نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره ۸،شم، شماره نوزدهم، سال ۱۳۹۲، صفحه ۱۰۸ تا ۱۱۶
Vol. 8, No. 19, 2013, pp. 108-116

"یادداشت فنی"

تحلیل دینامیکی تونل خط هفت متروی تهران با استفاده از روش اندرکنش زمین- سازه با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

مریم مرادی [۱]، مهدی حسینی [۲] ، محسن شریفی بروجردی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، moradimalemiry@yahoo.com
۲- استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، meh_hosseini18@ yahoo.com
۳-کارشناس ارشد شرکت مهاب قدس

(دریافت ۱۰ اسفند ۱۳۹۰، پذیرش ۸ بهمن ۱۳۹۱)

چکیده

یکی از خطوط اصلی در شبکه ریلی تهران خط ۷ مترو است که بصورت شرقی- غربی و شمالی- جنوبی است. طول خط هفت حدود ۲۶/۷ کیلومتر بوده و دارای ۲۵ ایستگاه می‌باشد. هدف از این تحقیق تحلیل دینامیکی قطعه شرقی- غربی تونل می‌باشد که دارای طولی حدود ۱۲ کیلومتر است. این تونل توسط یک دستگاه ماشین سپر فشار تعادلی حفاری و سگمنت گذاری خواهد شد. با توجه به داده های موجود، محدوده مورد مطالعه از دیرباز در معرض رخدادهای زمین لرزه‌ای متوسط تا شدید قرار داشته است . پس از تحلیل خطر زلزله در محدوده مورد بررسی، اطلاعات شتاب نگاشت زنجیران بعنوان زلزله مبنا بصورت مقیاس شده، برای تحلیل دینامیکی انتخاب گردید . برای بررسی پایداری تونل سه مقطع در فاصله ۲۹۰۰، ۴۳۰۰ و ۱۰۶۰۰ از استادیوم تختی مدلسازی شد. مدلهای مورد نظر ابتدا تحت شرایط استاتیکی تحلیل شدند. پس از اطمینان از پایداری مدل ها، تحلیل دینامیکی تحت بارگذاری زلزله انتخاب شده انجام شد . پس از پایان تحلیل دینامیکی تنش های برشی، نیروی محوری و ممان خمشی وارد شده بر سیستم نگهداری در سه نقطه اطراف تونل (سقف، کف و دیواره) توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ مورد بررسی قرار گرفتند . نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی نشان می‌دهد تونل مورد نظر در برابر بارگذاری این زلزله پایدار می‌باشد.

کلمات کلیدی

تحلیل دینامیکی، مترو خط هفت، زلزله زنجیران، نرم‌افزار $FLAC^{3D}$.

۱ مقدمه

با توجه به توسعه ی روزافزون فناوری در حفر فضاهای زیرزمینی، محدودیت‌های فضاهای سطحی برای اجرای برخی طرح‌های عمرانی باعث شده است که احداث سازه های زیرزمینی شامل راه ها و بزرگراه های زیرزمینی، مغارهای زیرزمینی برای دفن زباله‌های هسته ای، مخازن نفت و گاز، پناهگاه‌ها و انبارها و شبکه‌ی مترو شهری بطور گسترده ای گسترش پیدا کند. کمتر بودن اثرات منفی زیست محیطی، کوتاه شدن مسیرها و کاهش ترافیک، جلوگیری از خط رات ریزش کوه و بهمن و ایمنی بیشتر در مقابل زلزله از جمله مزایایی است که باعث شده تونل بعنوان زیر گذرها، مترو، مسیر انتقال آب و گاز و... بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار بگیرند. بر اساس یک پندار کهن، سازه‌های زیرزمینی ایمن ترین سازه‌ها در برابر زلزله می باشند. در تمام نقاط جهان خطوط متروی زیر زمینی به عنوان پناهگاه برای نجات و اسکان در زمان وقوع زلزله مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲ معرفی پروژه خط هفت متروی تهران

برای شبکه ریلی شهر تهران ۱۳ خط ریلی به صورت ۹ خط عادی و ۴ خط سریع السیر لحاظ شده است. یکی از خطوط اصلی در این شبکه، خط ۷ مترو می‌باشد که به صورت شرقی – غربی و شمال - جنوبی می باشد که در شبکه مسیر ریلی از اهمیت ویژه ای برخوردار است (شکل ۱).

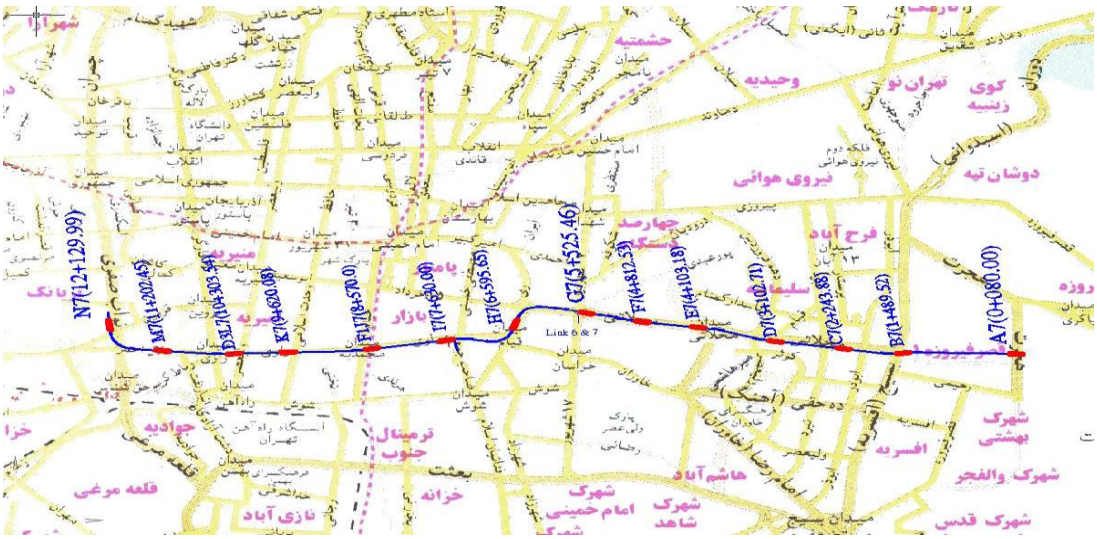
این خط شامل ۲۵ ایستگاه می باشد که تمامی آنها زیرزمینی است. بر اساس آخرین پلان و پروفیل موجود از خط ۷ متروی تهران، طول تونل با احتساب طول ایستگاهها ۲۶/۷ کیلومتر، طول بدون ایستگاهها ۲۱/۸ کیلومتر، طول سکوی ایستگاهها ۱۶۰ متر می‌باشد [۱] .

