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

دوره یازدهم، شماره ۳۳، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۶۵ تا ۷۹
Vol.11, No. 33, 2017, pp65-79

بهینه‌سازی ابعاد میانبر تهویه به روش دویل میانی در تونل راه‌آهن گدوک

سیده گلاله حسینی[۱]، حسن مدنی[۲]، کورش شهریار[۳] ، علی مرتضوی[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد تونلسازی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Golale_hosseini_85@yahoo.com
۲. استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Hmadani@aut.ac.ir
۳. استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ K.shahriar@aut.ac.ir
۴. دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ Ali.mortazavi@aut.ac.ir

(دریافت ۲۸ آذر ۱۳۹۴، پذیرش ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۵)

چکیده

تونل گدوک به طول ۲۸۸۷ متر در مسیر راه‌آهن فیروز کوه به قائم شهر قرار دارد. جنس تونل سنگی، ارتفاع آن ۵/۶ متر، عرضش ۵/۲ متر و سطح مقطع آن ۲۵ متر مربع است. حداکثر ارتفاع روباره تونل ۳۵ متر است. شدت جریان لازم برای تهویه تونل ۴۰۰ متر مکعب در ثانیه محاسبه شده و تنها روش ممکن برای تهویه این تونل، روش دویل میانی است. برای حفر و احداث دویل میانی، ابتدا باید میانبری در مرکز تونل احداث شود تا ضمن عملیات حفر و احداث دویل، مشکلی در رفت و آمد قطارها پیش نیاید. طول این قسمت به‌منظور رسیدن به تنش‌های اولیه در اطراف تونل اصلی برابر با ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به جنس خوب سنگ، ابتدا بهینه‌سازی مقطع میانبر از دیدگاه تهویه برای قطرهای ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ متر بررسی شد و افت فشار مربوط به هر کدام محاسبه و بر این اساس قطر ۳ متر برای میانبر در نظر گرفته شد. به‌منظور تحلیل پایداری، ابتدا هندسه تونل اصلی با ابعاد یاد شده و هندسه میانبر به طول ۱۲ و قطر ۳ متر در نرم‌افزار Rhino ساخته شد و مش‌بندی مدل داخل نرم‌افزار Kubrix انجام و سپس تحلیل پایداری آن به کمک نرم‌افزار FLAC3D انجام گرفت. تقاطع تونل اصلی و میانبر به صورت شیپوری طراحی شد تا از افت فشار اضافی جلوگیری شود. محاسبات عددی انجام شده در نرم‌افزار FLAC3D نشان داد که جابه‌جایی‌ها در محل تقاطع و داخل میانبر در حد ۲ میلی‌متر است که می‌توان میانبر را تقریبا خودپایدار دانست. چون میانبر برای نیازهای تهویه طراحی می‌شود، به‌منظور جلوگیری از افت فشار داخل میانبر باید سطح دیواره‌های آن یک سطح صاف باشد، به همین دلیل سیستم نگهداری مرکب از ۱۵ سانتی‌متر لاینینگ برای سطح داخل میانبر و ۲۰ سانتی متر لاینینگ برای ۲۵ متر از سطح داخلی تونل در اطراف تقاطع در نظر گرفته شد. برای تأیید این موضوع که طراحی سیستم نگهداری برای میانبر در جهت نیازهای تهویه و کاهش افت فشار است، سیستم نگهداری شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر در داخل میانبر بررسی شد و مجددا تغییر شکل‌ها بسیار پایین و در حد میلی‌متر به‌دست آمد. با توجه به جنس خوب سنگ و پایداری در داخل میانبر، گام پیشروی برابر با ۲ متر در نظر گرفته شد تا میانبر در ۶ مرحله حفاری شود.

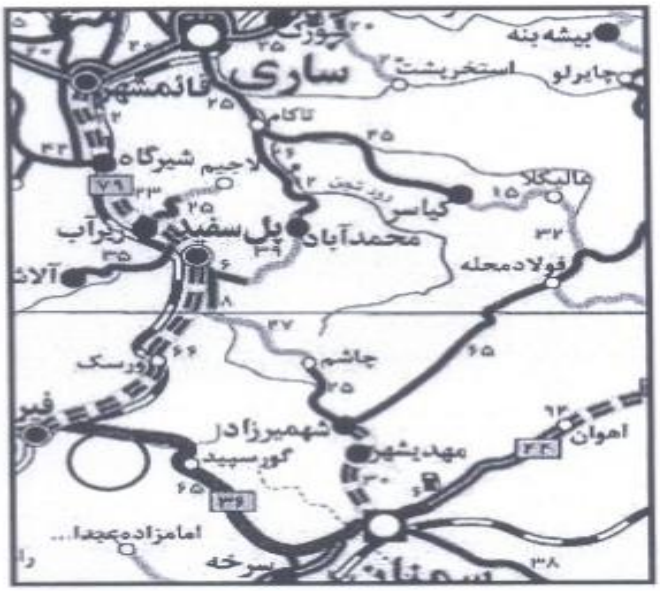
کلمات کلیدی

بهینه‌سازی، میانبر، تهویه، پایداری، تونل گدوک، Rhino، Kubrix، FLAC3D

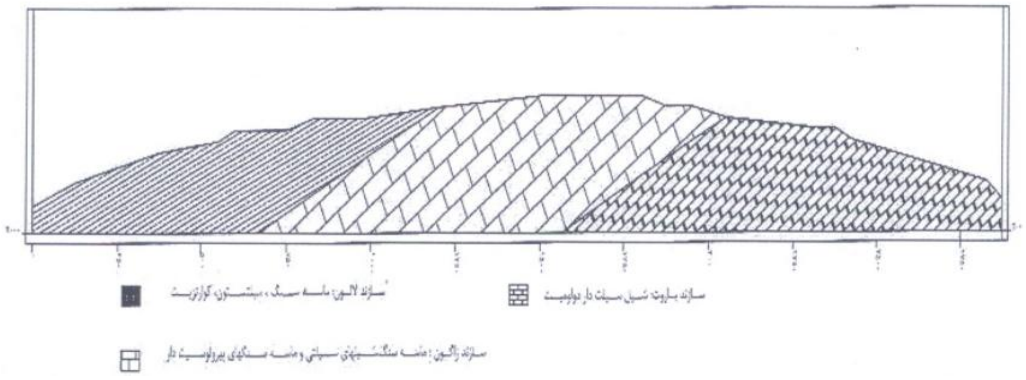
۱- مقدمه

تهویه تونل یکی از مهم‌ترین مسائل در احداث تونل‌ها چه در زمان حفر و چه در زمان بهره‌برداری است. یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات تونل‌ها اعم از تونل‌های معادن، راه، مترو و راه-آهن مساله تهویه آن‌ها ست. با توجه به طویل‌تر شدن تونل‌ها به علت تکنولوژی حفر مکانیزه، تهویه آن‌ها حساسیت و اهمیت بیشتری یافته است. هنگامی که تهویه تونل با مشکل مواجه می-شود چون این تونل ها در حال بهره‌برداری هستند و به دلیل در نظر نگرفتن مکان و فضای کافی برای تهویه طولی و عرضی، باید روشی مناسب برای تهویه این تونل ها طراحی شود [۱]. در تونل‌های در حال بهره‌برداری و قدیمی امکان اجرای سیستم تهویه عرضی یا نیمه عرضی نیست، زیرا این سیستم اجرا بایستی در مرحله احداث تونل پیش‌بینی شود. همچنین به علت محدود بودن فضای تونل‌های راه‌آهن، امکان نصب بادبزن سقفی عملا امکان‌پذیر نیست.

تونل گدوک به طول ۲۸۸۷ متر، بین ایستگاه گدوک و پل سفید در مسیر راه‌آهن شمال واقع شده و تاکنون در مورد تهویه تونل گدوک اقدامی انجام نشده است. محدوده مورد بررسی یک منطقه کوهستانی است. سنگ‌های دربرگیرنده بخش عمده تونل و اطرافش شیل‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای، ماسه سنگ، لای سنگ و شیل‌های آهکی است. موقعیت جغرافیایی، راه‌های دسترسی به تونل گدوک و مقطع زمین‌شناسی برای تونل گدوک در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل گدوک [۲]



شکل ۲: مقطع زمین شناسی در امتداد تونل گدوک [۲]

۲- محاسبات انجام شده برای تهویه تونل گدوک

چون قدم اول در طراحی سیستم تهویه، محاسبه شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل است بنابراین پس از بررسی ضرورت تهویه تونل مورد بحث، شدت جریان هوای لازم از بابت رقیق کردن مونواکسید کربن، اکسیدهای ازت و دوده و زدودن گرما و شدت جریان لازم در مواقع آتش‌سوزی محاسبه و بیش‌ترین آن-ها به عنوان شدت جریان لازم برای تهویه تونل انتخاب شد [۳]. تونل‌های راه‌آهن که از آن‌ها لوکوموتیوهای دیزلی عبور می‌کند برای خارج کردن ذرات خروجی موتور لوکوموتیو از درون تونل به تهویه نیاز دارند تا قطار در معرض هوای نسبتا تمیز قرار گیرد. با اینکه طول تونل‌های راه‌آهن زیاد است ولی تجهیزات تهویه اندکی در این تونل‌ها وجود دارد. برای تونل با طول زیاد، تهویه مکانیکی برای پاکسازی هوای تونل بعد از عبور قطار لازم است. بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی آتش‌سوزی NFPA130 انجام تهویه مکانیکی برای تونل‌های با طول بیش‌تر از ۳۰۵ متر ضروری است که با توجه به طول زیاد تونل گدوک لزوم استفاده از تهویه مکانیکی برای این تونل وجود دارد [۴]. شدت جریان لازم برای تهویه تونل گدوک از نظرهای مختلف در جدول ۱ درج شده است. به‌طوری که دیده می‌شود، بیش‌ترین شدت جریان مربوط به رقیق کردن اکسیدهای ازت در شرایط عادی است، بنابراین اگر این شدت جریان ملاک تهویه قرار گیرد، هوای لازم از سایر نظرها نیز تامین خواهد شد.

