۱۰٫۱ متر است، می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۲۱- مقایسه ماکزیمم لنگر خمشی پوشش تونل‌های نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل در خاک A تحت رکورد زلزله کوبه

منجیل است. یکی از دلایل این است که رکورد زلزله کوبه در فاصله ۴ کیلومتری از گسل و رکورد زلزله منجیل در فاصله ۲۹ کیلومتری از گسل قرار دارند. دلیل دیگر این امر این است که PGA مولفه‌های افقی و قائم رکورد زلزله منجیل به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۴۸ و برای رکورد زلزله کوبه به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۶ است.

به منظور بررسی اثر در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله و تاثیر آن بر نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در جداول ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب مقایسه‌ای بین نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌ها در حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله در خاک‌های A و B تحت رکورد زلزله منجیل انجام شده است.

هر چه ابعاد هندسی (ارتفاع و دهانه) تونل بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پوشش نیز افزایش می‌یابد.

۳- در یک هندسه، رکورد زلزله و ارتفاع روباره خاص، مثلاً تونل نعلی شکل در ارتفاع روباره ۵ متر تحت رکورد زلزله منجیل، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پوشش تونل در خاک A بیشتر از خاک B است. یکی از دلایل این است که سرعت موج برشی خاک A بیشتر از خاک B بوده، همچنین مدول الاستیسیته دینامیکی و جرم مخصوص خاک A بیشتر از خاک B است.

۴- مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پوشش تونل در زلزله کوبه بیشتر از زلزله

جدول ۱۰- مقایسه نیروهای تونل نیم‌دایره‌ای در خاک A در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل

ارتفاع روباره		۵ متر		۲۰ متر	
نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل		بدون مولفه قائم زلزله	با مولفه قائم زلزله	خطای با و بدون مولفه قائم (%)	خطای با و بدون مولفه قائم (%)
نیروی محوری ماکزیمم (KN)		۵۸۹	۶۴۳	۹	۱۲
لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)		۳۹۵	۳۹۸	۰	۱۵
نیروی برشی ماکزیمم (KN)		۲۴۴	۲۵۵	۵	۴

جدول ۱۱- مقایسه نیروهای تونل نیم‌دایره‌ای در خاک B در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل

ارتفاع روباره		۵ متر		۲۰ متر	
نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل		بدون مولفه قائم زلزله	با مولفه قائم زلزله	خطای با و بدون مولفه قائم (%)	خطای با و بدون مولفه قائم (%)
نیروی محوری ماکزیمم (KN)		۴۱۳	۵۱۲	۲۴	۱۴
لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)		۳۱۲	۳۴۲	۱۰	۲
نیروی برشی ماکزیمم (KN)		۲۱۳	۲۱۳	۰	۲

جدول ۱۲- مقایسه نیروهای تونل نعلی در خاک A در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل

ارتفاع روباره		۵ متر		۲۰ متر	
نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل		بدون مولفه قائم زلزله	با مولفه قائم زلزله	خطای با و بدون مولفه قائم (%)	خطای با و بدون مولفه قائم (%)
نیروی محوری ماکزیمم (KN)		۵۱۳	۵۹۸	۱۷	۸
لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)		۳۴۴	۳۵۹	۴	۱۱
نیروی برشی ماکزیمم (KN)		۱۹۴	۲۰۵	۶	۱

جدول ۱۳- مقایسه نیروهای تونل نعلی در خاک B در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل

ارتفاع روباره			۵ متر			۲۰ متر		
نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل			بدون مولفه قائم زلزله	با مولفه قائم زلزله	خطای با و بدون مولفه قائم (%)	بدون مولفه قائم زلزله	با مولفه قائم زلزله	خطای با و بدون مولفه قائم (%)
نیروی محوری ماکزیمم (KN)			۳۴۴	۳۵۷	۴	۴۰۵	۴۹۴	۲۲
لنگر خمشی ماکزیمم (KN.m)			۲۹۱	۳۱۸	۹	۳۴۴	۳۶۰	۵
نیروی برشی ماکزیمم (KN)			۱۸۶	۲۰۳	۶	۲۱۳	۲۱۹	۳

۵- اثر پارامترهای مختلف روی تغییر شکل‌های

افقی ایجاد شده در پوشش تونل‌ها

در جداول ۱۴ و ۱۵ مقایسه‌ای بین ماکزیمم تغییر شکل‌های نقطه تاج تونل تحت رکورد زلزله منجیل و کوبه برای خاک‌های A و B با دو ارتفاع روباره ۵ و ۲۰ متر برای تونل‌های با مقطع نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل انجام شده است.