۲ ۱ زمین شناسی

شهر تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان کواترنری بنا شده است. با استفاده از نتایج آزمایشهای صحرایی و نیز آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های حاصل از حفاری ها، نهشته‌های دشت تهران از شمال به جنوب از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی به چهار بخش متمایز تقسیم شده است . این بخشها را با علائم A, B, C, Dمشخص شده است . بر مبنای تقسیم بندی پژوهشگاه زلزله (۱۳۸۰) و نیز با توجه به نتایج بدست آمده از حفاری گمانه های مسیر تونل، محدوده مسیر تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ مترو تهران جزء نهشته های (D) تقسیم بندی می‌شود [۲].

۲ ۲ خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی

مسیر تونل به شش واحد (گونه) زمین‌شناسی (Engineering geological Type) تفکیک شده است . بر اساس پروفیل طولی تونل واحدهای ET-2 و ET-3، ET-5 و ET-1 به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارد. واحد ET-4 بیشتر بصورت لنزها و عدسی های ماسه ای گسترش یافته است. واحد ET-6در مسیر تونل گسترش کمی داشته و موقعیت آن تنها در کیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ (فاصله از استادیوم تختی که ابتد ای تونل می باشد .) در محدوده بالای سقف تونل می‌باشد.



شکل ۱: پلان قطعه شرقی-غربی تونل خط ۷ متروی تهران و موقعیت ایستگاه‌ها[۱]

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی[۲]

واحدهای زمین‌شناسی	پارامترهای تنش موثر		پارامترهای تغییر شکل پذیری		وزن مخصوص خشک (KN/m3)
	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (˚)	مدول تغییر شکل (MPa)	نسبت پواسون	
ET-1	۱۴	۳۴	۸۰	۰/۳	۱۸/۶
ET-2	۱۵	۳۳	۷۵	۰/۳	۱۸/۴
ET-3	۳۰	۳۳	۵۰	۰/۳۲	۰/۱۹
ET-4	۲۲	۳۲	۵۰	۰/۳	۱۸/۲
ET-5	۳۱	۲۸	۳۵	۰/۳۵	۱۷
ET-6	۰	۲۷	/۳۵ ۰	۲۷	۱۷

۲ ۴ طرح هندسی پروژه

حفاری به روش مکانیزه انجام می‌شود و پوشش بتنی نیز از نوع سگمنتی مکعب مستطیلی (تتراگونال) با چیدمان ۱+۶ می‌باشد .قطر داخلی و خارجی به ترتیب برابر ۸/۱۵ متر و ۸/۸۵ متر و ضخامت سگمنتها ۳۵ سانتی متر است [۳].

۲ ۴ مشخصات پوشش بتنی

الف- نوع و مشخصات میلگردها، پروفیل ها و ورق های فولادی مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مشخصات میلگردها، پروفیلها و ورقهای فولادی مصرفی [۴]

نوع مصالح	نوع	حداقل تنش جاری شدن (کیلوگرم بر سانتیمترمربع)
میلگردها	AIII،آجدار	۴۰۰۰
پروفیل ها و ورق های فولادی	ST۳۷	۲۴۰۰

ب- بتن

بتن مصرفی به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات بتن مصرفی[۴]

مقاومت 28 روزه نمونه استوانه‌ای	۴۰ MPa
مدول الاستیسیته	۳۰۰۰۰ MPa
ضریب پواسون	۰/۲
جرم واحد حجم بتن	۲۵۰۰ kg/m3

نوع و مشخصات پوشش بتنی تونل به صورت خلاصه در جدول۴ ارائه شده است.

جدول ۴ : مشخصات پوشش بتنی تونل [۴]

نوع پوشش	ساخته پیش بتنی
نوع سگمنت ها	مستطیلی
تعداد سگمنت ها	۱+۶ (۱سگمنت کف)
ضخامت پوشش	۳۵۰mm
طول سگمنت ها(طول رینگ)	۱۵۰۰mmمتوسط
حداکثر وزن سگمنت ها	۵۶۰۰ kg

۳ تحلیل دینامیکی سازه با کاربرد نرم افزار $FLAC^{3D}$

FLAC3D سر واژه کلمات Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions است که تحلیل سریع لاگرانژی محیط سه بعدی پیوسته را به کمک روش تفاضل محدود انجام می‌دهد. این برنامه که اولین بار در سال ۱۹۸۶ و توسط دکتر پیتر کاندال ارائه گردید، در سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است که توسعه آن توسط شرکت مشاوری Itasca

انجام گرفته است و قابلیت تحلیل سه بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای و تنش صفحه ای را داراست . FLAC3D رفتار سازه‌های ساخته شده در خاک، سنگ و دیگر موادی که وقتی به مرحله تسلیم برسند، رفتار پلاستیک از خود نشان می دهند را در حالت سه بعدی مدل می کند. مواد به وسیله المان های چهاروجهی داخل یک شبکه سه بعدی که بوسیله کاربر جهت ساختن اشکال مورد نظر اصلاح گردیده است، نشان داده می‌شوند [۵]. هر المان در مقابل نیروها و مد تحلیل دینامیکی این نرم افزار را قادر می سازد که علاوه بر ت حلیل استاتیکی توانایی انجام تحلیل دینامیکی مانند بارگذاری زلزله و یا انفجار را نیز دارا باشد . جهت تحلیل دینامیکی، امواج تنش، سرعت و شتاب مشخص شده توسط کاربر بطور مستقیم به هر دو صورت شرایط مرزی خارجی و یا یک تحریک داخلی می تواند وارد گردد. جهت مدل کردن اثر مواد نامحدود اطراف مدل در تحلیل دینامیکی، $FLAC^{3D}$ دارای شرایط مرزی جاذب [۱] و میدان آزاد [۲] است و محاسبات دینامیکی می تواند همراه با جریان آب زیرزمینی در داخل مدل انجام گیرد . جهت انجام محاسبات دینامیکی با استفاده از روش های عددی در مدلسازی انتقال موج در ساختگاه های لایه ای و همچنین مدلسازی اندرکنش خاک- سازه، روش رایج استفاده از روش معادل خطی[۳] می‌باشد. اما روش مورد استفاده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ استفاده از روش غیر خطی کامل[۴] می‌باشد [۵].