.

جدول ۱: شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل گدوک در حالت‌های مختلف [۳]

هدف از تهویه	شرایط عادی	حالت توقف قطار در تونل
رقیق کردن مونواکسید کربن	۱۳/۳۳	۴/۷۱
رقیق کردن اکسیدهای ازت	۴۰۰	۱۴۱/۱۵
رقیق کردن دوده	۴۵/۳۳	۴۳/۷۲
راندن گرمای حاصل از لوکوموتیو	۲۳۹/۰۶	۸۴/۵۳

با به‌کارگیری روش تهویه به کمک دویل یا دویل‌های میانی، طول تونل به بخش‌های کوتاه‌تر تقسیم می‌شود. دویل‌های میانی برای مکش و دمش هوا و در مواردی که امکان آن فراهم باشد، برای هر دو عمل مکش و دمش از یک دویل دو حجره‌ای استفاده می‌شود.

۳- بهینه‌سازی ابعاد میانبر از دیدگاه تهویه

برای حفر و احداث دویل میانی به‌منظور نیازهای تهویه تونل گدوک، ابتدا باید در مرکز تونل میانبری احداث شود، تا ضمن عملیات حفر و احداث دویل، مشکلی در رفت و آمد قطارها پیش نیاید. طول میانبر حتی‌المقدور باید کم باشد تا از افت فشار اضافی جلوگیری به عمل آید. طول این قسمت به منظور رسیدن به حالت تنش‌های اولیه حدود ۳ تا ۴ برابر قطر تونل پیشنهاد می‌شود. بنابراین طول این میانبر را ۱۲ متر در نظر می‌گیریم. سطح مقطع میانبر هر چقدر بیشتر باشد، افت فشار کمتری ایجاد می‌شود ولی به خاطر کوتاه بودن طول آن از مقاطع کمتر می‌توان استفاده کرد. سطح مقطع این بخش به‌منظور عبور راحت واگن‌های حمل و نقل و سهولت رفت و آمد برای عملیات تعمیر و نگهداری است و مقطع آن دایره‌ای پیشنهاد می‌شود. برای کاهش افت فشار در این بخش، سطح دیواره میانبر باید با بتن صاف پوشیده شود. با توجه به مدل‌سازی‌های عددی انجام شده برای میانبر برای تهویه، تونل برای قطرهای ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ متر پایدار و میزان جابه‌جایی‌ها کم است. بنابراین با توجه به این نکته که میانبر برای تهویه استفاده می‌شود، قطر این تونل نباید بسیار کم و بسیار زیاد باشد. کم بودن قطر تونل میانبر، جوابگوی نیازهای تهویه نیست و افزایش قطر تونل میانبر نیز هزینه‌های حفاری بالا و مشکلات نگهداری را در پی خواهد داشت. بنابراین یک تابع هدف برای نیازهای تهویه این تونل در نظر گرفته می‌شود که افت فشار است. افت فشار در تونل میانبر باید کم باشد تا تهویه به درستی انجام شود. سطح مقطع تونل اصلی ۲۵ متر مربع و شدت جریان کل عبوری از آن برابر ۴۰۰ مترمکعب در ثانیه است. طول میانبر برابر با ۱۲ متر در نظر گرفته می‌شود. افت فشار در میانبر شامل افت فشار اصطکاکی و موضعی ناشی از تغییر مقطع است.

افت فشار اصطکاکی: به منظور ایجاد افت فشار کمتر در میانبر، پوشش دیواره‌ها و کف آن را بتن صاف در نظر می‌گیریم. ضریب

افت فشار اصطکاکی را با توجه به جدول ۱.۶، ۴×۱۰^{-۴} در نظر می‌گیریم.

جدول ۲: ضریب اصطکاک برای تونل‌های بزرگ با پوشش بتنی یا آجری [۵]

شرح	ضریب اصطکاک
پوشش بتنی صاف	$(۳-۴)\times۱۰^{-۴}$
پوشش بتنی نسبتا صاف	$(۵-۷)\times۱۰^{-۴}$
آجر کاری ساده	$(۳-۴)\times۱۰^{-۴}$
آجر کاری با اندود	$(۲/۵-۳)\times۱۰^{-۴}$

برای محاسبه افت فشار اصطکاکی، از رابطه کلی افت به شرح زیر استفاده می‌شود [۶]:

(۱)

$$\Delta P = RQ^{۲} = \alpha \frac{LP}{S^{۳}} \times Q^{۲}$$

که در آن:

α: ضریب اصطکاک

ΔP: افت فشار بر حسب میلی‌متر آب

L: طول مسیر بر حسب متر

S: سطح مقطع بر حسب متر مربع

P: محیط بر حسب متر

Q: شدت جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه

افت فشار موضعی: افت فشار موضعی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۶]:

(۲)

$$\Delta P_l = \xi\gamma \frac{V^{۲}}{۲g} = \xi\gamma \frac{Q^{۲}}{۲gS^{۲}} = R_l Q^{۲}$$

که در آن:

ξ: ضریب افت موضعی

γ: وزن مخصوص هوا که اغلب برابر با ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود.

V: سرعت خروج هوا

افت فشار موضعی در مسیر میانبر شامل افت فشار موضعی ناشی از کاهش ناگهانی مقطع در ورود هوا از داخل تونل اصلی به داخل میانبر است. برای محاسبه ضریب افت موضعی از جدول زیر استفاده می‌کنیم:

جدول ۳: ضریب افت برای کاهش ناگهانی مقطع [۵]

نسبت مقطع جدید به مقطع اولیه	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۵
ضریب افت	۰/۴۵	۰/۴	۰/۳۱	۰/۲۵

افت فشار اصطکاکی، موضعی و کلی را به صورت جدول ۴ به دست می‌آوریم. بنابراین با توجه به محاسبات انجام شده مناسب-ترین افت فشار مربوط به قطر۳ متر است. افت فشار قطرهای ۳/۵ و ۴ متر نزدیک به هم است و در محل تقاطع نیز با افزایش قطر تونل میانبر با توجه به شیپوری بودن مقطع روبه‌رو هستیم. بنابراین قطر ۳ متر نیز افت فشاری تقریبا برابر با قطرهای ۳/۵ و ۴ متر ایجاد می‌کند. حالت شیپوری تقاطع، میزان قطر میانبر را در محل تقاطع افزایش می‌دهد که در محل تقاطع این قطر به بالاتر از ۳ متر می‌رسد (شکل ۷). در قطرهای بالاتر به دلیل افزایش هزینه‌های مربوط به حفاری و نگهداری این مقطع‌ها، قطر ۳ متر برای میانبر تونل از نظر تهویه، پایداری، هزینه‌های حفاری و مسائل اجرایی بهینه در نظر گرفته شده است.

۴- محاسبات عددی میانبر

روش متداول تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در تونل‌ها استفاده از فرض کرنش مستوی در حالت دو بعدی است که در آن مقاطع مختلف بررسی می‌شوند. این مفروضات در شرایطی که تونل و مقاطع مختلف آن تحت حوزه تنش‌هایی غیر از حدود خود تونل نباشد صادق است، ولی وقتی دو تونل همدیگر را قطع می‌کنند یا در طول تونل شفت تهویه ایجاد می‌شود، طبعا وضعیت تنش

حالت سه بعدی دارد و استفاده از مفروضات کرنش مسطح صادق نیست. در این تحقیق تحلیل تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در محل تقاطع با استفاده از نرم افزار FLAC3D انجام شده است. اولین گام در اجرای یک مدل ساخت هندسه است. پس از ساخت هندسه، باید یک مدل رفتاری مناسب به ماده آن اختصاص یابد. مدل‌های رفتاری متفاوتی در این نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در مسائل ژئوتکنیک و مکانیک سنگ، مدل موهر کولمب است. سپس شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شده و مدل برای رسیدن به تعادل اجرا می-شود. شرایط مرزی عبارت از تعیین وضعیت جابه‌جایی و یا تنش-ها در مرز مدل است که با اعمال جابه‌جایی صفر در گره‌های مرزی این کار انجام می‌گیرد. برای این منظور در تحلیل سه بعدی پروژه مذکور جابه‌جایی گره‌های مرزی در سطوح جانبی مدل در جهات x یا y و در کف مدل بسته شده‌اند. سطح بالایی مدل همان سطح زمین است و مرز بالایی مدل به‌صورت آزاد در نظر گرفته می‌شود سطوح جانبی به صورت غلتکی بسته می‌شود و کف ثابت است. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای طراحی مدل در نرم‌افزار FLAC3D در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۴: محاسبات مربوط به بهینه‌سازی قطر میانبر از دیدگاه تهویه برای قطرهای متفاوت [۷]