جدول ۱۴- مقایسه‌ای بین ماکزیمم تغییر شکل‌های افقی

ایجاد شده در نقطه تاج تونل‌ها تحت رکورد زلزله منجیل

پارامتر (m)	ارتفاع روباره: ۵ متر		ارتفاع روباره: ۲۰ متر	
	خاک A	خاک B	خاک A	خاک B
نعلی شکل Δ_{max}	۰٫۰۷	۰٫۱۴۷	۰٫۰۵۱	۰٫۰۹۵
نیم‌دایره‌ای Δ_{max}	۰٫۰۵۹	۰٫۱۱۹	۰٫۰۴۱	۰٫۰۷۹

جدول ۱۵- مقایسه‌ای بین ماکزیمم تغییر شکل‌های افقی

ایجاد شده در نقطه تاج تونل‌ها تحت رکورد زلزله کوبه

پارامتر (m)	ارتفاع روباره: ۵ متر		ارتفاع روباره: ۲۰ متر	
	خاک A	خاک B	خاک A	خاک B
نعلی شکل Δ_{max}	۰٫۰۸۵	۰٫۱۸۷	۰٫۰۵۵	۰٫۱۱۹
نیم‌دایره‌ای Δ_{max}	۰٫۰۸۹	۰٫۱۵	۰٫۰۷۸	۰٫۱۰۱

با بررسی مقادیر جداول ۱۴ و ۱۵ نتیجه می‌شود:

۱- بیشترین مقدار تغییر شکل افقی ایجاد شده تحت رکورد زلزله منجیل، ۰٫۱۴۷ متر در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در تونل نعلی شکل اتفاق می‌افتد. همچنین بیشترین مقدار تغییر شکل افقی ایجاد شده تحت رکورد زلزله کوبه، ۰٫۱۸۷ متر در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در تونل

با دقت در جداول ۱۰ تا ۱۳ نتیجه می‌شود:

۱- بیشترین و کمترین میزان خطا در پوشش تونل‌ها در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل به ترتیب عبارتند از:

الف) در حالت ماکزیمم نیروی محوری، بیشترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۲۴٪ در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای و کمترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۴٪ در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نعلی شکل است.

ب) در حالت ماکزیمم لنگر خمشی، بیشترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۱۵٪ در خاک A با ارتفاع روباره ۲۰ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای و کمترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، صفر درصد در خاک A با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای است.

ج) در حالت ماکزیمم نیروی برشی، بیشترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۶٪ در خاک A با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نعلی شکل و کمترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، صفر درصد در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای است.

۲- در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله بیشترین اثر را در تشدید پاسخ ماکزیمم نیروی محوری دارد. همچنین در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله تاثیر کمی روی ماکزیمم نیروی برشی ایجاد شده در پوشش تونل‌ها دارد.

۵ و ۲۰ متر انجام شده است.

جدول ۱۶- مقایسه‌ای بین عرض ترک ایجاد شده در تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در انتهای زلزله منجیل

پارامتر	ارتفاع روباره: ۵متر		ارتفاع روباره: ۲۰متر	
	خاک A	خاک B	خاک A	خاک B
ماکزیمم عرض ترک ایجاد شده در تونل نیم‌دایره‌ای (mm)	۱۵٫۲	۳۵٫۵	۳٫۳	۱۲٫۴
ماکزیمم عرض ترک ایجاد شده در تونل نعلی شکل (mm)	۲۵٫۴	۵۲٫۵	۵٫۵	۱۸٫۵