در انجام این تحقیق مدل های زیادی در محیط $FLAC^{3D}$ ساخته و اجرا شد و پس از بررسی های صورت گرفته بهترین مدلها با توجه به مقاطع انتخابی، انتخاب شدند . جهت بارگذاری زلزله، زلزله زنجیران انتخاب شد . شتاب نگاشت بر اساس بزرگای هدف، فاصله چشمه لرزه ای زمین لرزه تا ایستگاه شتابنگار، ساز و کار زمین لرزه و شرایط ژئوتکنیک لرزه ای ایستگاه شتابنگار انتخاب شده است. که پس از تصحیحات لازم بر روی داده‌های شتاب‌نگاشتی این زلزله، به پایه مدل ها اعمال گردید. قبل از انجام تحلیل دینامیکی مدل باید تحلیل استاتیکی انجام شود و پس از تائید و پایداری مدل در این مرحله، تحلیل دینامیکی آغاز می شود. بطور کلی فرایند تحلیل دینامیکی به شرح زیر می‌باشد:

- انتخاب مقاطع مناسب جهت آنالیز
- تدوین تاریخچه زمانی زلزله طرح
- انتخاب ابعاد مدل
- انتخاب اندازه المان‌های مدل
- تعیین مرزهای دینامیکی
- انتخاب میرایی مدل
- بارگذاری دینامیکی زلزله

۴ -انتخاب مقاطع مناسب جهت آنالیز

انتخاب مقاطع بحرانی جزء اس اسی هر تحلیلی می باشد. پس از مطالعه مسیر تونل و شناسایی و بررسی محل ساختارهای زمین‌شناسی (مانند نوع خاک، گسل)، وضعیت مواد (مانند خصوصیات الاستیک /پلاستیک، رفتار بعد ازشکست)، شرایط اولیه (مانند حالت برجای تنش، فشار منفذی) بهترین مقاطع انتخاب شدند . که برای انجام این آنالیز سه مقطع در فاصله ۲۹۰۰، ۴۳۰۰ و ۱۰۶۰۰ متری از استادیوم تختی بعنوان مقاطع انتخابی در نظر گرفته شدند . مقطع شماره ۱ که در متراژ ۲۹۰۰ قرار دارد، دارای کمترین روباره (۱۴متر) در کل مسیر تونل می‌باشد. علت انتخاب آسیب‌پذیری بیشتر سازه‌های سطحی در برابر زلزله می‌باشد. در مقطع شماره ۲ که در متراژ ۴۳۰۰ واقع است هم پارامتر عمق و هم نوع سنگ در برگیرنده مدنظر قرار گرفته است . با درنظر گرفتن عمق کم و خاک ضعیف اطراف این مقطع برای تحلیل انتخاب گردید . مقطع شماره ۳ که در متراژ ۱۰۶۰۰ واقع است ضعیف ترین خاک اطراف را نسبت به سایر مقاطع و کل مسیر داراست . در جدول ۵ مشخصات مقاطع انتخابی مورد نظر آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات مقاطع انتخابی

شماره مقطع	متراژ(m)	واحد خاکی	میزان روباره(m)	هد آب در کف تونل(m)
۱	۲۹۰۰	ET-3,ET-2	۱۴	۰
۲	۴۳۰۰	ET-3,ET-,ET-1	۱۸	۱
۳	۱۰۶۰۰	ET-2,ET-3,ET-5	۲۲	۹/۴۲

۵ -تدوین تاریخچه زمانی زلزله

در این تحقیق شتاب‌نگاشت ثبت شده در زلزله ای که بیشترین انطباق را با لرزه زمین ساخت و زمین شناسی ساختگاه مورد نظر داشته باشد، انتخاب گردید . بر این اساس عواملی چون مکانیزم گسیختگی گسل، عامل زلزله، بزرگای زلزله، فا صله

1 .Absorbing boundary
2 Free Field
3 .Equivalent-linear
4 .Fully nonlinear

سطحی و لیتولوژی محل شتاب نگاشتها مورد توجه قرار می‌گیرد.

۵ ـ ۱ـ انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب

در مهندسی زلزله عمدتا از بیشینه شتاب بعنوان شاخص خسارت استفاده می گردد. با توجه به شرایط ساختگاه تونل و با بررسی تعداد زیادی از رکوردهای زلزله های ۲۰ سال گذشته ایران که با شرایط گستره مورد بررسی مطابقت داشتند، مناسب‌ترین رکورد، رکورد زلزله زنجیران (گرفته شده از پایگاه پژوهشگاه بین المللی زلزله) انتخاب شد (جدول ۶ و۷). هر رکورد شتاب نگاشت زلزله شامل سه مولفه طولی، عرضی و عمودی است. سه مولفه طولی، عرضی و عمودی است. مطالعات گذشته نشان می دهد اکثراً حرکت های ناشی از زلزله افقی است لذا توسط نرم افزار Siesmosignal شتاب نگاشت های مولفه طولی و عرضی شتاب افقی رسم می شود در جدول ۷ مقادیر بیشینه مولفه طولی و عرضی شتاب افقی مشاهده می شود .

جدول۶: مشخصات رکورد زلزله

نام	استان	بزرگی(ریشتر)	تاریخ وقوع
زنجیران	فارس	۵/۹	۱۹۹۹/۰۶/۲۰

جدول۷: پارامترهای جنبش نیرومند زمین رکورد زلزله زنجیران (اصلاح نشده)

بیشینه شتاب افقی	پارامترها		
	شتاب (g)	سرعت (cm/sec)	جابجایی (cm)
مولفه طولی	۰/۴۲	۲۶/۵۰	۵/۷
مولفه عرضی	۰/۳۹	۲۰/۹۰	۵/۲

۵ ـ ۲ـ اصلاح شتاب‌نگاشت

در جدول ۶ بیشینه شتاب ثبت شده در ایستگاه زنجیران برای دو مولفه طولی و عرضی به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۳۹ است. این مقدار با بیشینه شتاب بدست آمده از تحلیل خطر زلزله برای زلزله های DBE (زمین لرزه مبنای طرح) و MCE (زمین لرزه حداکثر طراحی) تفاوت دارد. بنابراین لازم است تا شتاب‌نگاشت پایه نسبت به مقادیر مورد نظر مقیاس شود . ضریب مقیاس بصورت نسبت بیشینه شتاب هدف به بیشینه شتاب پایه تعریف می گردد. این برای زلزله های DBE محاسبه می‌گردد. با ضرب کردن ضرایب مقیاس اخیر در تاریخچه شتاب و سرعت زنجیران می توان تاریخچه زمانی شتاب و سرعت زلزله‌های طراحی را بدست آورد . سپس باید محتوی فرکانس تاریخچه‌های زمانی شتاب اصلاح گردد . اصلاح شتاب نگاشت زلزله زنجیران توسط نرم افزار Seismosignal صورت گرفته است. جدول ۸ دامنه حرکات زمین برای زلزله اصلاح شده DBE را نشان می‌دهد.