قطر میانبر m	محیط میانبر m	مساحت میانبر m^2	افت فشار اصطکاکی mmH_2o	ضریب افت موضعی	افت فشار موضعی mmH_2o	افت فشار کلی mmH_2o
۲/۵	۷/۰۸	۴/۹۱	۵۰/۹۳۲	۰/۴	۱۶۲/۳۷	۲۱۳/۳۰۲
۳	۹/۴۲	۷/۰۶۵	۲۰/۵۳	۰/۳۵۵	۶۹/۶	۹۰/۱۳
۳/۵	۱۰/۹۹	۹/۶۱۶	۹/۴۹	۰/۳۱	۳۲/۸۱	۴۲/۳
۴	۱۲/۵۶	۱۲/۵۶	۴/۸۶۸	۰/۲۵	۱۵/۵۰۸	۲۰/۳۷۶

جدول ۵: پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای طراحی [۲]

واحد سنگی	چگالی	C (kpa)	Degree	(Mpa)	Edm (Gpa)
سازندهای باروت و زاگون	۲/۶	۲۶۰(۲۵۰)	۳۲(۳۰)	۴/۷	۲/۳

با توجه به نوع مدل از بارگذاری ثقلی استفاده شده است. چون تنها نیروی وزن در پایداری تونل‌ها دخالت دارد و تونل در عمق کمی قرار دارد، بنابراین شرایط اولیه به‌صورت تنش‌های ثقلی در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب مدل رفتاری مناسب برای تحلیل سازه‌ها اهمیت زیادی دارد زیرا رفتار سازه به میزان قابل توجهی تابع این انتخاب است. به‌طور کلی مصالحی که در حدود پروژه وجود دارد شامل سنگ و پوشش نگهداری است. در پروژه حاضر برای سنگ منطقه از معیار موهر- کلمب (گروه مدل پلاستیک) استفاده شده است زیرا سنگ تمام پارامترهای موهر- کلمب را دارد. مدل موهر- کلمب، مدل رایجی برای نشان دادن گسیختگی برشی در خاک و سنگ است. در این مدل تنش تسلیم تابع تنش‌های اصلی ماکزیمم و مینیمم است. پارامترهای لازم برای این مدل چسپندگی و زاویه اصطکاک است.

۴-۱- هندسه مدل

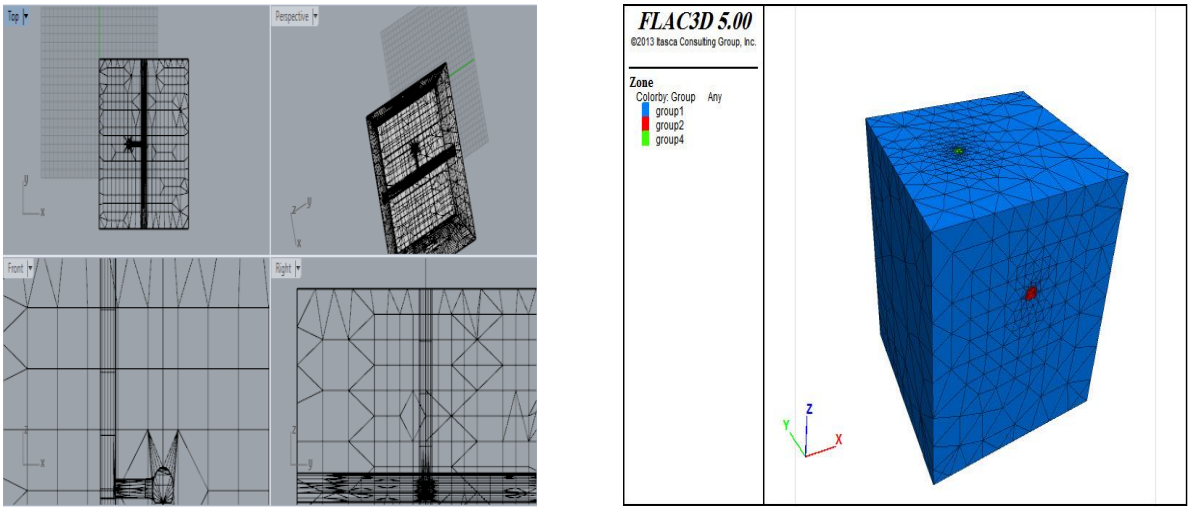
با توجه به اینکه هندسه مدل شامل تونل اصلی و میانبر و شفت تهویه است، بنابراین هندسه بسیار پیچیده است. ابعاد تونل اصلی و شفت تهویه مشخص و هدف به‌صورت میانبر از نظر ابعاد و قطر میانبر و طول آن است. مدل‌سازی در حالت الاستوپلاستیک انجام شده است. ارتفاع روباره از مرکز تونل برابر با ۳۵ متر و گام حفاری برای تونل در نظر گرفته نشده است و به‌صورت یک مرحله‌ای این کار انجام می‌شود زیرا تونل از قبل حفاری شده و در حال بهره‌برداری است، همچنین با توجه به هندسه ساخته شده مدل، طول تونل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد که اگر گام حفاری یک یا دو متر برای آن تعریف شود محاسبات و زمان

انجام کار بسیار طولانی می‌شود. با توجه به منحنی‌های جابه-جایی، تغییرات زیاد قابل ملاحظه نیست بنابراین حفاری تونل اصلی در این مدل به‌صورت یک مرحله‌ای درنظر گرفته شد، گام حفاری برای میانبر برابر با ۲ متر و در ۶ مرحله حفاری آن انجام شده است. با توجه به پیچیده بودن هندسه مدل و وجود سه حفریه در داخل هندسه، مدل در داخل نرم‌افزار Rhino ساخته شد سپس این مدل با فرمت stl ذخیره شده و جهت مش بندی به داخل نرم‌افزار Kubrix فراخوانی شد. در داخل نرم‌افزار Kubrix مش‌های مدل به صورت هرمی درنظر گرفته شد زیرا مدل در حالت استاتیکی است و خزش در مدل مشاهده نمی‌شود. محاسبات برای مش‌بندی به‌صورت مکعبی هم انجام شد که چون جواب‌ها با هم برابر هستند مش‌بندی را به صورت هرمی در نظر گرفته می‌شود. آهنگ افزایش ابعاد مش‌ها از اطراف حفاری به خارج برابر با ۱/۰۵ تعریف می‌شود. در مرحله بعد خروجی نرم‌افزار Kubrix با فرمت flac3d ذخیره و به داخل نرم افزار FLAC3D فراخوانی شد.

نرم‌افزار Rhino یک نرم‌افزار طراحی سه بعدی و یا به عبارت بهتر نرم‌افزار طراحی صنعتی است. هندسه مدل به دلیل پیچیده بودن در نرم‌افزار Rhino ساخته شد و پس از ورود هندسه ساخته شده به داخل نرم‌افزار با اعمال شرایط، مورد تحلیل قرار گرفت [۸].

در شکل‌های۳، ۴و ۵ نمایش مدل ساخته شده در نرم‌افزار راینو و در داخل نرم‌افزار FLAC3D نشان داده شده است

.

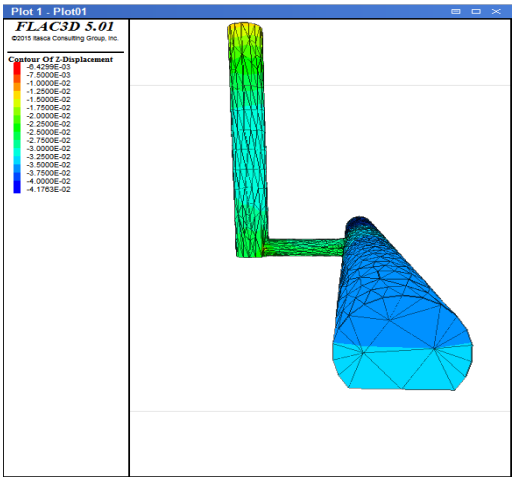


شکل ۳: هندسه مدل در نرم‌افزار FLAC3D و Rhino

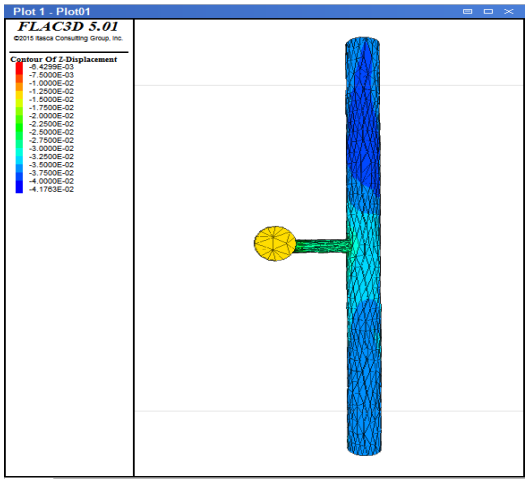
در این تونل با استفاده از روابط حاکم بین تنش‌های افقی (σ_{xx}، σ_{yy}) و تنش قائم (σ_{zz}) و ضریب تنش منطقه، مقادیر تنش محاسبه شد. مدل رفتاری موهر- کلمب برای ماده منظور و شتاب جاذبه زمین نیز $۹/۸\ m/s^{۲}$ در نظر گرفته شد. مقادیر تنش‌های افقی و قائم به صورت زیر به‌دست آمد:

$$\sigma_{zz}=\sigma_v=\rho gh=۲۶۰۰\times۹/۸\times۳۵=۸۹۱۸۰۰pa=۰/۸۹۳e^{۶}\ pa$$
$$\sigma_{xx}=k\sigma_v=k\rho gh=۰/۷\times۲۶۰۰\times۹/۸\times۳۵=۶۲۵۰۰۰pa=۰/۶۲۵e^{۶}\ pa$$
$$\sigma_{yy}=k\sigma_v=k\rho gh=۰/۷\times۲۶۰۰\times۹/۸\times۳۵=۶۲۵۰۰۰pa=۰/۶۲۵e^{۶}\ pa$$