جدول ۱۷- مقایسه‌ای بین عرض ترک ایجاد شده در تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در انتهای زلزله کوبه

پارامتر	ارتفاع روباره: ۵متر		ارتفاع روباره: ۲۰متر	
	خاک A	خاک B	خاک A	خاک B
ماکزیمم عرض ترک ایجاد شده در تونل نیم‌دایره‌ای (mm)	۱۹٫۱	۵۱	۹	۲۲
ماکزیمم عرض ترک ایجاد شده در تونل نعلی شکل (mm)	۲۶٫۴	۷۳	۷٫۵	۲۹٫۳

با بررسی مقادیر جداول ۱۶ و ۱۷ و شکل‌های ۲۵ تا ۲۸ نتیجه می‌شود:

۱- هر چقدر سرعت موج‌برشی خاک پیرامون تونل بیشتر باشد تمرکز خسارت در مقطع تونل کمتر بوده و همچنین مقدار خسارت کاهش می‌یابد. در خاک A که سخت‌تر از خاک B است، توزیع خسارت محدودتر می‌باشد. هر چه ارتفاع روباره خاک بیشتر شود، اثرات تخریبی زلزله کاهش یافته و عرض ترک ایجاد شده در مقطع تونل کمتر می‌شود.

۲- هر چقدر سرعت موج‌برشی خاک پیرامون تونل بیشتر باشد تمرکز خسارت در مقطع تونل کمتر بوده و همچنین مقدار خسارت کاهش می‌یابد. در خاک A که سخت‌تر از خاک B است، توزیع خسارت محدودتر می‌باشد.

۳- هر چه ارتفاع روباره خاک بیشتر شود، اثرات

تعلی شکل اتفاق می‌افتد. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، رکورد زلزله کوبه در فاصله ۴ کیلومتری از گسل و رکورد زلزله منجیل در فاصله ۲۹ کیلومتری از گسل قرار دارند. اثر مولفه قائم زلزله در افزایش تغییر شکل افقی ایجاد شده در نقطه تاج تونل، در زلزله کوبه نسبت به زلزله منجیل بیشتر نمود پیدا کرده است.

۲- هر چه ارتفاع روباره خاک بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم تغییر شکل‌های نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عمق روباره کرنش‌برشی میدان آزاد کاهش یافته و در نتیجه مقدار تغییر شکل افقی تونل کاهش می‌یابد. ۳- هر چقدر سرعت موج برشی خاک پیرامون تونل بیشتر باشد مقادیر ماکزیمم تغییر شکل‌های نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه خاک اطراف تونل نرم‌تر باشد، سازه تونل بیشتر وارد محدوده غیرخطی شده و در نتیجه شکل‌پذیری سازه تونل افزایش یافته و به تبع آن تغییر شکل افقی تونل افزایش می‌یابد.

۴- هر چه ابعاد هندسی تونل بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم تغییر شکل‌های نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد. در واقع گستردگی مقطع تونل باعث توزیع مناسب نیروها و تغییر شکل‌های لرزه‌ای شده و باعث کاهش تغییر شکل‌های افقی می‌شود. به طور کلی هر چه انحنا و قوس‌های ایجاد شده در طراحی تونل بیشتر باشد، مقاومت لرزه‌ای تونل بیشتر و هزینه نگهداری و بهره‌برداری تونل کمتر می‌شود.

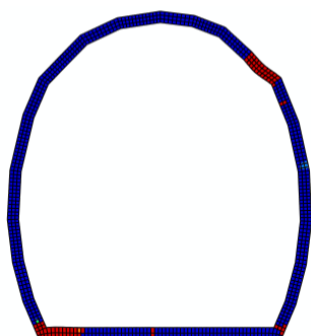
۶- مقایسه‌ای بین توزیع و مقدار خسارت ایجاد شده در پوشش تونل‌ها

همان‌گونه که در بخش ۲ ذکر شد برای بررسی خسارت در تونل‌ها باید از یک مدل رفتاری که قابلیت تعریف خسارت (Damage) را داشته باشد، استفاده کرد. در این مقاله با استفاده از مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده بتن (Concrete Damage Plasticity) این امکان فراهم شده است. در شکل‌های ۲۵ تا ۲۸ بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در انتهای رکورد زلزله منجیل و کوبه نشان داده شده است.