جدول ۸: دامنه حرکات زمین برای زلزله اصلاح شده

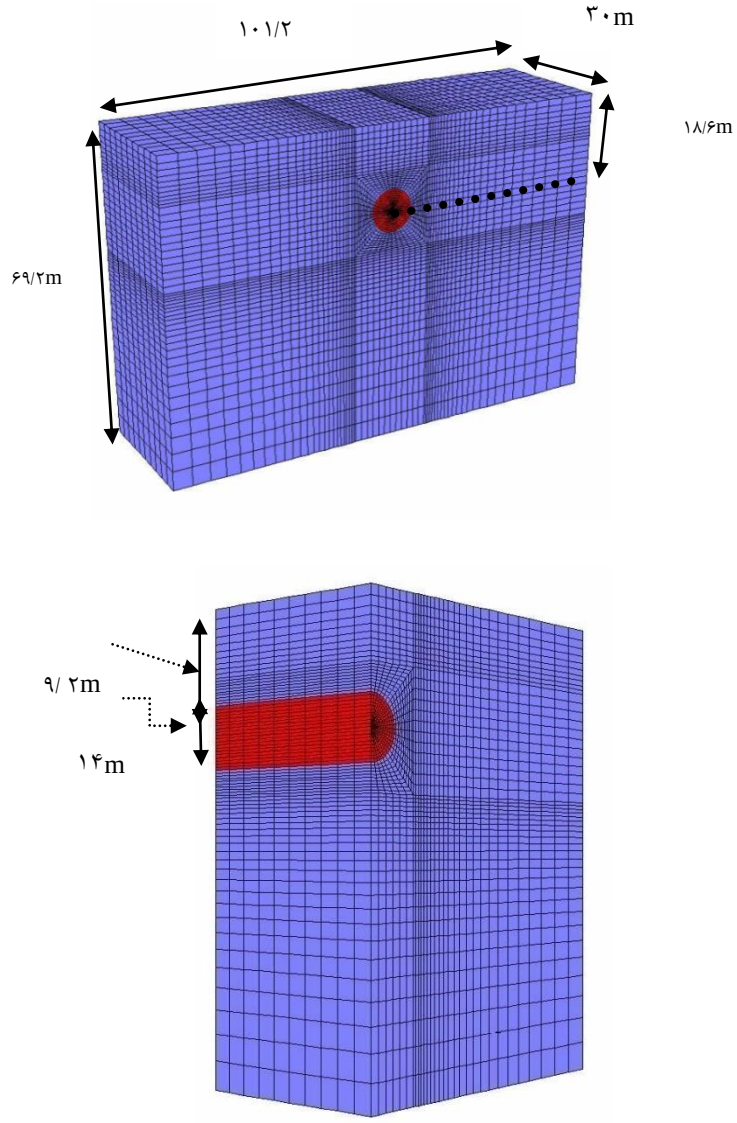
بیشینه شتاب افقی	پارامترها		
	شتاب (g)	سرعت (cm/sec)	جابجایی (cm)
مولفه طولی	۰/۳۸	۲۱/۷۱	۵/۷۳
مولفه عرضی	۰/۳۸	۲۵/۶۰	۴/۸

۶ ـ انتخاب ابعاد مدل

شرط رسیدن به تعادل رسیدن به همگرایی عددی است . ماکزیمم نیروی نا متعادل گره ای یکی از معیارهای همگرایی است. نیروی نامتعادل برابر با مجموع نیروهای وارده به هر گره از طرف المان‌های مجاور می‌باشد. اگر یک گره در تعادل باشد، مجموع نیروها برابرصفر است . بعد از بررسی تعادل مدل و اطمینان از پایداری عددی، حفاری انجام می گیرد. سپس مجددا تعادل در مدل برقرار شده و تنش ها و جابجایی های این مرحله با حالت قبل از حفاری مقایسه می گردد. ابعاد مدل انتخاب شده برای مدلسازی در این پایان نامه بیش از ۱۰ برابر قطر حفاری از مرکز تونل از هر طرف در نظر گرفته شده است . بدین منظور مدلی با ابعاد ۱۰۱ متر در جهت عرضی مقط ع تونل و ۳۰ متر در جهت طولی تونل در نظر گرفته شده است . فاصله کف مدل تا مرکز تونل برای تمام مدلهای ساخته شده ۵۰/۶ متر و فاصله از مرکز تونل تا سطح زمین برابر ۱۸/۶ متر در نظر گرفته شده است . نمونه‌ای از مدلسازی مقطع ۱ (متراژ ۲۹۰۰) در شکل ۲ نشان داده شده است.

۷ ـ انتخاب اندازه المانها

در مناطقی که تغییر تنش ها و کرنش ها در مدل بیشتر است، المانهایی با ابعاد کوچکتر و در مناطق با تاثیر کمتر، المانهایی با ابعاد بزرگتر انتخاب می شوند. بصورتیکه تعداد المانها تغییر قابل ملاحظه در نتایج ایجاد ننماید. در این تحقیق به منظور کاهش تاثیر مرز بر روی نتایج، مرزهای طرفین تونل ۱۰ برابر شعاع تونل در نظر گرفته شدند.



شکل ۲: مدلسازی مقطع شماره ۱

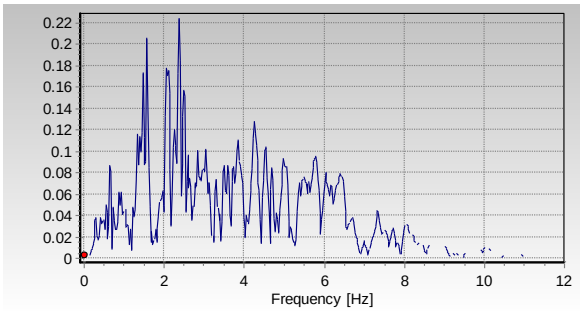
بعد از تعیین المانها در حالت استاتیکی، برای آماده کردن مدل جهت تحلیل دینامیکی نیاز است تا اندازه المانها جهت انتقال صح یح موج زلزله، مجددا مورد بررسی قرار گیرد تا از اعوجاج موج زلزله در مدل جلوگیری شود . پایداری مدلسازی عددی جهت عبور موج در گرو ابعاد المان است . باید بزرگترین بعد المان l، کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج (L_{max}) بزرگترین فرکانس موج ورودی باشد [۵].

$$l \le (\frac{1}{8} - \frac{1}{10})L_{max} \qquad (۱)$$

$$L_{max} = \frac{c}{f_{max}} \qquad (۲)$$

c =سرعت موج برشی ، f_{max} =بالاترین فرکانس که حاوی انرژی قابل ملاحظه است.

در این تحقیق جهت بررسی صحیح ابعاد المان ها در مدلسازی، با استفاده از تبدیل موج زلزله از حوزه زمان به حوزه فرکانس، فرکانس غالب موج مورد مطالعه بدست آمده است . در این تحقیق موج ورودی از رکورد زلزله زنجیران است همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود بیش از ۹۹٪ از انرژی موج بوط (محور عمودی نمودار نشانگر آن است) به امواج با رکانس ۱۰ هرتز و کمتر می باشد بنابر این مقدار بالاترین فرکانس با توجه به شکل ۱۰ هرتز به دست می آید و فرکانس های بالای ۱۰ هرتز در مجموع کمتر از یک درصد انرژی موج را دارند. در نتیجه فرکانسهای بالای ۱۰ هرتز قابل صرف نظر کردن است. با استفاده از فرکانس غالب و سرعت موج برشی که با توجه به خصوصیات محیط و بر اساس طبقه بندی موجود در آئین نامه ساختمان ۲۸۰۰ تعیین می شود ($\frac{m}{s}$ ۳۶۰)، از رابطه ۱ بزرگترین بعد المان جهت انتقال صحیح موج مورد مطالعه در هر مدل، محاسبه شده است. بزرگترین بعد المان مجاز محاسبه شده در این تحقیق ۴/۵ متر می‌باشد.



