

یادداشت پژوهشی

چکیده

از دیاد جمعیت کلان شهرها منجر به کاهش فضاهای موجود در سطح شهرها شده و تمایل به استفاده از فضاهای زیرزمینی را به دنبال داشته است. موارد فراوانی در مطالعات محققین در سالهای اخیر وجود دارد که اهمیت اثرات تخریبی زلزله را بر سازه‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. با توجه به لرزه‌خیز بودن شهر کرمانشاه و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، اثر زلزله بر ساختگاه تونل متروی کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9 که این گمانه‌ها به ترتیب در ایستگاه‌های میدان آزادی، میدان انقلاب و میدان فردوسی می‌باشند، هر کدام به‌طور مجزا در سه گام جداگانه ابتدا تحلیل فرکانسی و سپس تحلیل میدان آزاد (بدون تونل) و در نهایت مدل اصلی با مدل‌سازی سازه تونل تحلیل شده‌اند. نتایج حاصله از تحلیل تاریخچه زمانی صورت گرفته در سه گمانه BH-7، BH-8 و BH-9 نشان می‌دهد که بزرگنمایی حداکثر در گمانه BH-9 رخ می‌دهد که بحرانی‌ترین گمانه از لحاظ بزرگنمایی امواج دریافتی در سطح زمین می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که نوع خسارات وارده بر پوشش تونل بر اثر بارگذاری لرزه‌ای وابسته به نوع خاک محیط، محتوای فرکانسی و شدت زلزله وارده بر تونل، میزان بزرگنمایی ایجاد شده در مقطع خاک، میزان سربار تونل و مقاومت مصالح تشکیل دهنده پوشش بتنی تونل می‌باشد.

واژگان کلیدی: اثرات ساختگاهی، بزرگنمایی امواج، شهر کرمانشاه، تونل مترو.

مطالعه رفتاری اثرات ساختگاه بر متروی کرمانشاه

مهدی جوانمرد (نویسنده مسئول)

دانش‌آموخته کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران،

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران،

M.javanmard42@yahoo.com

حسن شرفی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه

رازی، کرمانشاه، ایران

۱- مقدمه

امروزه سازه‌های زیرزمینی^۱ نظیر تونل‌های مترو^۲، تونل‌های انتقال آب و فاضلاب، تونل‌های تأسیساتی، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ‌های زیرزمینی از زیرساخت‌های حیاتی شهرنشینی جدید محسوب می‌شوند. این قبیل سازه‌ها، به‌ویژه در شهرهای با جمعیت زیاد، به شکل فزاینده‌ای به‌منظور رفع نیازهای مختلف احداث می‌گردند. بررسی زلزله‌های مخربی که در دهه‌های اخیر رخ داده‌اند به‌روشنی مشخص کرده است که شرایط زمین‌شناسی و اثرات ساختگاهی، نقش مهمی در تقویت جنبش نیرومند زمین دارد. نوع خاک و زمین‌شناسی محلی می‌تواند نقش مهمی در بزرگنمایی^۳ حرکات لرزه‌ای زمین و میزان خسارت وارده در زلزله‌های بزرگ ایفا کند. این تغییر ماهیت حرکات لرزه‌ای به سبب خواص مهندسی لایه‌ها و زمین‌شناسی، اثرات ساختگاه^۴

نامیده می‌شود. باید توجه شود که این پدیده می‌تواند، حرکات لرزه‌ای مهاجم و پیامدهای آن بر ساختمان‌ها و سازه‌ها را تقویت کند. حضور ناهمواری‌های زمین‌شناسی زیرسطحی دو بعدی و سه بعدی همچون دره‌های آبرفتی و یا حوزه‌های رسوبی می‌تواند تغییرات قابل توجهی را در ویژگی‌های بزرگنمایی ساختگاه ایجاد کند. میزان تأثیر تابع شکل هندسی، خواص فیزیکی لایه‌های زیرسطحی، عوارض طبیعی ساختگاه و خصوصیات حرکت ورودی می‌باشد.

تا قبل از سال ۱۹۹۵، تونل‌ها در برابر بارهای دینامیکی طراحی نمی‌شدند، اما زلزله‌های دهه ۱۹۹۰ باعث خرابی‌های جدی در برخی تونل‌ها گردید. در سال‌های اخیر موارد فراوانی در کشورهای مختلف دیده شده که زلزله، خرابی‌های جدی به

در این مقاله به بررسی رفتاری اثرات ساختگاهی بر مسیر متروی کرمانشاه پرداخته می‌شود. در این راستا با مدل‌سازی دو بعدی عددی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود^۵ آباکوس، ساختگاه مسیر متروی کرمانشاه با توجه به نوع و لایه‌بندی خاک منطقه، اثرات هندسه و زمین‌شناسی منطقه در اثر زلزله و میزان بزرگنمایی و تأثیر آن بر مسیر تونل متروی کرمانشاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9 هر کدام به‌طور مجزا در سه گام جداگانه ابتدا تحلیل فرکانسی^۶ و سپس تحلیل میدان آزاد^۷ و در نهایت مدل اصلی با مدل‌سازی سازه تونل و خاک تحلیل شده‌اند.

۲- مشخصات مصالح مورد استفاده در تحلیل‌های عددی

۲-۱- هندسه و پوشش تونل‌ها

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی ابعاد هندسی مقطع تونل است. مقطع تونل قطار شهری کرمانشاه از نوع نعل اسبی با شعاع متوسط $4/3$ متر می‌باشد. در این مطالعه موردی مدل‌سازی خاک و تونل به صورت دو بعدی و با شرایط کرنش مسطح^۸ انجام شده است. ضخامت پوشش بتنی تونل 30 سانتی‌متر است. برای تعریف مشخصات غیرخطی بتن پوشش تونل از مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده^۹ استفاده شده است. این مدل رفتاری جامع‌ترین و پرکاربردترین مدل برای بتن در نرم‌افزار آباکوس است. در مکانیسم آسیب فرض بر این است که کاهش سختی در اثر ایجاد و گسترش ترک‌های ریز^{۱۰} بوده، به‌طوری‌که بتوان این کاهش سختی را با پارامتری به نام آسیب اندازه‌گیری و مشخص کرد. در مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده همسانگرد و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود. در این مدل مکانیسم اصلی شکست، خرد شدن فشاری بتن است. برای تعریف رفتار فشاری بتن باید تنش‌های فشاری را به صورت تابعی از کرنش‌های غیرالاستیک تعریف کرد برای تنش‌های فشاری و کرنش‌ها باید مقادیر مثبت به کار برونند [۷-۸]. منحنی تنش تسلیم فشاری

سازه‌های زیرزمینی وارد کرده است. 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 ژاپن صدمات جبران‌ناپذیری به تأسیسات سه ایستگاه زیرزمینی راه‌آهن که در نزدیکی گسل نوچینا قرار داشت، وارد کرد [۱].