در جداول ۱۶ و ۱۷ مقایسه‌ای بین عرض ترک ایجاد شده در تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعلی شکل در انتهای رکورد زلزله منجیل و کوبه در خاک‌های A و B با دو ارتفاع روباره

تخریبی زلزله کاهش یافته و عرض ترک ایجاد شده در مقطع تونل کمتر می‌شود.

۴- مقادیر ماکزیمم عرض ترک‌های ایجاد شده در تونل نعلی شکل بیشتر از تونل نیم‌دایره‌ای است. بیشترین عرض ترک مربوط به تونل نعلی شکل در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر است. به عبارت بهتر بحرانی‌ترین سناریوی آسیب، مربوط به تونلی با هندسه کوچک‌تر، خاک پیرامون نرم‌تر و ارتفاع روباره کمتر است.



شکل ۲۸- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل نعلی شکل (خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر تحت رکورد زلزله منجیل)

۷- مقایسه‌ای بین پاسخ‌های ایجاد شده

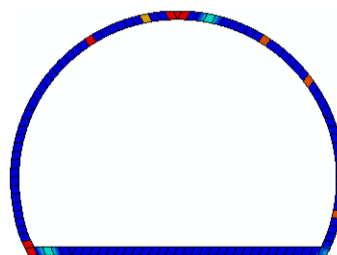
در پوشش تونل‌ها با دو مدل رفتاری خاک

از آن‌جا که مدل دراگرپراگر اصلاح شده یک مدل متداول برای مدل‌سازی خاک نیست، در این بخش مقایسه‌ای بین نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌ها، ناشی از مدل‌سازی خاک با مدل‌های موهر کلمب و دراگرپراگر اصلاح شده انجام شده است. لازم به ذکر است برای مقایسه نتایج، مصالح خاک در مدل موهر کلمب کاملاً مشابه با مدل دراگرپراگر اصلاح شده در نظر گرفته شده است. در جداول ۱۸ تا ۲۱ مقایسه‌ای بین ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در پوشش تونل تحت رکورد زلزله منجیل با در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله در حالت مدل‌سازی خاک با استفاده از مدل موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده انجام شده است.

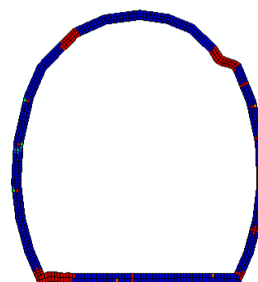
با بررسی مقادیر جداول ۱۸ تا ۲۱ نتیجه می‌شود:

۱- مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پوشش تونل در حالتی که از مدل رفتاری موهر کلمب استفاده شده است، بیشتر از حالتی که از مدل رفتاری دراگر پراگر اصلاح شده است. به عبارت دیگر در حالتی که از مدل رفتاری موهر کلمب استفاده شده است، مقادیر نیروها دست بالا (*Over design*) محاسبه شده است.

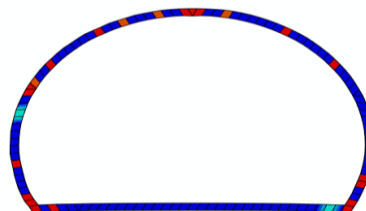
۲- در حالتی که خاک با دو مدل موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده مدل شده است، تفاوت مقادیر



شکل ۲۵- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای شکل (خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر تحت رکورد زلزله منجیل)



شکل ۲۶- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل نعلی شکل (خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر تحت رکورد زلزله منجیل)



شکل ۲۷- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای شکل (خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر تحت رکورد زلزله کوبه)

مدل‌سازی خاک با مدل موهر کلمب و دراگرپراگر اصلاح شده به ترتیب ۹۱۸ و ۸۶۶ کیلو نیوتن است. علت این امر این است که خاک B بسیار نرم‌تر از خاک A است و از طرفی مدل دراگرپراگر اصلاح شده بیشتر به منظور مدل‌سازی مصالح چسبنده بکار می‌رود؛ در نتیجه استفاده از مدل رفتاری دراگرپراگر اصلاح شده برای خاک‌های نرم‌تر، باعث تعیین پاسخ‌های بهینه‌تر برای نیروهای پوشش تونل می‌شود.