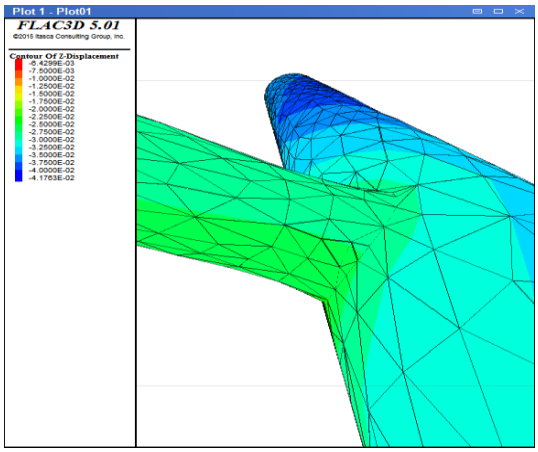
مقطع تونل اصلی به‌صورت نعل اسبی و میانبر تهویه به‌صورت دایره است. چون احداث این میانبر به‌منظور تهویه است بنابراین باید از افت فشار اضافی جلوگیری شود. به همین دلیل محل تقاطع تونل اصلی با میانبر به‌صورت شیپوری در نظر گرفته شد (شکل ۶). تحلیل مدل به صورت استاتیکی انجام شد که نسبت تغییر انرژی جنبشی در الگو به مقدار ناچیزی برسد. این کار با میرا کردن معادلات حرکت انجام می‌گیرد. در مرحله حل استاتیکی، الگو در شرایط تعادل نیرویی یا در یک حالت جریان یکنواخت خواهد بود.



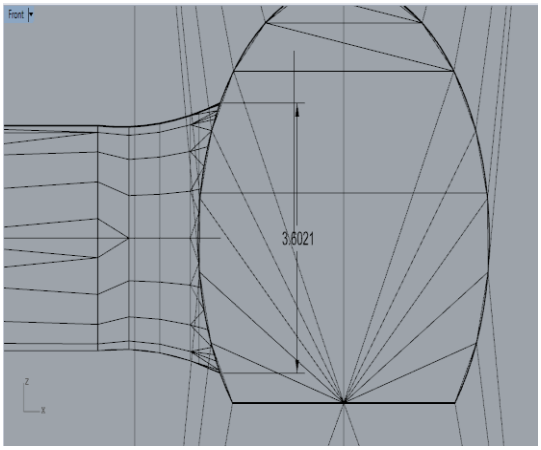
شکل ۴: مدل‌سازی انجام شده از تونل و میانبر و شفت تهویه (دید از روبه‌رو)



شکل ۵: مدل‌سازی انجام شده از تونل و میانبر و شفت تهویه (دید از بالا)

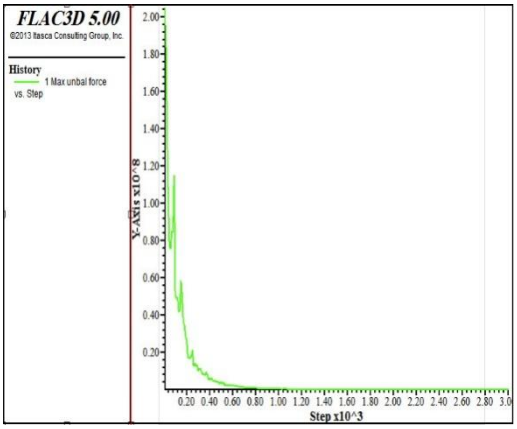


شکل ۶: محل تقاطع تونل اصلی و میانبر تهویه به صورت شیپوری

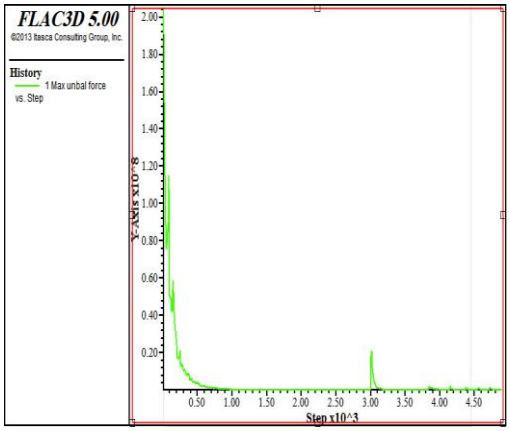


شکل ۷: قطر میانبر در محل تقاطع تونل اصلی و میانبر

پس از اینکه شرایط مرزی و اولیه به مدل اعمال شد، نوبت به اجرای برنامه می‌رسد. هدف از اجرای برنامه اجازه دادن به تنش-های اعمالی (در اثر وزن یا جابه‌جایی) در مدل است، تا عمل کنند و تأثیر این تنش‌ها روی مدل بررسی شود. به‌منظور بررسی وضعیت مدل عددی و اینکه آیا این مدل پس از اجرا وضعیت تعادل دارد یا جریان پلاستیک در آن اتفاق افتاده است، می‌توان از یک سری شاخص‌ها از قبیل نیروی نامتعادل، سرعت و شاخص‌های پلاستیک استفاده کرد. در وضعیت تعادل یا جریان پلاستیک جمع جبری نیروهای وارد بر گره برابر صفر است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که این نیروها در شرایط بیان‌شده در حالت تعادل قرار دارند. در هنگام اجرای تحلیل و اجرای مدل، حداکثر نیروی نامتعادل در کل شبکه محاسبه می‌شود. شکل ۸ وضعیت نیروی نامتعادل را در شرایط اولیه نشان می‌دهد. نسبت نیروهای نامتعادل حداکثر بر حسب درصد بیان می‌شود که مقدار آن هرگز به صفر نمی‌رسد ولی به سمت صفر میل می‌کند. شکل‌های ۸ و ۹ وضعیت نیروهای نامتعادل را بعد از حفر کامل تونل و میانبر، نشان می‌دهد. از روی این نمودارها می‌توان به تعادل رسیدن نیروهای داخلی را در مراحل مختلف مشاهده کرد.

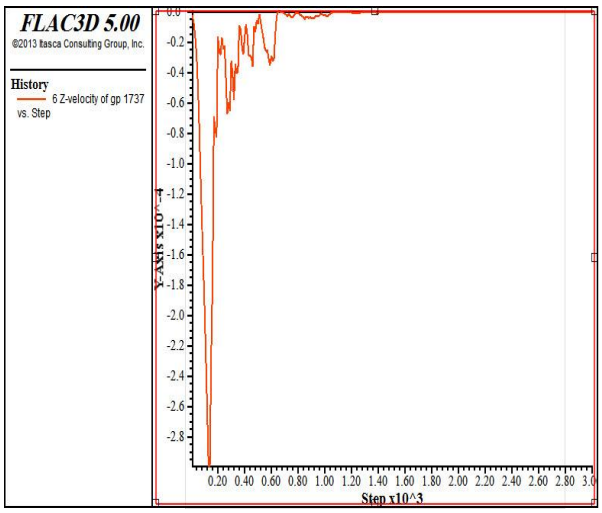


شکل ۸: نمودار نیروی نامتعادل- چرخه مربوط به شرایط اولیه.