شکل ۳: طیف فوریه فرکانس زلزله اصلاح شده توسط نرم افزار Seismosignal

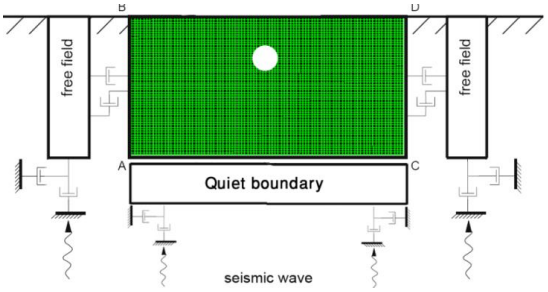
۸ -تعیین مرزهای دینامیکی

در یک مدل دینامیکی صحیح، امواج ورودی به مدل باید میرا گشته و از بین بروند تا ب توان شرایط واقع ی مدل را مدلسازی نمود. بنابراین تعریف شرایط مرزی برای مدل ضروری می باشد. بطور کلی دو نوع مرز برای هر مدلی (مرز آزاد و مرز ویسکوز) می‌توان تعریف کرد.

در مدلسازی دینامیکی لازم است که ابعاد مدل با مرزهای مصنوعی محدود شود. وجود این نوع مرزها باعث می شود موج پس از برخورد به آنها منعکس شود و دوباره به مدل برگردد . در نتیجه نتایج صحیحی از تحلیل بدست نمی دهد. با توجه به اینکه امواج میرا می شوند، می توان از مدل های بزرگ استفاده

کرد ولی این کار زمان و حافظه مورد نیاز برای تحلیل را افزایش می‌دهد. در نتیجه برای رهایی ا ز این مشکل از مرزهای ویسکوز که جاذب انرژی هستند استفاده می گردد. FLAC از مرزهای ویسکوز پیشنهاد شده توسط لایزمر و کولمیر [1] استفاده می‌کند. این روش مبتنی بر استفاده از میراگرهای عمودی و برشی در مرزهای مدل است که انرژی امواج برخوردی را جذب و از بازتاب آن به داخل مدل جلوگیری می‌کند.

در مدلسازی سازه های سطحی مانند سدها یا سازه های زیرزمینی نزدیک به سطح، شرایط مرزی در اطراف مدل بایستی قابلیت حرکات میدان آزاد زمین را بوجود آورد . حرکت میدان آزاد به این مفهوم است که موج عبوری از نزدیک مرزها تحت تاثیر پاسخ سازه قرار نگرفته و شکل دامنه موج مشابه موج ورودی باشد . مرز میدان آزاد در تحلیل های دینامیکی را می‌توان معادل مرز جابجایی یا تنش در تحلیل های استاتیک دانست. (شکل۴) در طرفین مدل مرزهای میدان آزاد تعبیه شده که با استفاده از میراگرهای افقی و قائم به مدل متصل می‌شوند. به منظور جلوگیری از انعکاس موج به داخل مدل از مرزهای ویسکوز در پایه مدل استفاده شده است. هم چنین این مرزها در پایه مرزهای میدان آزاد نیز اعمال شده است . به این ترتیب امواج زلزله پس از برخورد با مرزهای بالای مدل (سطح زمین) به سمت پائین منعکس می شوند. این امواج پس از برخورد با پایه مدل توسط میراگرها جذب شده و از انعکاس مجدد آن ممانعت به عمل می‌آید. همین حالت در ستون میدان آزاد نیز وجود دارد.



شکل ۴: شرایط مرزهای مدل در حالت دینامیکی

۹ انتخاب میرایی مدل

هر سیستم دینامیکی دارای میرایی داخلی است . در صورت عدم میرایی، ارتعاش یک سیستم مکانیکی در معرض نیروهای محرک تا ابد ادامه می یابد. میرایی در سنگ و خاک به صورت تاریخچه زمانی بوده و به مسیر بارگذاری بستگی دارد. از این رو مدل کردن عددی آن دشوار بوده و تحلیل نتایج به دست آمده نیز آسان نیست . در نرم افزار FLAC3D از سه نو ع میرایی استفاده می‌شود.

۱ - میرایی مصنوعی

۲ - میرایی موضعی

۳ - میرایی رایلی

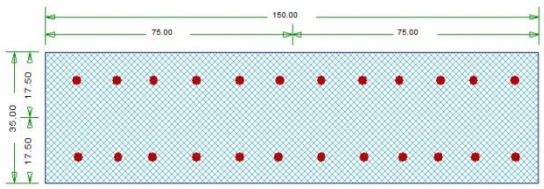
در این تحقیق از میرایی موضعی برای تحلیل دینامیکی استفاده شده است . این میرایی با استفاده از فرمول ۳ در برنامه نرم افزار قابل اجرا می‌باشد.

$$\alpha_L = \pi D \qquad (۳)$$

در اینجا α_L ضریب میرایی موضعی و D میرایی بحرانی است. در این تحلیل ضریب میرایی ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۱۰ محاسبه ضخامت معادل توسط نرم افزار CSI section builder

چون در پروژه خط هفت متروی تهران برای پوشش تونل از بتن مسلح استفاده شده است، بنابراین خصوصیات بتن خالص (غیر مسلح) را مستقیما نمی‌توان بعنوان خصوصیات پوشش در نظر گرفت. در این تحقیق از نرم افزار سازه‌ای CSI section builder برای مشخص کردن خصوصیات بتن مسلح که برای پوشش در نظر گرفته شده، استفاده شده است . پس از تحلیل صورت گرفته به کمک نرم افزار ، تصمیم گرفته شد که مقدار ضخامت سگمنت بکار برده شده بعنوان پوشش تونل به مقدار ۸ سانتی متر اضافه گردد، بنابراین ضخامت کل بکار برده شده ۴۳ سانتی متر می باشد. شکل ۵ مدل ساخته شده در section builder آورده شده است.