محاسبه شده نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌ها (نیم‌دایره ای، نعلی شکل)، در خاک B بسیار بیشتر از خاک A است. به عنوان نمونه در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای برای خاک B و در ارتفاع روباره ۲۰ متر، ماکزیمم نیروی محوری ناشی از مدل‌سازی خاک با مدل موهر کلمب و دراگرپراگر اصلاح شده به ترتیب ۷۸۹ و ۶۱۸ کیلو نیوتن است. و در حالتی که در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای برای خاک A و در ارتفاع روباره ۲۰ متر، ماکزیمم نیروی محوری ناشی از

جدول ۱۸- مقایسه نیروهای تونل نیم‌دایره‌ای در خاک A تحت رکورد منجیل در خاک موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده

۲۰متر		۵ متر		ارتفاع روباره
دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	نیروهای ایجاد شده روی پوشش تونل
۸۸۶	۹۱۸	۶۴۳	۶۸۸	نیروی محوری ماکزیمم (KN)
۴۷۰	۴۹۹	۳۹۸	۴۲۳	لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)
۳۰۲	۳۰۱	۲۵۵	۲۷۸	نیروی برشی ماکزیمم (KN)

جدول ۱۹- مقایسه نیروهای تونل نیم‌دایره‌ای در خاک B تحت رکورد منجیل در خاک موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده

۲۰متر		۵ متر		ارتفاع روباره
دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	نیروهای ایجاد شده روی پوشش تونل
۶۱۸	۷۸۹	۵۱۲	۶۹۵	نیروی محوری ماکزیمم (KN)
۳۸۷	۴۱۵	۳۴۲	۴۸۹	لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)
۲۵۹	۳۹۸	۲۱۳	۳۵۲	نیروی برشی ماکزیمم (KN)

جدول ۲۰- مقایسه نیروهای تونل نعلی در خاک A تحت رکورد منجیل در خاک موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده

۲۰متر		۵ متر		ارتفاع روباره
دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	دراگرپراگر اصلاح شده	موهر کلمب اصلاح شده	نیروهای ایجاد شده روی پوشش تونل
۷۰۵	۷۵۹	۵۹۸	۵۸۹	نیروی محوری ماکزیمم (KN)
۴۳۴	۴۴۴	۳۵۹	۴۱۲	لنگر خمشی ماکزیمم ($KN.m$)
۲۶۹	۲۹۸	۲۰۵	۲۵۵	نیروی برشی ماکزیمم (KN)

جدول ۲۱- مقایسه نیروهای تونل نعلی در خاک B تحت رکورد منجیل در خاک موهر کلمب و دراگر پراگر اصلاح شده

۲۰متر		۵ متر		ارتفاع روباره
دراگر پراگر اصلاح شده	موهر کلمب	دراگر پراگر اصلاح شده	موهر کلمب	نیروهای ایجاد شده روی پوشش تونل
۴۹۴	۶۵۴	۳۵۷	۴۶۸	نیروی محوری ماکزیمم (KN)
۳۶۰	۴۶۷	۳۱۸	۴۱۲	لنگر خمشی ماکزیمم (KN.m)
۲۱۹	۲۸۲	۲۰۳	۲۷۸	نیروی برشی ماکزیمم (KN)

۸- نتیجه گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود *Abaqus* و با شرایط مدل‌سازی پیشرفته و نزدیک به عمل واقعیت (رفتار غیرخطی خاک و تونل و در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله)، اثر پارامترهای هندسه پوشش تونل (دو هندسه نعلی و نیم‌دایره‌ای شکل)، ارتفاع روباره (۵ و ۲۰متر) و نوع خاک (دو نوع خاک سخت و نرم) در تعیین نیروها، تغییر شکل‌ها و خسارات پوشش تونل تحت رکورد زلزله‌های منجیل و کوبه بررسی شده است. با انجام ۱۶ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی روی مدل‌های المان محدود خاک و تونل نتایج زیر قابل حصول است:

- ۱- هر چه ارتفاع روباره خاک پیرامون تونل بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی افزایش و مقدار ماکزیمم تغییر شکل افقی نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد.
- ۲- هر چه خاک پیرامون تونل نرم‌تر باشد، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی کاهش و مقدار ماکزیمم تغییر شکل افقی نقطه تاج تونل افزایش می‌یابد.
- ۳- هر چه ابعاد هندسی (ارتفاع و دهانه) تونل بیشتر شود، مقادیر ماکزیمم نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی افزایش و مقدار ماکزیمم تغییر شکل نقطه تاج تونل کاهش می‌یابد.
- ۴- هر چقدر سرعت موج برشی خاک پیرامون تونل بیشتر باشد (خاک سخت‌تر باشد)، تمرکز خسارت در مقطع تونل کمتر بوده و همچنین مقدار خسارت کاهش می‌یابد. بیشترین عرض ترک مربوط به تونل نعلی شکل در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر است. به عبارت بهتر بحرانی‌ترین

سناریوی آسیب، مربوط به تونلی با هندسه کوچک‌تر، خاک پیرامون نرم‌تر و ارتفاع روباره کمتر است.

۵- اثر مولفه قائم زلزله در مواقعی اهمیت پیدا می‌کند که پاسخ‌های لرزه‌ای تونل پیرامون گسل مدنظر باشد.
۶- بیشترین و کمترین میزان خطا در پوشش تونل‌ها در حالت با و بدون در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله منجیل به ترتیب عبارتند از:

الف) در حالت ماکزیمم نیروی محوری بیشترین خطای بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۲۴٪ در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای و کمترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۴٪ در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نعلی شکل است.

ب) در حالت ماکزیمم لنگر خمشی بیشترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۱۵٪ در خاک A با ارتفاع روباره ۲۰ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای و کمترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، صفر درصد در خاک A با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای است.

ج) در حالت ماکزیمم نیروی برشی بیشترین خطا بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، ۶٪ در خاک A با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نعلی شکل و کمترین خطای بین در نظر گرفتن و نگرفتن اثر مولفه قائم زلزله، صفر درصد در خاک B با ارتفاع روباره ۵ متر در پوشش تونل نیم‌دایره‌ای است. در نتیجه در نظر گرفتن مولفه قائم زلزله بیشترین اثر را در تشدید پاسخ ماکزیمم نیروی محوری دارد. همچنین در نظر نگرفتن مولفه قائم زلزله بیشترین اثر را در تشدید پاسخ ماکزیمم نیروی محوری دارد.

تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد. به طور مثال با در نظر گرفتن نوع خاک و هندسه مقطع و رکورد زلزله یکسان، تونلی با ارتفاع روباره ۵۰ متر به مراتب آسیب کمتری از تونلی با ارتفاع روباره ۱۰ متر در هنگام وقوع زلزله می‌بیند.

۱۰- تمرکز و شدت آسیب در تونل نیم‌دایره‌ای کمتر از تونل نعلی شکل است، هر چقدر ابعاد هندسی تونل بیشتر باشد، توزیع آسیب در مقطع تونل بهتر پخش شده و مقدار حداکثر ترک ایجاد شده در کل مقطع کاهش می‌یابد.

۱۱- به طور کلی در طراحی مقطع تونل، هرچه انحنا و قوس‌های ایجاد شده در طراحی تونل بیشتر باشد، از تمرکز تنش در مقطع جلوگیری شده، مقاومت لرزه‌ای تونل بیشتر و هزینه نگهداری و بهره‌برداری تونل کمتر می‌شود.

۹- فهرست نمادها

در جدول ۲۲ فهرست نمادها آورده شده است.