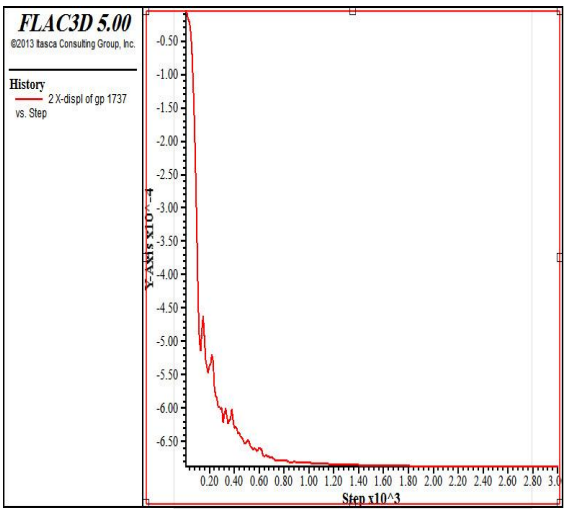


شکل ۹: نمودار نیروی نامتعادل- چرخه مربوط به حفاری تونل اصلی و میانبر

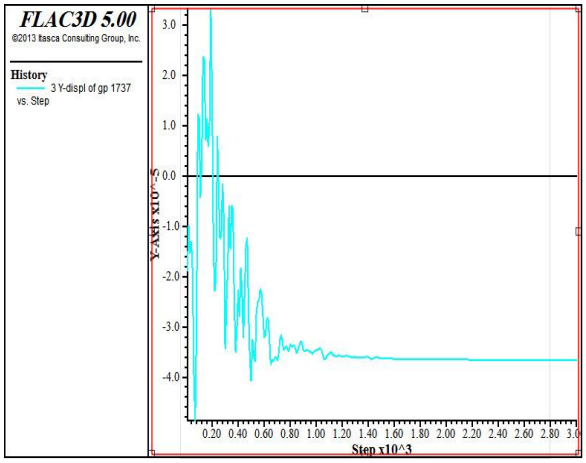
در جهات مختلف می‌توان تغییرات سرعت را به صورت نمودار مشاهده کرد. شرایط تعادل زمانی حاصل می‌شود که انتهای نمودار سرعت- زمان افقی شود. اگر قسمت انتهایی نمودار به صورت ثابت باشد و به مقدار غیر صفر همگرا شود، در این حالت می‌توان گفت که جریان پلاستیک اتفاق افتاده است. اگر قسمت انتهایی نمودار در مقایسه با مقدار اولیه سرعت، تقریبا به صفر همگرا شود، در چنین شرایطی تعادل ایجاد شده است. همانند نیروی نامتعادل، هیچ وقت سرعت صفر نمی‌شود بلکه به سمت صفر میل می‌کند. گاه بردارهای سرعت به طور تصادفی با بزرگی‌های متفاوت هم در جهت یافتگی و هم در اندازه دیده می‌شوند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که تغییرات نیروی گرهی از دقت رایانه که شش رقم اعشار است، بیشتر شود. در این حالت این بی‌نظمی دلالت بر وضعیت تعادل دارد نه جریان پلاستیک. اگر بردارهای سرعت در یک میدان برداری الگوی منظم و مقادیر بزرگی داشته باشند، در این حالت یا جریان پلاستیک در مدل اتفاق افتاده است یا سیستم در حال تعدیل الاستیک مثل میرا کردن نوسانات الاستیک است. در تمامی محدوده مدل‌سازی شده می‌توان سرعت در تمام گره‌ها را به‌دست آورد. پس از تهیه پلات از سرعت‌ها، چنانچه نمودار سرعت یک مقدار ثابت را نشان دهد و به یک حالت افقی برسد بیان‌گر حالت تعادل است. به‌عبارت دیگر اگر این مقدار سرعت نسبت به مقادیر اولیه به سمت صفر میل کرده باشد، می‌توان گفت که تعادل رخ داده است ولی اگر نمودار تغییرات سرعت به یک مقدار غیر صفر میل کند این وضعیت ممکن است بیانگر رخ دادن حالت پلاستیک باشد. مواج بودن تغییرات سرعت نشان‌دهنده حالت گذر برای رسیدن به تعادل است و باید گام‌های زمانی بیشتری اجرا شود یا این‌که مدل به درستی شناخته نشده است و هرگز به تعادل نخواهد رسید. با توجه به شکل ۱۰ پس از حل مدل سرعت به صفر رسیده و تعادل اتفاق افتاده است. مجموع این رفتارها بیانگر این است که مدل به درستی به تعادل رسیده است. برای مدلی که تحت شرایط مرزی و اولیه حل می‌شود، تغییرات جابه‌جایی باید به صفر یا یک مقدار ثابت میل کند. تغییرات جابه‌جایی در جهت X، Y و Z برای سقف تونل اصلی و در مرحله اولیه در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



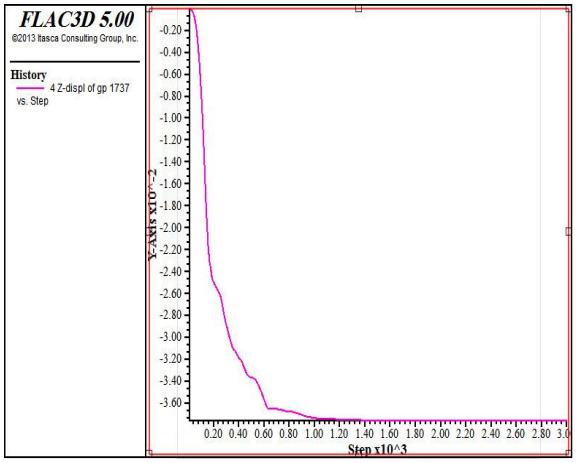
شکل ۱۰: تغییرات سرعت در جهت Z برای سقف تونل اصلی



شکل ۱۱: تغییرات جابه‌جایی در جهت X برای سقف تونل اصلی

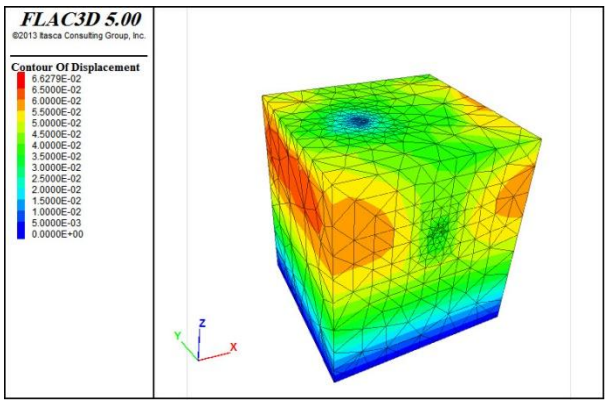


شکل ۱۲: تغییرات جابه‌جایی در جهت Y برای سقف تونل اصلی

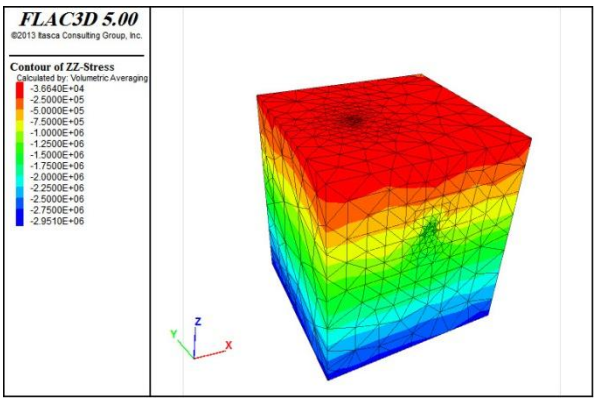


شکل ۱۳: تغییرات جابه‌جایی در جهت Z برای سقف تونل اصلی

کنتور تغییرات جابه‌جایی بعد از به تعادل رسیدن مدل در شکل ۱۴ و کنتور تغییرات تنش در داخل مدل و قبل از حفاری در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



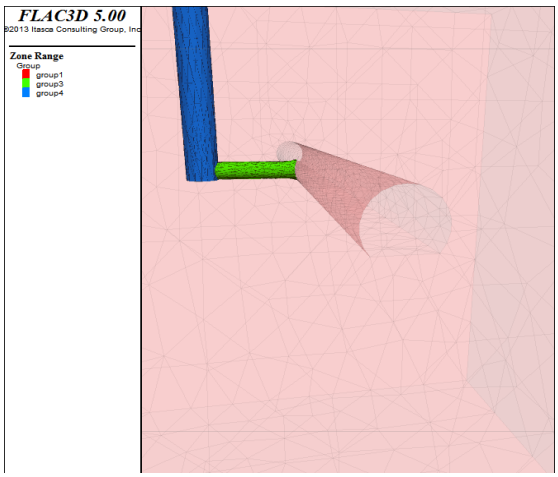
شکل ۱۴: کنتور تغییرات جابه‌جایی



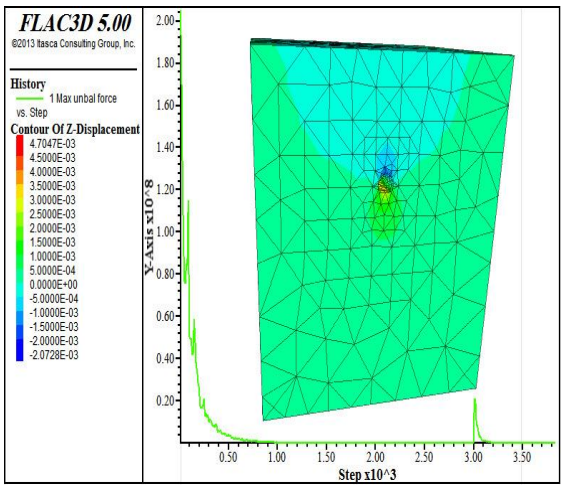
شکل ۱۵: تنش در جهت Z

حال مدل ساخته شده برای ایجاد تغییراتی مانند حفاری آماده است. اکنون تونل اصلی حفاری شده و تغییرات تنش و جابه-جایی به‌صورت زیر مشاهده می‌شود. در این مرحله سعی می‌شود با الگو گرفتن از آن‌چه در واقعیت اتفاق می‌افتد شرایط مدل به واقعیت نزدیک‌تر شود. در حفر تونل باید این واقعیت را در نظر گرفت که قبل از حفر تونل ، زمین در حال تعادل است و حفر تونل باعث ایجاد یک سری اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها خواهد شد. با توجه به اینکه تا این مرحله شرایط مرزی و تنش‌های برجا در مدل اعمال شده‌اند، لازم است مدل عددی قبل از حفر تونل حل شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند و همچنین قبل از ایجاد هر نوع تغییرات از قبیل حفاری، لازم است جابه‌جایی‌ها صفر شوند تا شرایط واقعی قبل از حفر تونل منظور شود. بنابراین برای حفر مدل ابتدا جابه‌جایی‌ها و سرعت‌هایی که در اثر رسیدن مدل به تعادل به گره‌ها تحمیل شده است صفر شده و سپس مدل حفر می‌شود. با استفاده از دستور solve، نرم‌افزار به طور پیش فرض تعادل نیروهای مکانیکی مدل را بررسی می‌کند. حالت تعادل زمانی به‌دست می‌آید که نسبت بزرگی ماکزیمم نیروی نامتعادل برای تمامی گره‌ها در مدل تقسیم بر میانگین بزرگی نیروی مکانیکی به کار بسته شده برای تمامی گره‌ها در مدل به کمتر از 1×10^{-5} برسد. توجه شود که تعادل برای گره‌ها بر اثر تمامی نیروهای به کار برده شده وارد بر گره‌ها از جمله نیروهای داخلی و نیروهای خارجی است. استفاده از این نسبت یک ویژگی محسوب می‌شود زیرا باعث می‌شود این مقدار به ابعاد وابسته نباشد. هندسه مدل، نمودار نیروهای نامتعادل و کنتور تغییرات جابه‌جایی بعد از حفر تونل اصلی در شکل ۱۶ و ۱۷و نمودار نیروهای نامتعادل بعد از حفر ۶ گام حفاری برای میانبر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. سیستم نگهداری برای تونل اصلی برابر با ۲۰ سانتی متر لاینینگ (شکل ۱۹) برای ۲۵ متر از طول تونل در حوالی محل تقاطع به‌دلیل رساندن جابه‌جایی‌ها به حداقل و افزایش ضریب اطمینان و سیستم نگهداری تونل میانبر برابر با ۱۵ سانتی‌متر لاینینگ برای ایجاد یک سطح صاف برای نیازهای تهویه و کاهش افت فشار در شکل ۲۰ نشان داده شده است. تغییرات جابه‌جایی سقف تونل در گام آخر و تغییرات جابه‌جایی در جهت Z که در محل تقاطع مقطع زده شد و در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۳ تغییرات جابه‌جایی در محل تقاطع تونل اصلی و میانبر برابر با ۲ میلی‌متر است که یک جابه‌جایی بسیار کم و قابل قبول و مدل پایدار است. کنتور تغییرات تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی و برش از بغل در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ و کنتور تغییرات جابه‌جایی در حوالی محل تقاطع در شکل های ۲۶، ۲۷و ۲۸ نشان داده شده است. این شکل‌ها پایداری تونل را در محل تقاطع نشان می‌دهد.