میلونائیکس و گازتاس [۲] با انجام مطالعات در زمینه ارزیابی اثرات ساختگاه‌های مختلف نشان دادند که رفتار غیرخطی خاک ساختگاه و پدیده اندرکنش خاک و سازه می‌تواند علیرغم افزایش میرایی، باعث افزایش عملکرد پاسخ سازه و افزایش نیروهای لرزه‌ای وارد بر سازه شود. ونگ [۳] و پنزین [۴] با استفاده از روش‌های ریاضی به تخمین نیروهای وارده بر پوشش تحت بارگذاری ساده‌شده با توجه به هندسه تونل (مستطیلی، دایره‌ای) پرداختند. ناث و تینگ‌بایجام [۵] به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه در شهر گوواهای هند پرداختند و نتیجه‌گیری کردند که بزرگنمایی حداکثر متناسب با عکس فرکانس غالب است به این معنا که هرچه فرکانس غالب کمتر شود، ضریب بزرگنمایی بیشتر می‌شود و بالعکس. آنها همچنین نشان دادند که خاک‌های رسی و سست ضریب بزرگنمایی بیشتری نسبت به خاک‌های سخت‌تر و درشت‌دانه‌تر دارند.

به‌طور کلی روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی عبارتند از: روش‌های تجربی، روش مدل فیزیکی، روش‌های ریاضی، تحلیل شبه‌استاتیکی و روش‌های عددی. روش‌های عددی که با استفاده از روش‌های تفاضل محدود، اجزای محدود و غیره انجام می‌شود، دارای بیشترین کارایی در تحلیل مسائل پیچیده بوده و از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در تعیین پاسخ‌های لرزه‌ای تونل برخوردار است. همچنین به دلیل ناشناخته بودن اثرات ساخت این قبیل سازه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای زمین، در هیچ آیین‌نامه‌ای به اثرات اندرکنشی سازه‌های زیرزمینی با محیط پیرامون در حین زلزله و به‌ویژه اثرات آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و سازه‌ای واقع بر آن اشاره‌ای نشده است [۶].

جدول (۳): مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در مدل رفتاری پلاستیسیته آسیب دیده.

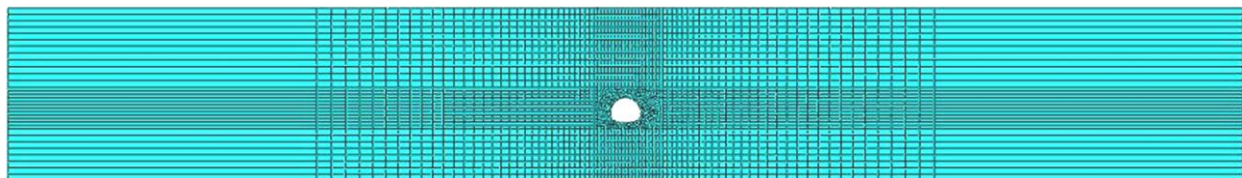
پارامتر	شرح	مقدار
ψ	زاویه اتساع بتن	۲۰
ε	خروج از مرکزیت بتن	۰/۱
F_{bo}/f_{co}	نسبت تنش تسلیم فشاری دو محوره به تک محوره	۱/۱۶
K	نسبت تنش ثانویه به ماکزیم مقدار کشش	۰/۶۶۷
μ	پارامتر لزجت در معادلات تعادل بتن	۰/۰۱

۲-۲- هندسه مدل و مصالح خاک

مقطع عرضی در مدل سازی گمانه ها به طول ۱۸۰ متر و عمق ۵۰ متر مدل سازی شده است. با توجه به اینکه مقطع تونل نعل اسبی می باشد شعاع تونل متغیر است. این مدل شامل دو بخش مختلف یعنی مقطع عرضی تونل که خاک و لایه بندی های آن بوده و قسمت دوم مدل سازی پوشش بتنی تونل است. در شکل (۲) مدل اجزای محدود خاک برای گمانه BH-8 به عنوان نمونه ارائه شده است.

در این پژوهش برای پیش بینی رفتار خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شده که در جدول (۴) تا (۷) مشخصات و لایه بندی خاک در محل محدوده ساختمانی تونل ارائه شده است [۱۰]. برای تعریف مدل موهر-کولمب در نرم افزار به چند پارامتر اصلی نیاز است: مدول یانگ (E)، نسبت پواسون (ν)، زاویه اصطکاک (φ)، چسبندگی (C) و زاویه اتساع (ψ). رابطه ی مقاومت برشی موهر-کولمب به صورت زیر بیان می شود:

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

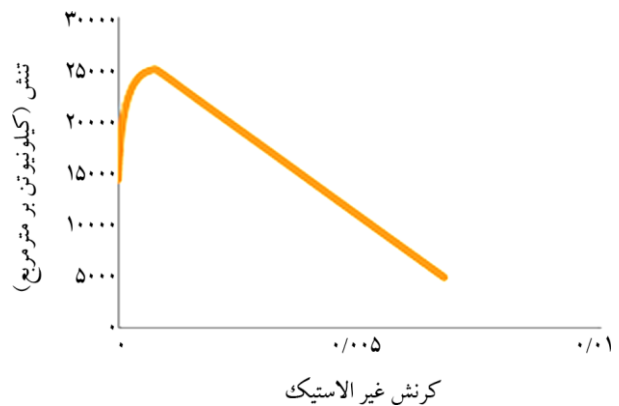


شکل (۲): مدل المان محدود خاک و تونل در گمانه BH-8.