همچنین در نظر نگرفتن مولفه قائم زلزله تاثیر کمی روی ماکزیمم نیروی برشی ایجاد شده در پوشش تونل‌ها دارد.

۷- رکورد زلزله کوبه در فاصله ۴ کیلومتری از گسل و رکورد زلزله منجیل در فاصله ۲۹ کیلومتری از گسل قرار دارند. اثر مولفه قائم زلزله در افزایش تغییر شکل افقی ایجاد شده در نقطه تاج تونل، در زلزله کوبه نسبت به زلزله منجیل بیشتر نمود پیدا کرده است.

۸- در حالتی که خاک با دو مدل موهركلمب و دراگرپراگر اصلاح شده مدل شده است، تفاوت مقادیر محاسبه شده نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل‌ها (نیم‌دایره‌ای، نعلی شکل)، در خاک B بسیار بیشتر از خاک A است. علت این امر این است که خاک B بسیار نرم‌تر از خاک A است و از طرفی مدل دراگرپراگر اصلاح شده بیشتر به منظور مدل‌سازی مصالح چسبنده بکار می‌رود، در نتیجه استفاده از مدل رفتاری دراگرپراگر اصلاح شده برای خاک‌های نرم‌تر، باعث تعیین پاسخ‌های بهینه‌تر برای نیروهای پوشش تونل می‌شود.

۹- هر چقدر عمق روباره افزایش یابد، اثر زلزله بر

جدول ۲۲: فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
σ_c	N/m^2	تنش فشاری	$E_{Dynamic}$	N/m^2	مدول الاستیسیته دینامیکی خاک
\hat{f}_{co}	N/m^2	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیرمحصور	v_s	-	ضریب پواسون خاک
ϵ_c	-	کرنش فشاری	ρ_s	Kg/m^3	جرم مخصوص خاک
$\dot{\epsilon}_c$	-	کرنش فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیرمحصور	C_{se}	m/s	سرعت موج برشی خاک
E_c	N/m^2	مدول الاستیسیته خطی بتن	β	$degree$	زاویه اصطکاک دراگر پراگر اصلاح شده
ϵ_{co}	-	کرنش فشاری میانگین	d	N	چسبندگی مصالح در مدل دراگر پراگر اصلاح شده
ϵ_{cu}	-	کرنش متناظر با نقطه گسیختگی	E_s	N/m^2	مدول الاستیسیته استاتیکی خاک
d_c	-	خسارت فشاری	e_0	-	نسبت تخلخل اولیه
E_0	N/m^2	مدول الاستیسیته اولیه	K	-	نسبت تنش جریان
$\tilde{\epsilon}_c^{pl}$	-	کرنش فشاری پلاستیک	α	-	شعاع سطح انتقالی
σ_t	N/m^2	تنش کششی	R	-	خروج از مرکزیت کلاهدک
d_t	-	خسارت کششی	ψ	$degree$	زاویه اتساع دراگرپراگر اصلاح شده

ادامه جدول ۲۲: فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد	شرح	واحد	نماد
ماتریس میرایی	$N.s/m$	$[c]$	کرنش کششی	-	ϵ_t
ضریب ثابت متناسب با جرم در میرایی رایلی	s^{-1}	α	کرنش کششی پلاستیک	-	ϵ_t^{pl}
ماتریس جرم	kg	$[m]$	زاویه اتساع بتن	$degree$	ψ
ضریب ثابت متناسب با سختی در میرایی رایلی	s^{-1}	β	خروج از مرکزیت بتن	-	ϵ
ماتریس سختی	Kg/m	$[k]$	تنش تسلیم فشاری دومیحوره	N	f_{bo}
فرکانس مود i	rad/s	ω_i	تنش تسلیم فشاری تک محوره	N	f_{co}
فرکانس مود j	rad/s	ω_j	نسبت تنش ثانویه به ماکزیمم مقدار کشش	-	K
نسبت میرایی مود i	-	ξ_i	پارامتر ویسکوزیته در معادلات تعادل بتن	-	μ
نسبت میرایی مود j	-	ξ_j	ضریب پواسون پوشش	-	ν_{lining}
نیروی میرایی ویسکوز	N	F_d	جرم مخصوص پوشش	Kg/m^3	ρ_{lining}
ضریب میرایی ویسکوز	$N.s/m$	C_d	مدول الاستیسیته پوشش	N/m^2	E_{lining}
ماکزیمم شتاب زمین	gal	PGA	سرعت در میرایی ویسکوز	m/s	\dot{u}
ماکزیمم سرعت زمین	m/s	PGV	سطح مقطع میراگر	m^2	A
ماکزیمم تغییرشکل ایجاد شده در تاج تونل	m	Δ_{max}	بزرگی زلزله	$Richter$	M_w