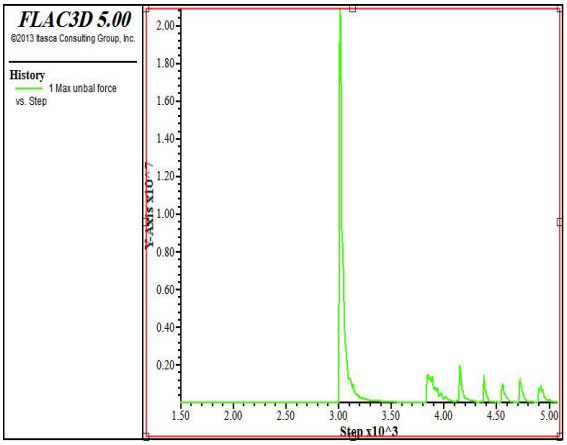
برای تایید مطالب یاد شده داخل میانبر با استفاده از ۵ سانتی متر شاتکریت، نگهداری شده است که در این حالت هم مدل به پایداری رسیده و اجرای سیستم نگهداری فقط برای ایجاد یک سطح صاف در داخل میانبر برای تهویه بهتر است. اما به این دلیل که شاتکریت به‌صورت پاششی است و مقداری افت فشار آن نسبت به لاینینگ بیشتر است بنابراین سیستم نگهداری با استفاده از لاینینگ توصیه می‌شود. نمودار نیروهای نامتعادل، تغییرات جابه‌جایی در جهت Z برای سقف تونل اصلی، تغییرات سرعت در جهت Z برای سقف تونل اصلی، کنتور تغییرات جابه-جایی کل و کنتور تغییرات جابه‌جایی در جهت Z، کنتورهای تنش در جهت محور مختصاتی Z، نمودار نیروی نامتعادل بعد از حفر تونل و سیستم نگهداری برای تونل اصلی و میانبر در شکل-های ۲۹ تا ۳۶ برای نگهداری به میزان ۵ سانتی متر شاتکریت در میانبر آورده شده است.



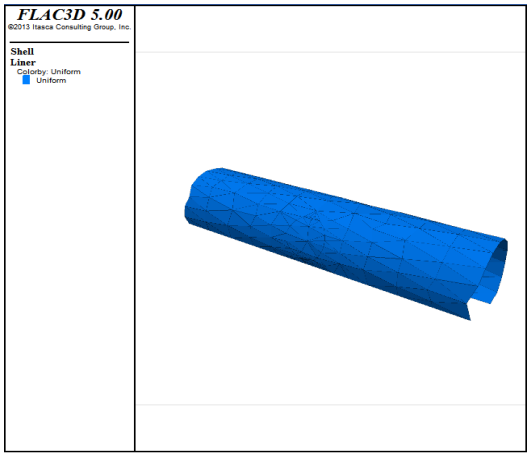
شکل ۱۶: نمودار نیروی نامتعادل و جابه‌جایی در جهت Z



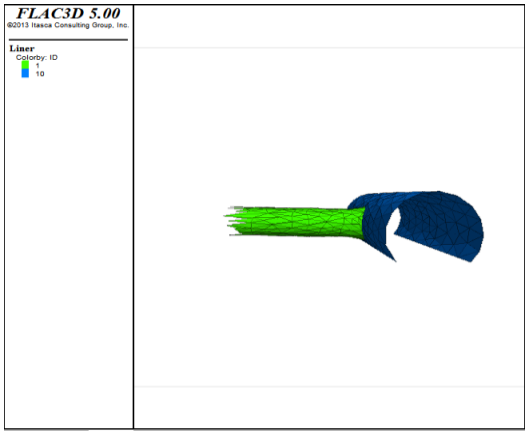
شکل ۱۷: نمودار نیروی نامتعادل و جابه‌جایی در جهت Z



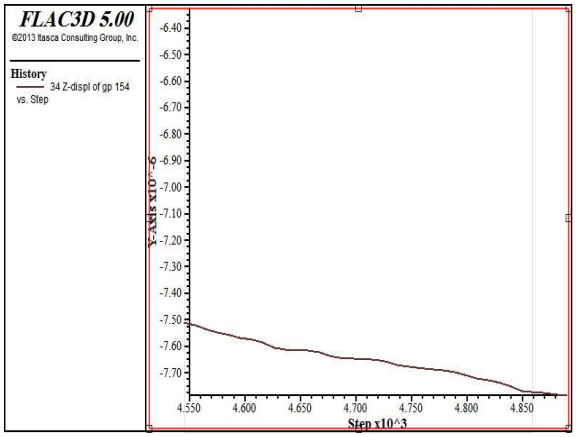
شکل ۱۸: نیروهای نامتعادل بعد از حفاری تونل اصلی و میانبر تهویه



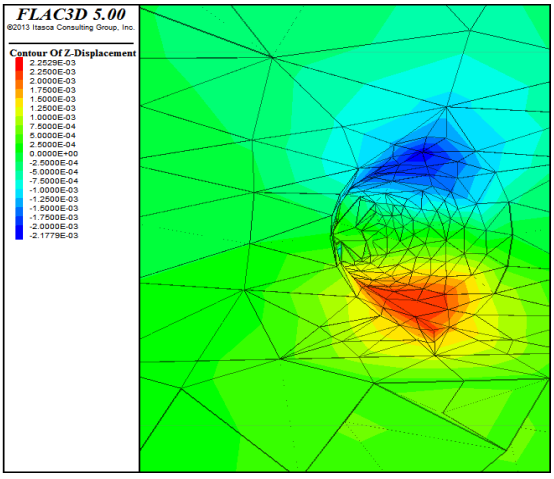
شکل ۱۹: سیستم نگهداری برای تونل اصلی



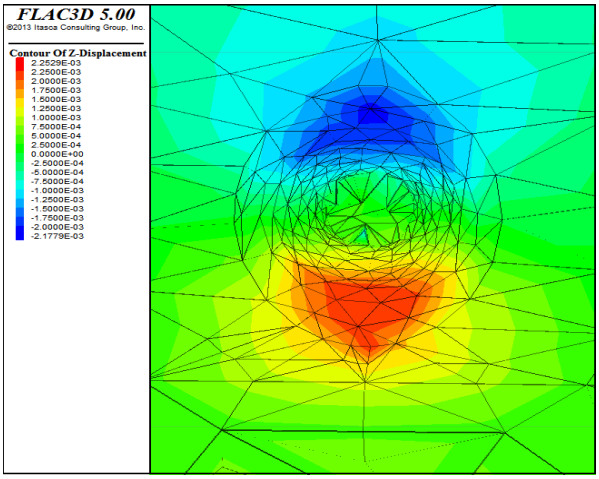
شکل ۲۰: سیستم نگهداری برای تونل اصلی و میانبر



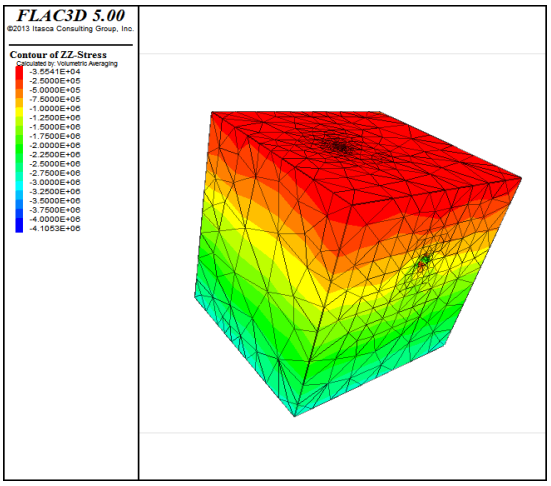
شکل ۲۱: تغییرات جابه‌جایی در سقف تونل در گام آخر