جدول (۴): مشخصات مدل موهر-کولمب در گمانه BH-7.

مشخصات خاک و مدل پلاستیسیته موهر-کولمب								BH-7
V_s	E	ν	C	ψ	ϕ	ρ	نوع خاک	شماره لایه
(متر بر ثانیه)	(مگا پاسکال)		(کیلو پاسکال)			(کیلوگرم بر متر مکعب)		
۴۰۸/۳	۴۰	۰/۴	۳۸	۰	۳۰	۱۶۰۰	CL	۱
۶۸۷/۷	۹۵	۰/۳۵	۱۶	۵	۳۵	۲۰۰۰	GC, GP	۲

بر حسب کرنش غیر خطی بتن در شکل (۱)، مشخصات غیر خطی کششی بتن در جدول (۱) و مشخصات الاستیک بتن در جدول (۲) و مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل (۱): منحنی تنش کرنش غیر الاستیک فشاری بتن [۹].

جدول (۱): مشخصات غیر خطی کششی بتن در مدل آسیب پلاستیسیته.

کرنش پلاستیک	تنش کششی (کیلو نیوتن بر متر مربع)
۰	۲۵۰
۰/۰۰۱	۲/۵

جدول (۲): مشخصات الاستیک بتن مسلح پوشش بتن.

پارامتر	شرح	واحد	بتن
U_{liming}	ضریب پواسون	-	۰/۲
ρ_{liming}	جرم مخصوص	(کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۲۵۰
E_{liming}	مدول الاستیسیته	(گیگانیوتن بر متر مربع)	۲۰/۶۴

جدول (۵): مشخصات مدل موهر- کولمب در گمانه BH-8.

مشخصات خاک و مدل پلاستیسیته موهر- کولمب								BH-8
V_s (متر بر ثانیه)	E (مگاپاسکال)	ν	C (کیلو پاسکال)	ψ	ϕ	ρ (کیلوگرم بر متر مکعب)	نوع خاک	شماره لایه
۳۷۸/۲	۴۵	۰/۳۵	۴۰	۳	۳۳	۱۸۰۰	SC	۱
۵۶۵/۷	۲۹	۰/۴	۵۰	۰	۲۹	۱۵۵۰	CH	۲
۶۸۱/۳	۱۱۰	۰/۳۵	۱۵	۴	۳۴	۲۲۰۰	GP	۳

جدول (۶): مشخصات مدل موهر- کولمب در گمانه BH-9.

مشخصات خاک و مدل پلاستیسیته موهر- کولمب								BH-9
V_s (متر بر ثانیه)	E (مگاپاسکال)	ν	C (کیلو پاسکال)	ψ	ϕ	ρ (کیلوگرم بر متر مکعب)	نوع خاک	شماره لایه
۳۶۰/۱	۳۱	۰/۴	۳۰	۰	۲۸	۱۷۰۰	CL	۱
۶۵۴/۴	۵۵	۰/۳۵	۱۵	۳	۳۳	۱۸۰۰	SM, SC	۲
۸۴۳/۷	۱۰۰۰	۰/۳۵	۴۵۰	۰	۲۸	۲۵۰۰	Rock	۳

 جدول (۷): مقادیر α و β به دست آمده از تحلیل فرکانسی گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9.

BH-9	BH-8	BH-7	پارامتر
۳۸	۲۵	۲۳	ارتفاع سربار تونل (متر)
۵	۵	۵	میرایی (درصد)
۰/۹۲۰۲	۱/۰۵۱۷	۰/۹۳۲	فرکانس مد اول (هرتز)
۰/۳۲۲۳	۰/۳۷۴۱	۰/۳۳۶	α
۰/۰۰۷۶۵	۰/۰۰۶۵۶	۰/۰۰۷۲۵	β

برای گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9 ارائه شده است.

۳- شرایط مدل سازی دینامیکی

۳-۱- میرایی خاک

میرایی مصالح در خاک عموماً از مشخصات لزجت، 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. در روابط (۲) و (۳) روابط میرایی رایلی ارائه شده است [۱۱].

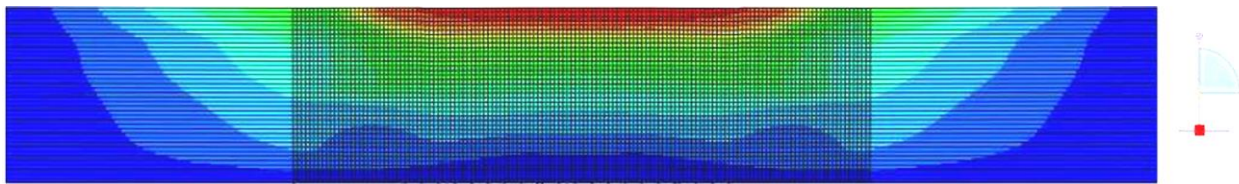
$$[c] = \alpha [m] + \beta [k] \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_m & \omega_m \\ 1/\omega_n & \omega_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \zeta_m \\ \zeta_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در ادامه با توجه به روابط ارائه شده و با انجام آنالیز فرکانسی در جدول (۷) مقادیر فرکانس مد اول و ضرایب میرایی α و β

۳-۲- مرزهای جاذب انرژی

با توجه به نیمه‌بی‌نهایت بودن مدل واقعی، انرژی لرزه‌ای وارد شده به مدل بایستی از طریق مرزها خارج شود (میرایی هندسی) روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی^{۱۱} وجود دارد. نوع متفاوتی از مرز گذرا که در کار حاضر از آن استفاده شده است، استفاده از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت است. کاربرد المان‌های نیمه‌بی‌نهایت در مسائل دینامیکی تحلیل انتشار موج است. در نرم افزار آباکوس هرچند این نوع از المان در برنامه تعریف شده‌اند، اما تعریف و اختصاص آنها به عنوان مرز گذرا بایستی توسط کاربر صورت پذیرد. شکل (۳) به عنوان نمونه ارائه شده است که در آن از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت استفاده شده است



شکل (۳): عملکرد صحیح مرزهای نیمه‌بی‌نهایت در گمانه BH-7 در حالت میدان آزاد در آباکوس.

جدول (۸): مقادیر ضریب و زاویه اصطکاک برای مدل‌سازی سطح مشترک خاک در گمانه‌های BH-7، BH-8، و BH-9.

شماره گمانه	BH-7	BH-8	BH-9
زاویه اصطکاک خاک (ϕ)	۳۵	۳۳	۲۸
ضریب اصطکاک (μ)	۰/۴۲	۰/۴	۰/۳۲

۳-۴- مشخصات رکورد 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. زلزله مورد استفاده در این مطالعه زلزله طبرس می‌باشد و دلیل انتخاب آن این است که اولاً به لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناسی و به لحاظ لایه‌های خاک با زمین محل تونل متروی کرمانشاه مشابهت دارد و ثانیاً مدت زمان حرکت شدید زمین در آن حداقل ۱۰ ثانیه، بیشتر می‌باشد؛ بنابراین شتاب‌نگاشت مورد نظر شرایط زلزله طرح را ارضا می‌نماید. مشخصات زلزله طبرس در جدول (۹) و نمودار تاریخچه زمانی شتاب این زلزله در شکل (۴) نمایش داده شده است.

جدول (۹): مشخصات رکورد زلزله طبرس.

زلزله	نوع گسل	نوع زلزله	بزرگی (ریشتر)
طبرس	معکوس	دور از گسل	۷/۳۵

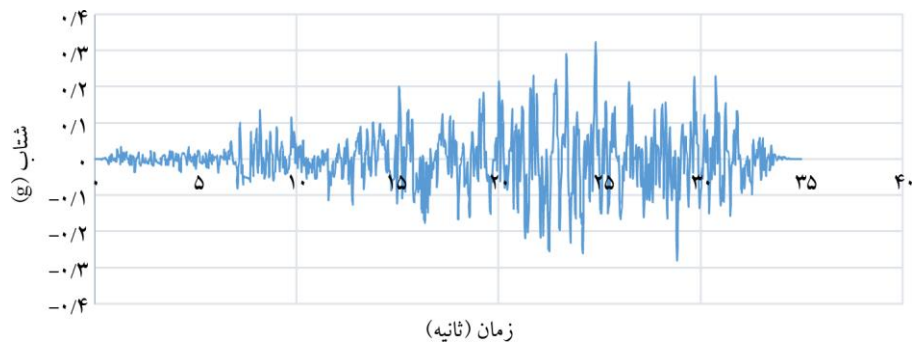
۳-۵- ابعاد و مشخصات مش‌بندی مدل المان محدود خاک و تونل

برای همگرایی جواب‌ها در این بخش آنالیز حساسیت مش انجام شد تا بهترین ابعاد به دست آید. ابتدا از ابعاد مش خیلی درشت استفاده و در هر مرحله ابعاد کوچک‌تر شد، لذا با طی کردن فرآیند سعی و خطای چند باره ابعاد مش‌بندی حاضر انتخاب شد تا از بروز این قبیل مشکلات جلوگیری به عمل آید. در جدول (۱۰) تعداد و نوع المان‌بندی مش‌ها برای هر قسمت از مدل‌سازی ارائه شده است.

و برای تعیین صحت عملکرد المان‌های نیمه‌بی‌نهایت تحلیل میدان آزاد انجام شده است که همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود این مرزها عملکرد مناسب و مطلوبی دارند.

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

برای معرفی اندرکنش بین سطوح نرم‌افزار آباکوس دارای کتابخانه وسیعی از حالات مختلف اندرکنشی می‌باشد که در این مطالعه از رویکرد سطوح در تماس با هم استفاده شده است. این کار در ابتدا با مشخص کردن نوع اندرکنشی که ممکن است بین سطوح در تماس با هم وجود داشته باشد صورت می‌گیرد [۱۲]. تعیین مشخصات مربوط به نوع تماس (مماسی و نرمال) و خصوصیات مرتبط با آنها از قبیل ضرایب اصطکاک و جدایش و عدم جدایش سطوح تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای در این مرحله صورت می‌گیرد. رفتارهای مماسی و نرمال سطوح در تماس با هم به صورت به ترتیب اصطکاک با فرمولاسیون پنالتی^{۱۲} و تماس سخت^{۱۳} در نظر گرفته شده‌اند. در این نوع از رفتار تماسی، نفوذ سطح فرعی در سطح اصلی در نقاط تماسی تعریف شده، حداقل می‌شود و اجازه انتقال تنش کششی در سطوح مشترک داده نمی‌شود. به عبارت دیگر، با رسیدن دو جسم به یکدیگر، فشاری بین دو جسم ایجاد شده و با نفوذ بیشتر قطعات در یکدیگر فشار نیز افزایش خواهد یافت. اصطکاک بین خاک و سازه از دو رفتار نرمال و مماسی تشکیل شده است. روش اصطکاک استفاده شده در مدل‌ها روش کولمب 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. ضریب اصطکاک محاسبه شده برای گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9 در جدول (۸) ارائه شده است.



شکل (۴): نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله طیس.

جدول (۱۰): انواع المان‌های به کار رفته شده در مش بندی المان‌ها (الف) گمانه BH-7، (ب) گمانه BH-8 و (پ) گمانه BH-9.