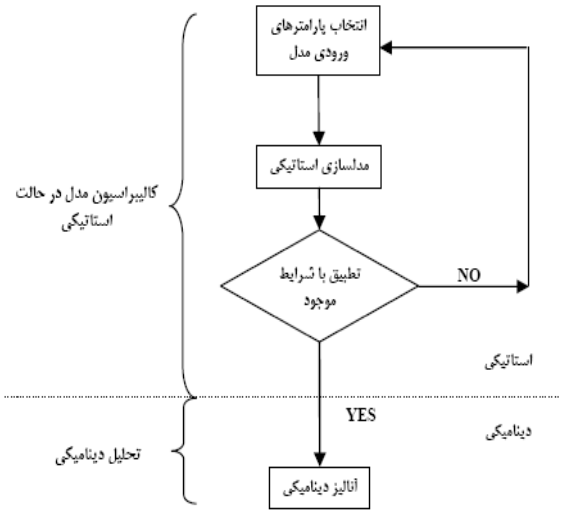


شکل ۵: مقطع شبیه سازی شده در نرم افزار section builder

1 . Lysmer & kuhlemeyer

۱۱ -تحلیل استاتیکی تونل خط هفت متروی تهران

اولین قدم در تحلیل دینامیکی مدل، کالیبراسیون مدل در حالت استاتیکی و تطبیق با شرایط موجود م ی‌باشد. بدین منظور اولین قدم انتخاب صحیح پارامترهای ژئومکانیکی خاکهای در برگیرنده تونل، ناپیوستگی‌ها و جهت تنشهای اصلی می‌باشد. پارامترهای ورودی مدل شامل مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های خاکی در برگیرنده تونل، جهت داری و شیب لایه ها، هندسه مدل و همچنین وضعیت تنش در منطقه می باشد. پس از انجام آنالیز استاتیکی مدل و تطابق آن با شرایط واقعی، نوبت به اعمال بار لرزه‌ای و آنالیز دینامیکی می‌رسد (شکل ۶).



شکل ۶: روند مدلسازی و آنالیز دینامیکی

پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدلسازی عددی مقاطع به کمک نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ در جدول ۹ مشاهده می شود.

جدول ۹: پارامترهای مورد استفاده در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

واحد زمین شناسی	مدول برشی (MPa)	مدول بالک(MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (KPa)	مقاومت کششی(KPa)
ET-1	۳۰/۷۶	۶۶/۶۶	۳۴	۱۴	۲۰/۸۹
ET-2	۲۸/۸۴	۶۲/۵۰	۳۳	۱۵	۲۳/۴۳
ET-3	۱۹	۴۶/۳۰	۳۳	۳۰	۴۶/۸۶
ET-5	۱۳	۳۹	۲۸	۳۱	۵۸/۳۳

برای اطمینان از پایداری تونل در برابر بارهای اعمالی، نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی صورت گرفته با ماکزیمم تنش مجاز وارد بر پوشش تونل مقایسه گردید نتایج در جدول ۱۰ مشاهده می شود.

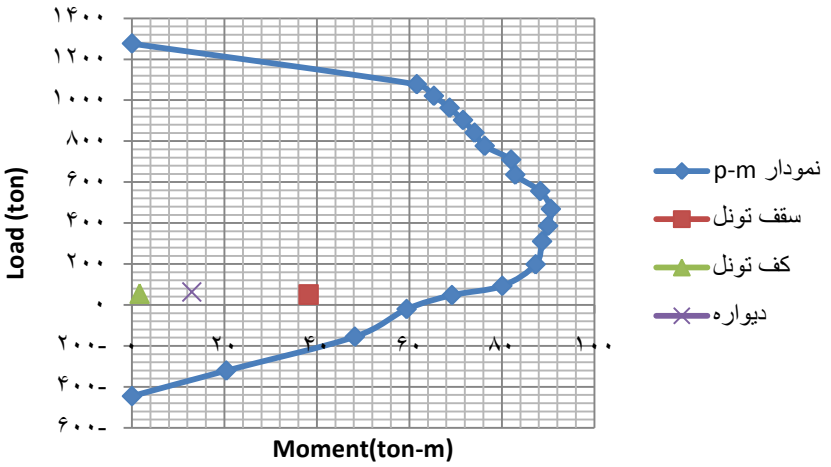
جدول ۱۰ : حداکثر تنش برشی بر روی پوشش تونل حاصل از تحلیل استاتیکی

شماره مقطع	متراژ	ماکزیمم تنش برشی	
		محاسبه شده (MPa)	مجاز(MPa)
۱	۲۹۰۰	۲/۴۹	۸
۲	۴۳۰۰	۳/۶	۸
۳	۱۰۶۰۰	۴/۹	۸

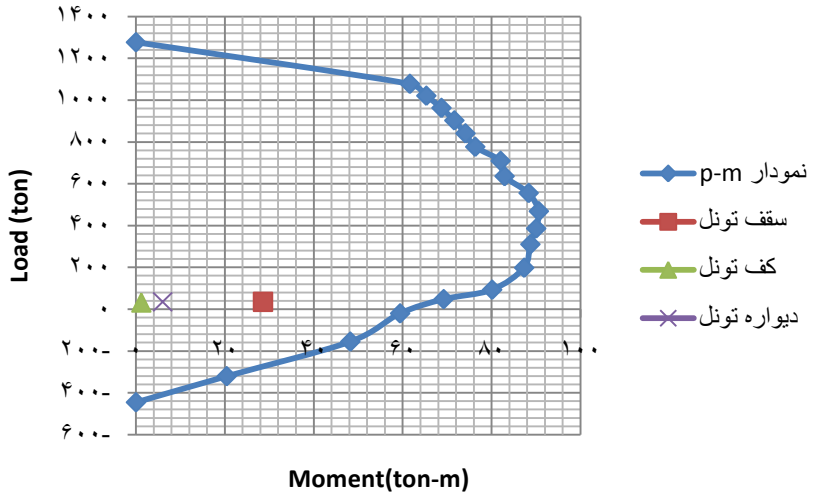
یکی دیگر از روش‌های بررسی پایداری پوشش نصب شده استفاده از روش ماکزیمم نیروی محوری – ممان خمشی ایجاد شده و مقایسه آن با مقدار مجاز پوشش می باشد. برای اطمینان از پایداری پوشش نمودار نیروی محوری – ممان خمشی پوشش با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی مقایسه می شود. همانطور که از شکل مشخص است نقاط حاصل از تحلیل صورت گرفته توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ درون نمودار قرار می‌گیرد که نشان دهنده پایداری پوشش است . لازم به ذکر است که سه نقطه شاهد اطراف تونل برای بررسی پایداری در نظر گرفته شده است (شکل ۷، ۸ و۹).

۱۲ -تحلیل دینامیکی خط هفت متروی تهران

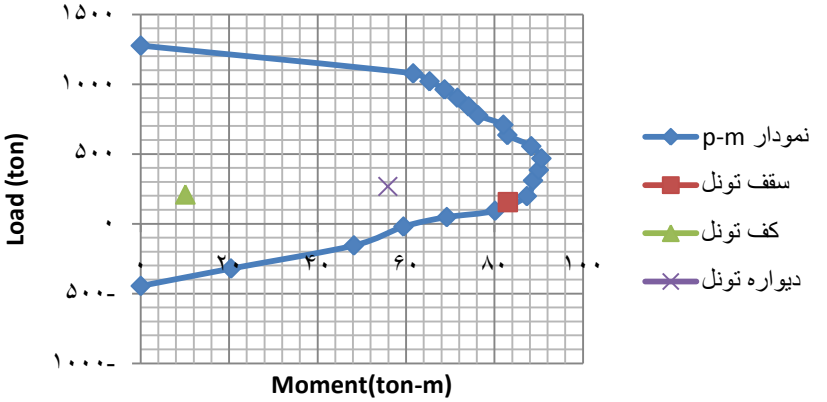
بعد ا ز تحلیل استاتیکی مدل و اطمینان از پایداری تونل در حالت استاتیکی مدل باید از نظر دینامیکی مورد تحلیل قرار گیرد. در ابتدا باید پارامترهای مورد نیاز جهت این تحلیل تعیین شوند . مدول تغییر شکل پذیری و نسبت پواسون استاتیکی با مقادیر معادل دینامیکی متفاوت می باشد. ویژگی اصلی بارهای دینامیکی، تغییرات آن با زمان است . بارهای دینامیکی را می توان بصورت باری که مقدار و آهنگ بارگذاری آن با زمان متغییر است، در نظر گرفت . از این رو برخی محققین سعی کرده‌اند با تغییر آهنگ بارگذاری در آزمونهای



شکل ۷: نمودار ممان خمشی- نیروی محوری مقطع شماره ۱ (متراژ ۲۹۰۰)



شکل۸: نمودار ممان خمشی - نیروی محوری مقطع شماره ۲ (متراژ ۴۳۰۰)



شکل ۹: نمودار ممان خمشی- نیروی محوری مقطع شماره ۳ (متراژ ۱۰۶۰۰)

استاتیکی خواص دینامیکی سنگ و خاک را مورد بررسی قرار دهند. با درنظر گرفتن یک مقدار معقول فرضی برای نسبت پواسون (۰/۵ - ۰/۲) می‌توان از رابطه ۴ برای تعیین مدول تغییر شکل دینامیکی خاک استفاده کرد.

$$E_d = 2C_s^2(1+\vartheta)\rho \qquad (۴)$$

دراین رابطه:

Cs: سرعت موج برشی

ϑ :نسبت پواسون

ρ : چگالی محیط

E_d: مدول تغییر شکل دینامیکی خاک می‌باشد.

با توجه به تقسیم بندی خاکها براساس سرعت موج برشی توسط آئین نامه ساختمان (خاک طبقه ۳) و نیز داده های حاصل از مهندسین مشاور ساحل سرعت موج برشی برابر ۳۶۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۱۱ پارامترهای ورودی نرم‌افزار برای تحلیل دینامیکی آورده شده است.

جدول ۱۱: پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی در نرم افزار FLAC^{3D}

واحد زمین‌شناسی	مدول برشی (MPa)	مدول بالک (MPa)
ET-1	۱۱۹	۲۶۰
ET-2	۱۱۷/۸	۲۵۷/۳
ET-3	۱۲۱/۶	۲۶۵/۶
ET-5	۱۰۸/۸	۲۳۷/۷

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی صورت گرفته با ماکزیمم تنش مجاز وارد بر پوشش تونل مقایسه و در جدول ۱۲ ارائه شده‌اند. همانطور که از شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشخص است نقاط حاصل از تحلیل دینامیکی صورت گرفته توسط نرم افزار FLAC^{3D} درون نمودار قرار می گیرد که نشان دهنده پایداری پوشش است.

جدول ۱۲: حداکثر تنش برشی بر روی پوشش تونل حاصل از تحلیل دینامیکی

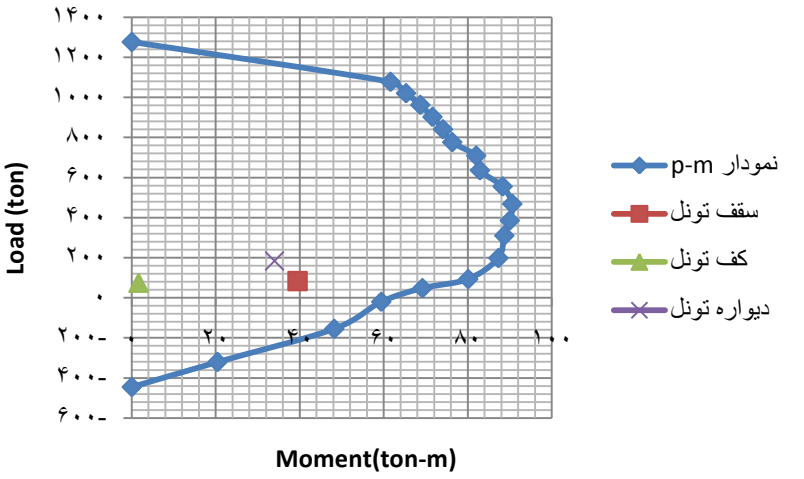
شماره مقطع	متراژ	ماکزیمم تنش برشی	
		محاسبه شده (MPa)	مجاز(MPa)
۱	۲۹۰۰	۷	۸
۲	۴۳۰۰	۶/۶	۸
۳	۱۰۶۰۰	۷/۲	۸

همانطور که مشاهده می شود نسبت ماکزیمم تنش برشی در حالت دینامیکی به حالت استاتیکی در مقطع ۱، ۲/۸ در حالیکه این نسبت در مقطع ۳، ۱/۵ است که نشان دهنده تاثیر زیاد امواج زلزله بر مقطع ۱ که دارای کمترین روباره است می باشد. در هر سه نمودار سقف پایداری کمتری نسبت به دیواره و کف داراست. مقطع شماره ۳ از پایداری کمتری نسبت به سایر مقاطع برخوردار است . همانطور که در عوامل آسیب پذیری سازه‌های زیرزمینی بیان شد یکی از عوامل آسیب پذیری سازه‌های زیرزمینی عمق کم روباره است . مقطع شماره ۱ پایداری کمتری نسبت به مقطع شماره ۲ داراست. این تغییر در مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی را می توان بدلیل بیان کرد که مقطع شماره ۱ دارای روباره کمتری نسبت به مقطع شماره ۲ داراست. نیز در مقطع شماره ۲ تنش برشی داری سرعت افزایش کمتری نسبت مقطع شماره ۱ داراست. مقطع شماره ۳ نیز بدلیل داشتن خاک اطراف ضعیف دارای پایداری کمتری نسبت به سایر مقاطع می باشد. در مقایسه بین سه مقطع می توان نتیجه گرفت که تغییرات ممان خمشی نسبت نیروی محوری بیشتر می باشد. در ضمن همانطور که مشاهده می شود تاثیر امواج زلزله بر روی دیواره ها بیشتر است.