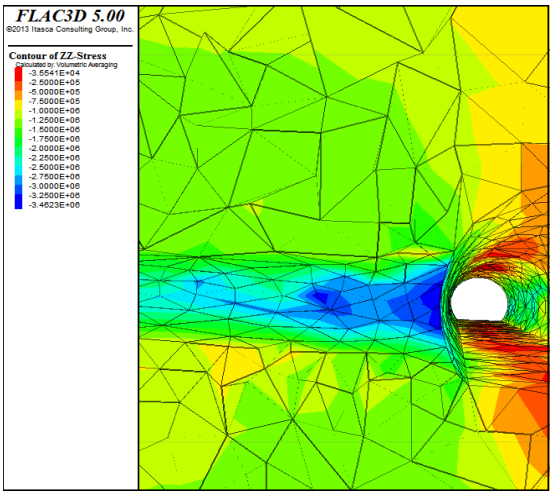
شکل ۲۲: تغییرات جابه‌جایی در جهت Z دید از بغل بعد از برش



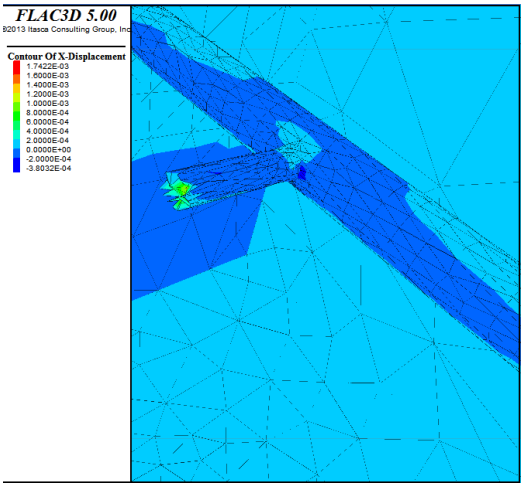
شکل ۲۳: تغییرات جابه‌جایی در جهت Z، مقطع X در محل دویل میانی



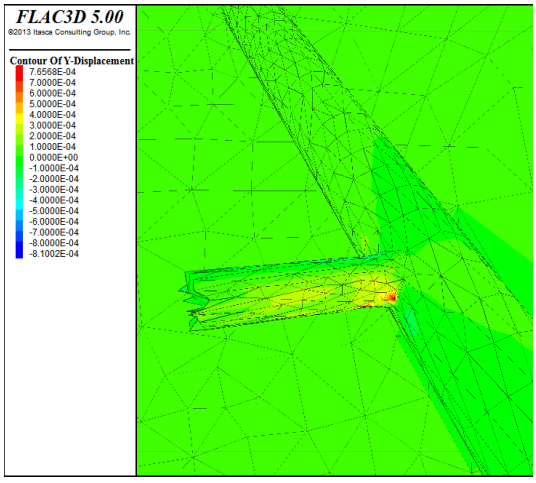
شکل ۲۴: کنتورتغییرات تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی



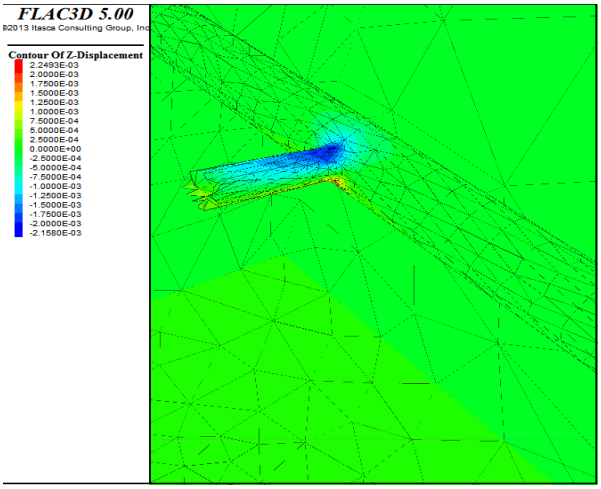
شکل ۲۵: کنتور تغییرات تنش در جهت ZZ و مقطع در جهت Y بعد از حفر دویل میانی



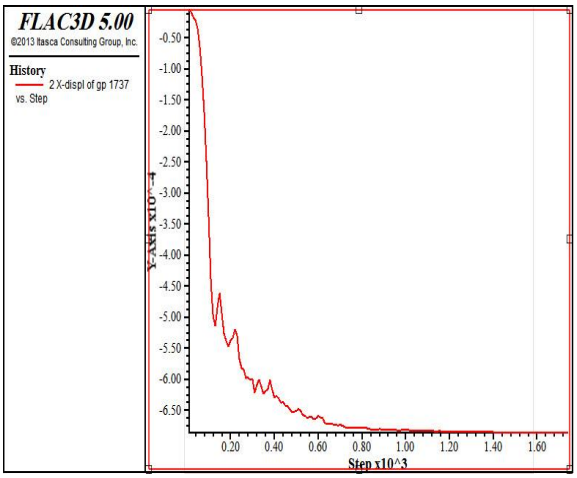
شکل ۲۶: کنتورتغییرات تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی



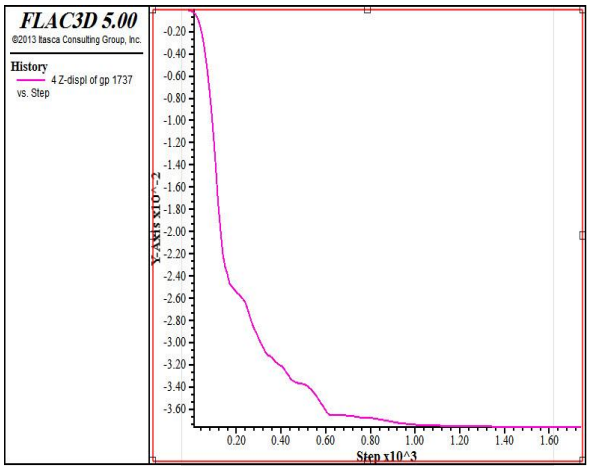
شکل ۲۷: کنتورتغییرات تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی



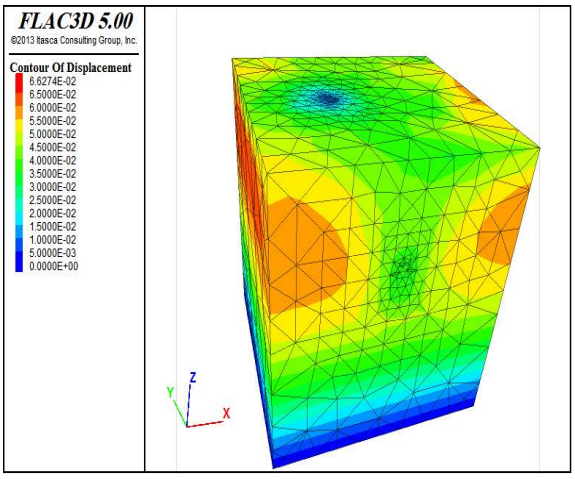
شکل ۲۸: کنتورتغییرات تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی



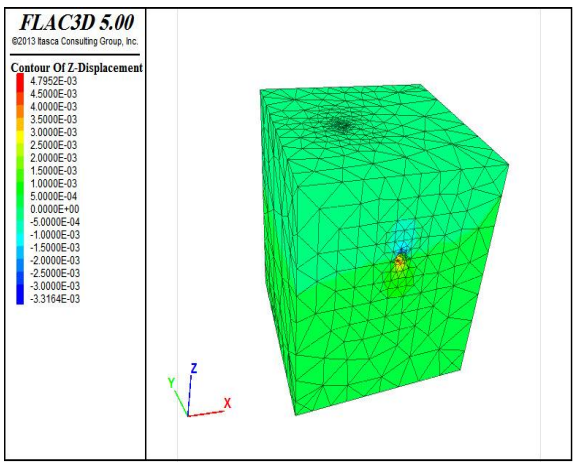
شکل ۲۹: نمودار نیروی نامتعادل



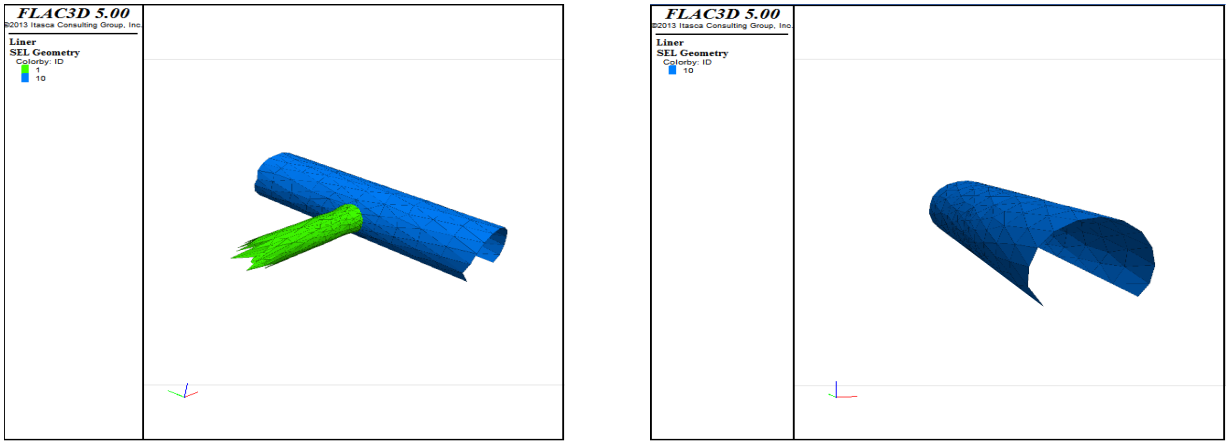
شکل۳۰: تغییرات جابه‌جایی Z برای سقف تونل اصلی