تعداد المان	نوع المان		
۳۱۵۹	CPE4R	المان‌های دو بعدی	خاک مربوط به گمانه BH-7
	CINPE4	المان‌های نیمه‌بی‌نهایت	
۳۶۰	CPE4R	المان‌های دو بعدی	سازه تونل گمانه BH-7

(الف)

تعداد المان	نوع المان		
۳۴۹۲	CPE4R	المان‌های دو بعدی	خاک مربوط به گمانه BH-8
	CINPE4	المان‌های نیمه‌بی‌نهایت	
۳۶۰	CPE4R	المان‌های دو بعدی	سازه تونل گمانه BH-8

(ب)

تعداد المان	نوع المان		
۴۱۶۰	CPE4R	المان‌های دو بعدی	خاک مربوط به گمانه BH-9
	CINPE4	المان‌های نیمه‌بی‌نهایت	
۳۶۰	CPE4R	المان‌های دو بعدی	سازه تونل گمانه BH-9

(پ)

مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در مجاورت تونل نسبت به سطح آزاد زمین مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودار شکل (۵) مشخص می‌شود که هر چقدر از بستر سنگی به سمت سطح زمین حرکت می‌کنیم شاهد افزایش مقادیر شتاب در نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله خواهیم بود. دلیل این پدیده وجود پدیده ژل افکت درون خاک است که در این پدیده اثرات ساختگاهی با توجه به تغییرات آبرفت در نظر گرفته می‌شود و اثر توابع انتقال لایه‌ها در تغییر خصوصیات و پارامترهای خاک در نظر گرفته می‌شود. با حرکت امواج از سنگ‌بستر به سطح زمین شاهد بزرگنمایی در مقادیر شتاب

۴- تحلیل دینامیکی مدل اصلی و بررسی چگونگی تغییرات الگوی بزرگنمایی شتاب در ساختمان‌های مختلف

۴-۱- بررسی نتایج حاصل از تحلیل گمانه BH-7 (ایستگاه میدان آزادی)

در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی گمانه BH-7 ارائه شده است. میزان سرریز پوشش تونل به ارتفاع ۲۳ متر می‌باشد که از نقشه‌های اجرایی تونل متروی کرمانشاه استخراج شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل صورت گرفته در آباکوس و با مقایسه پاسخ شتاب در بستر و شتاب زلزله اعمال شده به مدل، میزان بزرگنمایی در ساختمان گمانه BH-7 و تأثیر تونل

است. میزان سربار پوشش تونل به ارتفاع ۲۶ متر می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل صورت گرفته در آباکوس و با مقایسه پاسخ شتاب در بستر و شتاب زلزله اعمال شده به مدل، میزان بزرگنمایی در ساختمانی گمانه BH-8 و تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در مجاورت تونل نسبت به سطح آزاد زمین مورد بررسی قرار گرفته است.

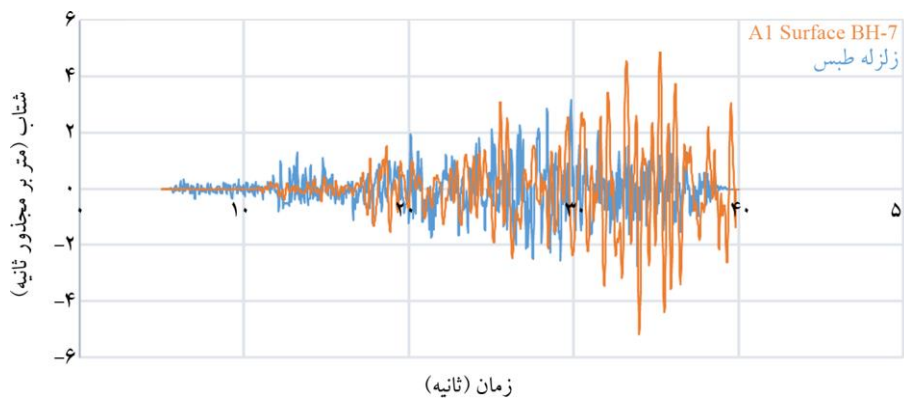
با توجه به نمودار شکل (۶) مشخص می‌شود که هر چقدر از بستر سنگی به سمت سطح زمین حرکت می‌کنیم شاهد افزایش مقادیر شتاب در نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله خواهیم بود. با توجه به نمودار حداکثر شتاب وارده بر سنگ‌بستر در تحلیل دینامیکی با اعمال رکورد همپایه‌سازی شده زلزله طیس مقدار $A_{max} = 3/167$ (متر بر مجذور ثانیه) و حداکثر شتاب دریافتی در سطح زمین برابر $A_{max} = 5/182$ (متر بر مجذور ثانیه) است که در نتیجه ضریب بزرگنمایی به‌دست آمده برای گمانه BH-8 برابر $1/84$ به‌دست آمده است.

خواهیم بود. این مفهوم ضریب بزرگنمایی نامیده می‌شود که میزان افزایش دامنه شتاب با حرکت از سنگ بستر به سطح زمین را نمایش می‌دهد و برابر با حاصل تقسیم حداکثر شتاب وارد بر بستر حین زلزله بر حداکثر شتاب دریافت شده در سطح زمین است.

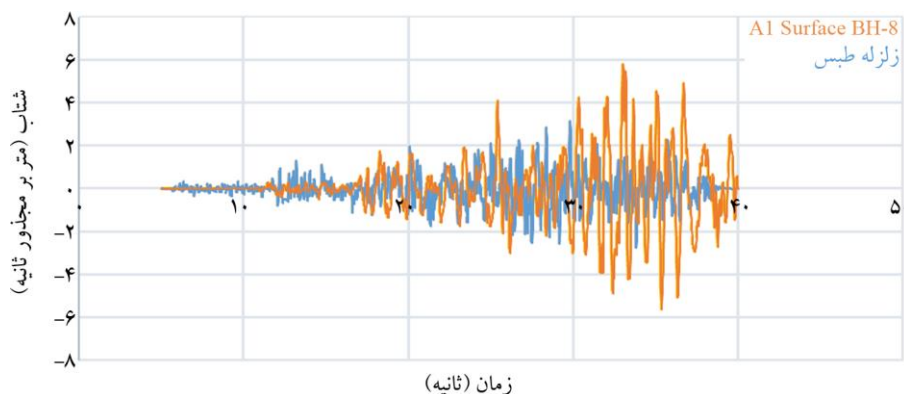
با توجه به نمودار شکل (۵) حداکثر شتاب وارده بر سنگ‌بستر در تحلیل دینامیکی با اعمال رکورد همپایه‌سازی شده زلزله طیس مقدار $A_{max} = 3/167$ (متر بر مجذور ثانیه) و حداکثر شتاب دریافتی در سطح زمین برابر $A_{max} = 5/21$ (متر بر مجذور ثانیه) است که در نتیجه ضریب بزرگنمایی به‌دست آمده برای گمانه BH-7 برابر $1/64$ به‌دست آمده است.

۲-۴- بررسی نتایج حاصل از تحلیل گمانه BH-8 (ایستگاه میدان انقلاب)

در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی گمانه BH-8 ارائه شده



شکل (۵): نمودار تاریخچه زمانی شتاب اعمالی به بستر خاک و تاریخچه زمانی شتاب دریافت شده در سطح زمین در گمانه BH-7.



شکل (۶): نمودار تاریخچه زمانی شتاب اعمالی به بستر خاک و تاریخچه زمانی شتاب دریافت شده در سطح زمین در گمانه BH-8.

۳-۴- بررسی نتایج حاصل از تحلیل گمانه BH-9 (ایستگاه میدان فردوسی)

در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی گمانه BH-9 ارائه شده است. میزان سربار پوشش تونل به ارتفاع ۳۸ متر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل صورت گرفته در آباکوس و با مقایسه پاسخ شتاب در بستر و شتاب زلزله اعمال شده به مدل، میزان بزرگنمایی در ساختگاه گمانه BH-9 و تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در مجاورت تونل نسبت به سطح آزاد زمین مورد بررسی قرار گرفته است.

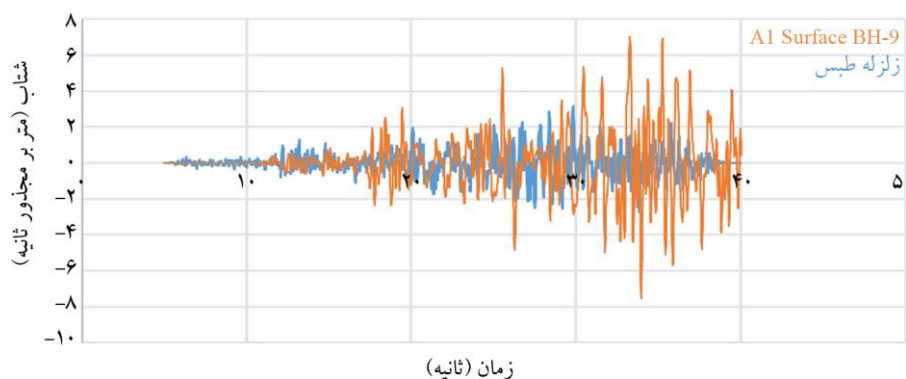
با توجه به نمودار شکل (۷) مشخص شد که هر چقدر از بستر سنگی به سمت سطح زمین حرکت می‌کنیم شاهد افزایش مقادیر شتاب در نمودار تاریخچه زمانی شتاب زلزله خواهیم بود. با توجه به نمودار حداکثر شتاب وارده بر سنگ بستر در تحلیل دینامیکی با اعمال رکورد همپایه سازی شده زلزله طیس مقدار $A_{max} = 3/162$ (متر بر مجذور ثانیه) و حداکثر شتاب دریافتی در سطح زمین برابر $A_{max} = 7/54$ (متر بر مجذور ثانیه) است که در نتیجه ضریب بزرگنمایی به دست آمده برای گمانه BH-9 برابر $2/38$ به دست آمده است.

۵- تعیین میزان آسیب و خسارت وارده در پوشش تونل

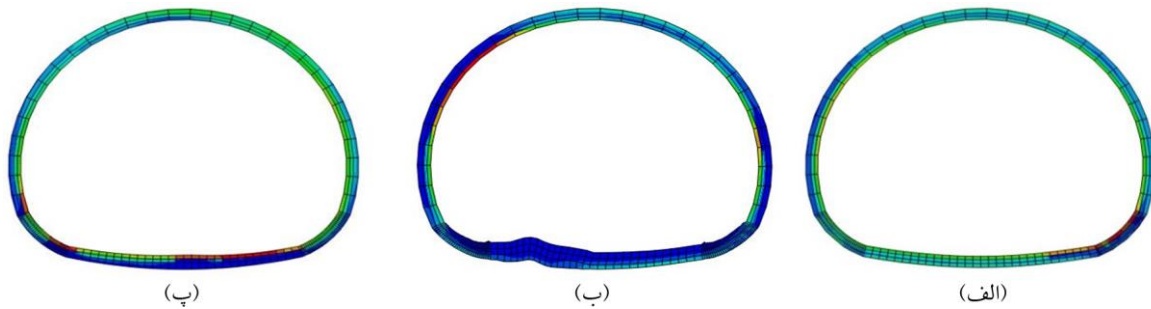
با توجه به این که اطراف تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی خاک وجود دارد، سطح مشترک خاک و سازه باید به درستی تعریف شود. اصطکاک بین خاک و سازه از دو رفتار نرمال و مماسی تشکیل شده که در بخش (۳-۳) اطلاعات مربوط به مدل سازی

سطح مشترک خاک و تونل ارائه شده است. با تحلیل نتایج حاصل از تنش‌های ایجاد شده در پوشش تونل بحرانی‌ترین سناریوی آسیب در سه گمانه BH-7، BH-8 و BH-9 مشخص شد. برای بررسی خسارت تونل‌ها از یک مدل رفتاری که قابلیت تعریف آسیب را داشته باشد، استفاده شده است. در این مطالعه از مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده بتن این امکان فراهم شده است. مدل سازی المان سطح مشترک خاک و تونل معمولاً به صورت یک ضخامت مجازی بیان می‌شود. هر چقدر این ضخامت بیشتر باشد، تغییر شکل الاستیک بیشتر می‌شود. در شکل (۸) بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل نعل اسبی شکل در اثر رکورد ورودی در سه گمانه BH-7، BH-8 و BH-9 مشاهده می‌شود که بیشترین تنش در پوشش تونل در این گمانه‌ها به ترتیب $10/39$ ، $11/48$ و $8/74$ مگاپاسگال در راستای اعمال بار زلزله می‌باشد و بحرانی‌ترین حالت گمانه BH-8 می‌باشد. در شکل (۸) میزان تنش ایجاد شده در پوشش تونل در انتهای تحلیل و تغییرات تنش با عمق در هر سه گمانه مشاهده می‌شود.

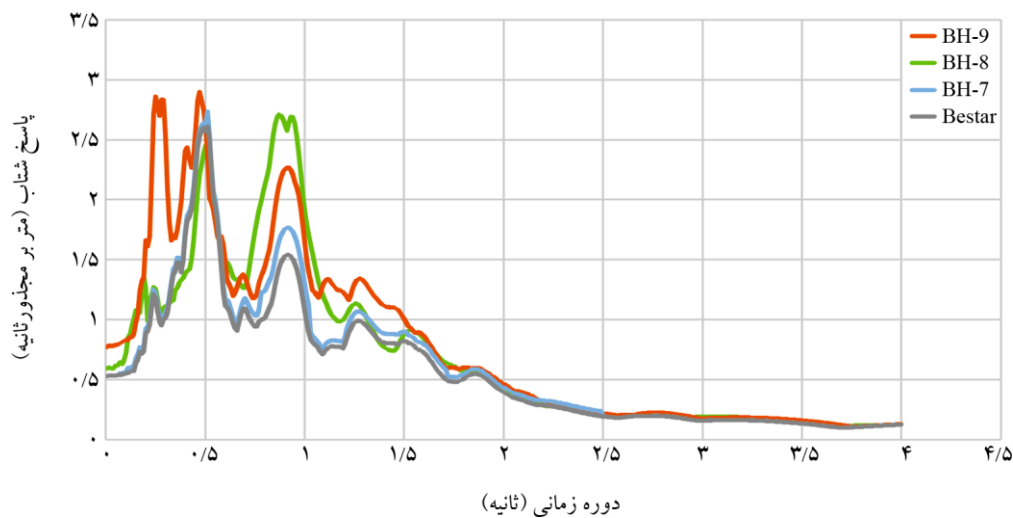
در شکل (۸) بیشترین تنش در گمانه BH-8 به وجود می‌آید و با وجود این که بحرانی‌ترین گمانه از لحاظ بزرگنمایی امواج گمانه BH-9 می‌باشد اما بیشترین مقدار تنش و تغییر شکل در پوشش تونل و تاج تونل در گمانه BH-8 یعنی ایستگاه میدان انقلاب با مقدار $11/62$ مگاپاسگال رخ می‌دهد که دلیل عمده این پدیده قرارگیری این ایستگاه در نزدیکی سنگ بستر و انکسار امواج در نزدیکی سنگ بستر است که با توجه به خصوصیات خاک در این ناحیه، پدیده تشدید قابل ملاحظه بوده و بیشترین تنش در پوشش تونل ایجاد می‌شود.



شکل (۷): نمودار تاریخچه زمانی شتاب اعمالی به بستر خاک و تاریخچه زمانی شتاب دریافت شده در سطح زمین در گمانه BH-9.



شکل (۸): کانتور تنش و میزان خسارت ایجاد شده در پوشش تونل به ترتیب برای گمانه‌های (الف) BH-7، (ب) BH-8 و (پ) BH-9.



شکل (۹): طیف پاسخ شتاب در بستر و گمانه‌های BH-7، BH-8 و BH-9.

۶- طیف پاسخ شتاب

مقادیر طیف پاسخ شتاب در سنگ‌بستر و در سطح برای گمانه‌های مختلف در شکل (۹) ارائه شده است.

همان‌طور که از نمودار شکل (۹) مشخص است بیشترین تغییر در پاسخ طیف شتاب در سطح خاک گمانه BH-9 رخ می‌دهد و این مقدار در گمانه BH-8 از گمانه BH-7 بیشتر می‌باشد. طیف پاسخ شتاب دریافت شده از سطح در گمانه BH-9 بیشترین افزایش را نسبت به دو گمانه دیگر دارد و این مقدار افزایش ۱۱ درصدی در مقدار پریود خاک را در این گمانه نشان می‌دهد. در حالت کلی صرفاً نوع و مشخصات لایه‌های احاطه‌کننده پوشش بتنی تونل تعیین‌کننده میزان خسارت ایجاد شده در تونل در گمانه‌های مختلف نیست و عوامل مختلفی از جمله محتوا و شدت زلزله وارده بر تونل، میزان بزرگنمایی ایجاد شده در پروفیل خاک، میزان سربار تونل،

مقاومت مصالح تشکیل‌دهنده پوشش بتنی و فاصله از سنگ‌بستر در تعیین میزان خسارات تأثیرگذار می‌باشد.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر زلزله بر ساختگاه متروی کرمانشاه پرداخته شد. سه گمانه BH-7، BH-8 و BH-9 مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج زیر به دست آمد:

- عملکرد مطلوب مرزهای نیمه‌بی‌نهایت در تحلیل‌های دینامیکی استفاده از این المان‌ها را تبدیل به گزینه‌ای مناسب به‌عنوان مرزهای جاذب در تحلیل‌های لرزه‌ای برای محققین می‌کند.
- نتایج حاصله از بررسی تاریخچه زمانی شتاب رخ داده در سه گمانه BH-7، BH-8 و BH-9 نشان می‌دهند که بزرگنمایی گمانه BH-7 برابر با $1/64$ و در گمانه BH-8 برابر با $1/84$ و در گمانه BH-9 برابر با $2/38$ می‌باشد، بنابراین بزرگنمایی

6. Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., and Rabeti Moghadam, M. (2015) Tehran Subway Tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Journal of Earthquake Science and Engineering*, **2**(3), (in Persian).
7. Drucker D.C. and Prager W. (1952) Soil mechanics and plastic analysis for limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, **10**(2), 157-165.
8. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Onate, E. (1989) A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, **25**(3), 299-326.
9. Saedi Darian, A. and Arabzade, H. (2011) *Abaqus Comprehensive Guide*. Angize Press (in Persian).
10. Final Geotechnical Report of Kermanshah Subway, Line one (in Persian).
11. 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.
12. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen (1998) *ABAQUS/Standard: User's Manual* (Vol. 1). Hibbitt, Karlsson & Sorensen.

۳. حداکثر در گمانه BH-9 با مقدار ۲/۳۸ رخ می‌دهد که بحرانی‌ترین گمانه از لحاظ بزرگنمایی امواج ورودی در سطح زمین می‌باشد.
۴. بیشترین تغییر شکل در پوشش تونل در گمانه BH-8 رخ می‌دهد که بحرانی‌ترین حالت از لحاظ آسیب وارده بر پوشش تونل می‌باشد.
۵. طیف پاسخ شتاب دریافت شده از سطح در گمانه BH-9 بیشترین افزایش را نسبت به دو گمانه دیگر دارد و این مقدار افزایش ۱۱ درصدی در مقدار پریود خاک را در این گمانه نشان می‌دهد.
۶. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که نوع خسارات وارده بر پوشش تونل بر اثر بارگذاری لرزه‌ای وابسته به عوامل مختلفی از جمله نوع خاک محیط، محتوای فرکانسی و شدت زلزله وارده بر تونل، میزان بزرگنمایی ایجاد شده در پروفیل خاک، مقدار سربار تونل، فاصله از سنگ‌بستر لرزه‌ای و مقاومت مصالح تشکیل دهنده پوشش بتنی می‌باشد.

مراجع

- | | |
|--|--|
| <p>واژه‌نامه</p> <p>Underground Structures ۱- سازه‌های زیرزمینی</p> <p>Metro Tunnels ۲- تونل‌های مترو</p> <p>Amplification ۳- بزرگنمایی</p> <p>Site Effect ۴- اثرات ساختگاه</p> <p>Finite Element ۵- اجزای محدود</p> <p>Frequency Analysis ۶- تحلیل فرکانسی</p> <p>Free Field ۷- میدان آزاد</p> <p>Plane Strain ۸- کرنش مسطح</p> <p>Concrete Damage Plasticity ۹- مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده</p> <p>Micro Crack ۱۰- ترک‌های ریز</p> <p>Absorbent Boundary ۱۱- مرز جاذب انرژی</p> <p>Formulation Penalty ۱۲- فرمولاسیون پناستی</p> <p>Hard Contact ۱۳- تماس سخت</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Pakbaz, M.C. and Yareevand, A. (2005) 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading. <i>Tunnelling and Underground Space Technology</i>, 20(5), 411-417. 2. Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000) Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental? <i>Journal of Earthquake Engineering</i>, 4(03), 277-301. 3. Wang, J.N. (1993) <i>Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-art Approach</i>. Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. http://www.pbworld.com/pdfs/publications/monographs/wang.pdf. 4. Penzien, J. (2000) Seismically induced racking of tunnel linings. <i>Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn.</i>, 29, 683-691. 5. Nath, S.K. and Thingbaijam, K.K.S. (2011) Assessment of seismic site conditions: a case study from Guwahati city, Northeast India. <i>Pure and Applied Geophysics</i>, 168(10), 1645-1668. |
|--|--|

Behavioral Study of Site Effect on the Kermanshah Subway

Mehdi Javanmard^{1*} and Hasan Sharafi²

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, *Corresponding Author, email: m.javanmard42@yahoo.com
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Overpopulation in metropolises has led to a space reduction in the cities and a tendency to use underground spaces. Different solutions have been proposed for traffic problems; there are many cases in science research in recent years that show the significance of earthquake destruction effects on these structures. Regarding seismicity of the Kermanshah city, we have tried to study the effects of earthquake on the site effect of Kermanshah subway tunnel by using ABAQUS software and finite element method. Each one of BH-7, BH-8 and BH-9 bore holes have been analyzed in three different steps: first, frequency analysis, then free field analysis (without tunnel), and finally the main model. The results derived from the time historical analysis of the three BH-7, BH-8 and BH-9 bore holes show that the maximum amplification occurs in the BH-9 borehole, which is the most critical borehole in terms of amplification received waveforms on the earth surface. Although the maximum amplification occurs in the BH-9 borehole, the highest maximum stress occurs in the tunnel cover at the site of the BH-8 borehole due to the location of this borehole, which is near the bedrock. According to this study results, the type of damage in tunnels cover depends on the geotechnical characteristics of the layers, the content and intensity of the earthquake record, the amplification that occurs in the soil profile, the amount of tunnel overhead load and the strength of materials that covers tunnel with concrete.

1. Introduction

Nowadays, underground structures such as subway tunnels, water and sewage transfer tunnels, utility tunnels, subway stations and underground parking are among the vital infrastructures of the new urbanization. This kind of structure especially in crowded cities is built to resolve different needs. The study of destructive earthquakes that have occurred in recent decades has clearly shown that geological conditions and site effects play an important role in amplification of the strong movement of the earthquake. Soil type and local geology can play an important role in seismic movement's amplification and the type of damage caused by strong earthquakes.

2. Specifications of Materials Used in Numerical Analysis

2.1. Geometry and Tunnels Cover

One of the effective parameters in studying the seismic responses of underground tunnels is the geometric dimensions of the tunnel section. The cross section of Kermanshah City subway tunnel is horseshoe type with an average radius of 4.3 meters. In this case study, two-dimension modeling has been used for modeling with plan strain conditions.

The thickness of the concrete cover of the tunnel is 30 cm. Behavioral model of damaged concrete has been used to define the nonlinear characteristics of concrete tunnel cover. This behavioral model is the most comprehensive and widely used model for concrete in Abacus software. In the damage mechanism, it is assumed that the decrease in stiffness is due to the creation and expansion of small cracks in order that the decrease in stiffness can be measured and determined with a parameter called damage.

Conclusion

In this study, we have tried to study the effect of earthquake on the site effect of Kermanshah subway tunnel by using ABAQUS software and finite element method. According to study results, the type of damage in tunnels cover

depends on the geotechnical characteristics of the soil layers, the content and intensity of the earthquake record, the amplification that occurs in the soil profile, the amount of tunnel overhead load and the strength of materials which covers tunnel with concrete.

Keywords: Site Effect, Wave Amplification, Kermanshah City, Metro Tunnel.