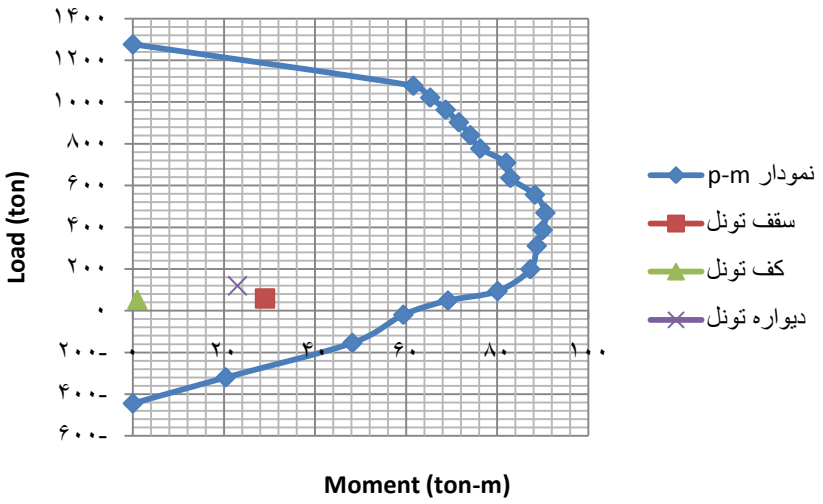
۱۳ نتیجه‌گیری

در این مقاله تحلیل استاتیکی و دینامیکی خط هفت متروی تهران توسط نرم افزار FLAC^{3D} انجام شده است .سه مقطع بحرانی در طول مسیر تونل برای تحلیل انتخاب گردید. مقطع شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب درفاصله۲۹۰۰، ۴۳۰۰ و ۱۰۶۰۰ از استادیوم تختی بعنوان مقاطع بحرانی در نظر گرفته شدند . انتخاب این مقاطع بر اساس عوامل موثر بر آسیب پذیری تونل در اثر زلزله صورت گرفت. قبل از انجام تحلیل ضخامت معادل پوشش بتنی با استفاده از نرم‌افزار section builder محاسبه گردید. ضخامت پوشش بتنی پس

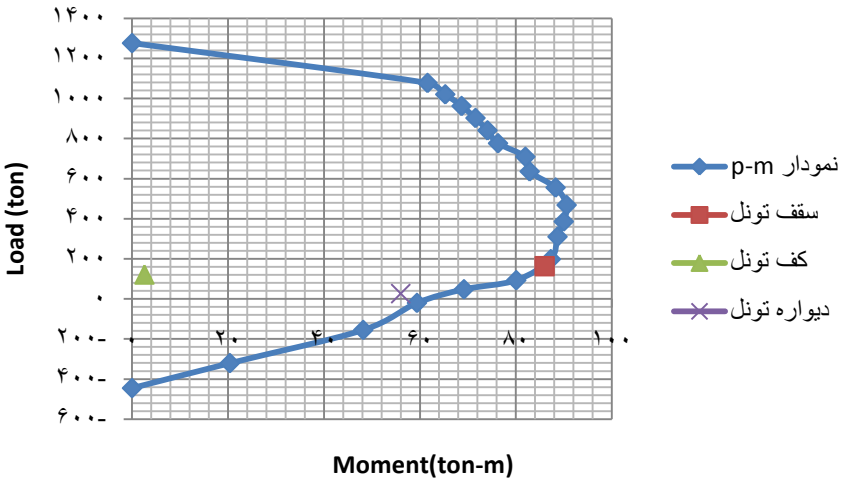
از محاسبه توسط این نرم افزار به مقدار ۸ سانتی‌متر اضافه شد. در نتیجه ضخامت نهایی ۴۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که:



شکل ۱۰: نمودار ممان خمشی-نیروی محوری حاصل از تحلیل دینامیکی مقطع شماره ۱



شکل ۱۱: نمودار ممان خمشی-نیروی محوری حاصل از تحلیل دینامیکی مقطع شماره ۲



شکل ۱۲: نمودار ممان خمشی- نیروی محوری حاصل از تحلیل دینامیکی مقطع شماره ۳

۱- در صورتیکه سیستم فقط تحت تاثیر بارگذاری استاتیکی قرار گیرد میزان ماکزیمم تنش برشی محاسبه شده در پوشش بتنی کمتر از مقدار مجاز آن است. در ضمن در صورتیکه نمودار نیروی محوری – ممان خمشی برای پوشش بتنی رسم گردد، میزان نیروی محوری و ممان خمشی حاصل از مدلسازی عددی در سه نقطه شاهد در سقف، کف و دیواره تونل در داخل نمودار قرار می گیرد که مبین پایداری تونل مترو تحت بارگذاری استاتیکی است.

۲- پس از پایان تحلیل استاتیکی مدل‌های ساخته شده تحت بارگذاری زلزله زنجیران مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفتند. مانند روش استاتیکی تنش برشی و ممان خمشی و نیروی محوری حاصل از تحلیل با مقادیر مجاز مقایسه شدند و نمودارهای نیروی محوری-ممان خمشی هر یک از مقاطع رسم گردیدند. نتایج نشان می‌دهد تونل خط هفت متروی تهران تحت این بارگذاری زلزله پایدار می‌باشد. با توجه به اینکه حفاری تونل آغاز شده است لذا پیشنهاد می گردد وسایل رفتارسنجی نصب گردد تا با استفاده از آنالیز برگشتی نتایج تحلیل استاتیکی مورد بازبینی قرار گیرد و در صورت نیاز به تغییرات در پارامترهای ورودی، تحلیل دینامیکی مجدداً انجام شود . تا از پایداری تونل در اثر بار زلزله اطمینان حاصل شود.

۳- با توجه به اینکه مقطع شماره ۳ که در متراژ ۱۰۶۰۰ واقع شده است دارای خاک اطراف ضعیف‌تری نسبت به سایر مقاطع است، نتایج نشان می‌دهد نسبت به سایر مقاطع از پایداری کمتری برخوردار است و نیاز به در نظر گرفتن تمهیدات نگهداری تکمیلی جهت افزایش پایداری است.

۴- نتایج حاصل از تحلیل روش فرم بسته که توسط مهندسین مشاور ساحل بر روی تونل خط هفت متروی تهران صورت گرفته نیز نشان می دهد این سیستم نگهداری در برابر بارگذاری زلزله پایدار است.

منابع

[1] Gamaneh Kav COSULTING ENGINEERS; 2009; “Supplementary geotechnical studies for Tehran Metro Line 7 (East-West Section) ”, Report No. 5.

[2] SAHEL CONSULTANT ENGINEERS; 2009; “Engineering service for Tehran Metro Line 7 (East-West Section), Engineering geological studies of the tunnel”.

[3] SAHEL CONSULTANT ENGINEERS; 2009; “Engineering service for Tehran Metro Line 7 (East-West Section), Segment Structural seismic Design”.

[4] SAHEL CONSULTANT ENGINEERS; 2009; “Engineering service for Tehran Metro Line 7 (East-West Section), Segment Structural Design”.

[5] Itasca Consulting Group Inc.; 1995; “FLAC3D, Version 3.0: Fast Legrangian Analysis of Continua, User’s Manual”.