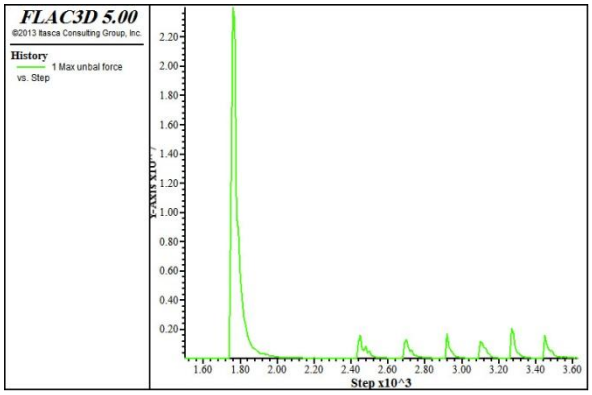
شکل ۳۱: کنتور تغییرات جابه‌جایی کل



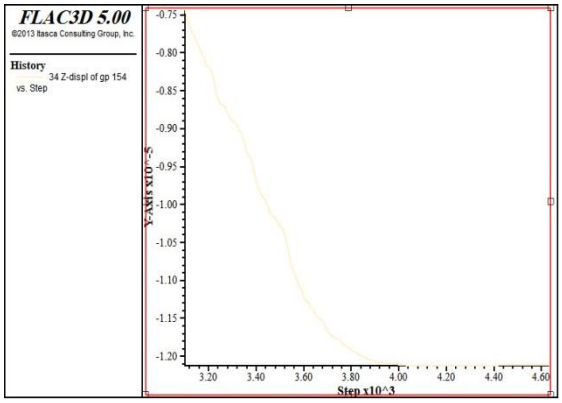
شکل ۳۲: کنتور تغییرات جابه‌جایی در جهت Z بعد از حفر تونل اصلی



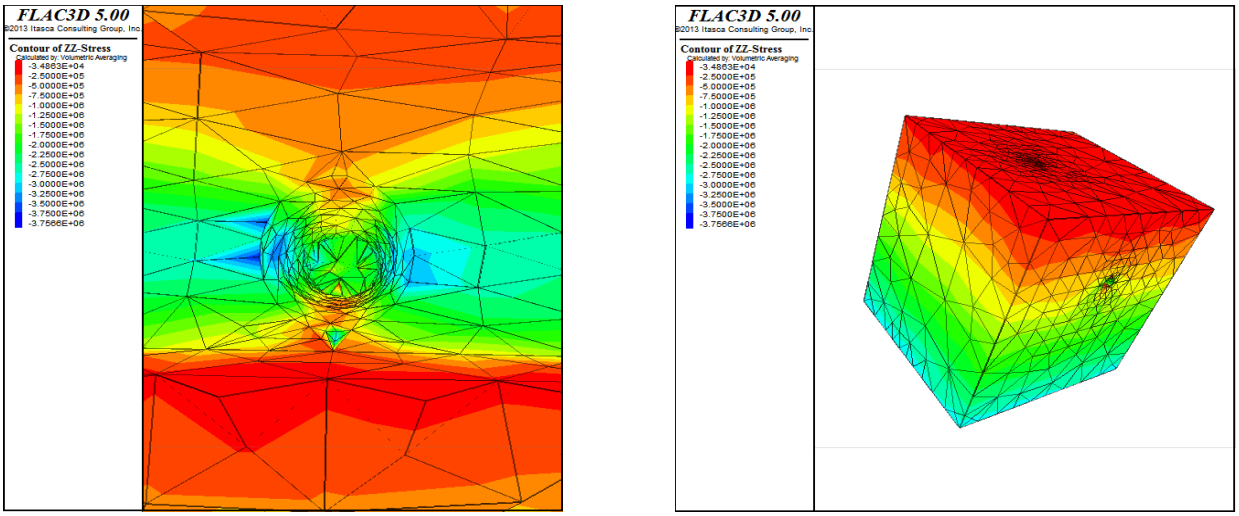
شکل ۳۳: سیستم نگهداری برای تونل اصلی و میانبر



شکل ۳۴: نیروهای نامتعادل بعد از حفاری تونل اصلی و میانبر تهویه در ۶ گام حفاری ۲ متری



شکل ۳۵: تغییرات جابه‌جایی در سقف تونل در گام آخر



شکل ۳۶: تنش در جهت Z بعد از حفر دویل میانی (دید از روبه‌رو و مقطع در جهت X)

۵- نتیجه‌گیری

برای تهویه تونل گدوک روش دویل میانی پیشنهاد شده است. برای حفر و احداث دویل میانی، ابتدا باید در مرکز تونل دویلی احداث شود تا ضمن عملیات حفر و احداث دویل، مشکلی در رفت و آمد قطارها پیش نیاید. طول این دویل حتی‌المقدور باید کم باشد تا از افت فشار اضافی جلوگیری به عمل آید. طول

میانبر ۱۲ متر و سطح مقطع آن دایره‌ای توصیه و مدل‌سازی شده است. با توجه به این‌که از نظر تهویه تابع هدف افت فشار در نظر گرفته شده است، باید افت فشار در مسیر میانبر حداقل باشد که برای قطرهای ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ محاسبه شده و افت فشار مربوط به قطر ۳ متر با توجه به پایداری تونل میانبر و از این نظر که در محل تقاطع، قطر برخورد میانبر با تونل اصلی برابر با ۳/۶۵ متر است، بهینه و مناسب به‌نظر می‌رسد. به‌صورت ابعاد میانبر تهویه با استفاده از نرم افزار FLAC3D برای قطرهای ۲/۵ تا ۴ متر انجام شد که با توجه به جنس خوب سنگ، عدم پایداری در قطرهای ۲/۵ تا ۴ متر بسیار کم مشاهده شده و در حد میلی‌متر است. تونل میانبر به‌منظور نیازهای تهویه تونل گدوک طراحی شده است و هندسه آن باید به گونه‌ای باشد که حداقل افت فشار را ایجاد کند، بنابراین محل تقاطع تونل اصلی و دسترسی به‌صورت شیپوری طراحی شد. پایداری محل تقاطع طی محاسبات عددی بررسی شده و در حد ۲ میلی‌متر است. قطرهای کوچک جوابگوی نیازهای تهویه نیست و قطرهای بزرگتر از نظر ایجاد ناپایداری و افزایش هزینه‌های حفاری توصیه نمی‌شود. سیستم نگهداری داخل تونل اصلی ۲۰ سانتی‌متر لاینینگ بتنی و در محدوده ۲۵ متر در اطراف تقاطع است که با توجه به محاسبات عددی انجام شده در صورت نبود نگهداری نیز مشکلی برای پایداری تونل به وجود نمی‌آید، اما برای ملاحظات ایمنی و احتمال هوازدگی در داخل تونل اصلی توصیه می‌شود. با توجه به محاسبات عددی انجام شده جابه‌جایی در داخل میانبر در حد میلی‌متر است و عدم استفاده از سیستم نگهداری نیز مشکلی برای پایداری ایجاد نمی‌کند. سیستم نگهداری داخل میانبر استفاده از ۵ سانتی‌متر شاتکریت و ۱۵ سانتی متر لاینینگ درنظر گرفته شده است. با توجه به این‌که تونل میانبر برای نیازهای تهویه طراحی شده است باید یک سطح صاف برای عبور هوا و کاهش افت فشار داشته باشد. با توجه به کارهای اجرایی حداقل میزان لاینینگ، که از نظر اجرایی ۱۵ سانتی‌متر است برای آن توصیه می‌شود. همچنین پایداری داخل میانبر با استفاده از ۵ سانتی متر شاتکریت نیز بررسی شده است که با توجه به محاسبات عددی انجام شده در داخل میانبر و نمودار نیروهای نامتعادل به پایداری رسیده است. با توجه به جنس خوب سنگ گام پیشروی در داخل میانبر برابر با ۲ متر در نظر گرفته شده است و در ۶ گام حفاری انجام می‌شود تا از لحاظ اجرایی نیز قابل اجرا باشد. با توجه به این‌که میانبر جهت نیازهای تهویه است، قرار گیری آن باید به‌گونه‌ای باشد که حفر دویل هیچ برهم‌کنشی از نظر جابه‌جایی و تنش بر روی تونل نداشته باشد.

مراجع

[۱] C.G. Fan, J. Ji, Z.H. Gao, J.Y. Han, J.H. Sun; "Experimental Study Of Air Entrainment Mode With Natural Ventilation Using Shafts In Road Tunnel Fires", International Journal Of Heat And Mass Transfer, China, 2014,8.

[۲] مطالعات فنی و اقتصادی اجرای سیستم تهویه و خطوط بدن بالاست در تونل‌های راه‌آهن، مرکز تحقیقات راه‌آهن، تهران، ۱۳۸۹.

[۳] یزدانی، حامد؛ تونلسازی ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۱.

[۴] مدنی، حسن: تونلسازی؛ انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، جلد دوم، شماره ویرایش، سال ۱۳۷۷.

[۵] Mayoral, J.M.; Roman-de la Sancha A.; Osorio, L.; Martinez, S.; "Numerical Analysis of a Tunnel Intersection", *Institute of Engineering at UNAM*, Mexico, D.F., 2013.

[۶] مدنی، حسن؛ تهویه در معادن، *انتشارات مرکز نشر دانشگاهی*، جلد اول، چاپ ششم، ۱۳۸۷.

[۷] حسینی، سیده گلاله؛ مدنی، حسن؛ شهریار، کوروش؛ مرتضوی، علی؛ به‌صورت ابعاد میانبر تهویه به روش دویل میانی در تونل‌های قدیمی راه‌آهن از دیدگاه پایداری و تهویه، مطالعه موردی: تونل راه آهن گدوک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر۱۳۹۲.

[۸] http://www.payait.com/Rhino_training.aspx