۱۰- منبع‌ها

- [1] Pakbaz, M.C., & Yareevand, A.(2005). 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (pp. 411-417). DOI:10.1016/j.tust.2005.01.006.
- [2] Kawashima, K., (1999). Seismic design of underground structures in soft ground, a review. *Proceedings of the International Symposium on Tunneling in Difficult Ground Conditions*. Tokyo, Japan .
- [3] Wang, J. N., (1993). *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-art Approach*, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. <http://www.pbworld.com/pdfs/publications/monographs/wang.pdf>.
- [4] Penzien, J., (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. *Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 29, 683_691.
- [5] Hashash, Y.M.A., & Hook ,J.J., Schmidt, & B., Yao, J.I-C , (2001). Seismic design and analysis of underground structure, *Tunnelling and Underground space Technology* 16 (pp. 247-293). [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00051-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-7) .
- [6] Hashash, Y. M., Park, D. and Chiang Yao, J. I. (2005). "Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures", *Tunnelling & Underground Space Tech.*, Pergamon, Vol. 20, pp. 435-441.1.
- [7] UBC-97. (1997). *Seismic Design.*, 1632 vs 1634, Uniform Building Code (UBC).
- [8] Campbell, W., Bozorgnia, Y., (2007). Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters. *Pacific*

Earthquake Engineering Research Center.

- [9] FHWA-NHI-09-010. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-civil Elements. Washington, Federal Highway Administration (FHWA).
- [10] Kolymbas, D., (2008). *Tunnelling and Tunnel Mechanics A Rational Approach to Tunnelling*. German: ISBN: 978-3-540-25196-5.
- [11] Drucker D. C. and Prager W. (1952), Soil mechanics and plastic analysis for limit design, Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
- [12] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, and E. Onate, A Plastic-Damage Model for Concrete, International Journal of Solids and Structures, vol.25, pp. 299-329, 1989.
- [13] Abaqus 6.11.1. (2012). "User's manual". Hibbitt, Karlson and Sorenson, Inc.
- [۱۴] ساعدی داریان، ا؛ بهرامپور، ح؛ عرب زاده، ح. (۱۳۹۰) راهنمای جامع نرم افزار ABAQUS. انتشارات انگیزه. ۷-۴۴-۷۵۱۷- ISBN ۹۷۸-۹۶۴
- [15] Das, B.M., (1993), *PRINCIPLES OF SOIL DYNAMICS*, (M. Thomas, Ed.) United States of America: BOSTON. ISBN 0-534-93129-4.
- [۱۶] شهبازی، ر؛ یکرنگ نیا، ر. (۱۳۹۲) راهنمای کاربردی Abaqus به همراه مسائل مهندسی عمران سازه - ژئوتکنیک. نشر علم عمران. ۹-۱۷-۵۱۷۶-۶۰۰-۹۷۸- ISBN
- [17] Chopra, A.K, (1995), *DYNAMICS OF STRUCTURES. Theory And Applications To Earthquake Engineering* (B. Stenquist, Ed). United States of America: Prentice-Hall. ISBN 0-13-855214-2.
- [18] Asheghabadi, M. S., & Matinmanesh, H. (2011). Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils eith 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.
- [۱۹] باباگلی، ر. (۱۳۹۰) ارزیابی ظرفیت در تحلیل و طراحی تونل‌های متروی شهری تحت اثر امواج لرزه‌ای. سمنان، ایران: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان.