



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دوره اول، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱ تا ۱۲

Vol. 1, No. 1, autumn 2016, pp. 1-12



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

بررسی عددی اثرات حفاری تونل‌های شیب‌دار بر پایداری تونل‌های اصلی آزادراه تهران شمال

سیامک دوست‌داری^{۱*}، راحب باقرپور^۲، علیرضا باغبانان^۳

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۱۹، پذیرش ۱۳۹۴/۰۲/۲۹)

چکیده

مسیر آزادراه تهران شمال، کوهستان البرز را با تونلی به طول تقریبی ۶۴۰۰ متر قطع می‌کند. تونل‌های بزرگ البرز شامل دو تونل اصلی (رفت و برگشت) و یک تونل اکتشافی (بین دو تونل اصلی و در تراز پایین‌تر) است. تونل‌های اصلی البرز به وسیله تونل‌هایی تحت عنوان دستک‌های تهویه به صورت شیب‌دار به تونل اکتشافی متصل می‌شوند. هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی عددی تأثیرات حفاری تونل‌های دسترسی شیب‌دار بر پایداری تونل‌های اصلی است. برای انجام این کار از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ استفاده شده است، به این ترتیب اطلاعات به دست آمده از مدلسازی نشان داده است که تأثیر حفر تونل شیب‌دار تا ۱/۵ برابر عرض تونل شیب‌دار از دیواره تقاطع ادامه می‌یابد و بیشترین تأثیرات واکنشی در سیستم نگهداری تونل اصلی ناشی از حفاری تونل شیب‌دار، به ترتیب در دیواره چپ، دیواره راست و سقف تونل اتفاق می‌افتد. همچنین نحوه تغییرات در نیروی محوری و لنگر خمشی در سیستم نگهداری تونل اصلی، با توجه به جهت حفر تونل شیب‌دار از سمت تونل اکتشافی به سمت تونل اصلی یا بالعکس نشان داد که حفاری دهانه تونل شیب‌دار از سمت فضای باز (تونل اصلی) به سمت تونل اکتشافی فشار کمتری را به دیواره تقاطع وارد خواهد کرد.

کلمات کلیدی

تونل‌های شیب‌دار، تونل آزاد راه تهران شمال، تقاطع تونلی، نیرو و لنگر خمشی، روش تفاضل محدود.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: s.doostdari@gmail.com

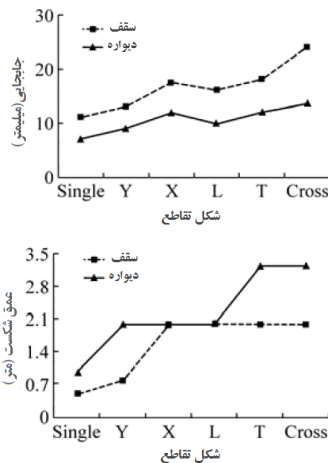
۱- مقدمه

است. برخی بلوک‌های سنگی ناپایدار و یا لبه‌ها را در یک دسته درزه، بدون محافظ بگذارد.

تینگ کان^۲ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ برخی عوامل موثر در پایداری تقاطع را با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ با استفاده از شبیه‌سازی غیر خطی مدلسازی کردند. مواد سنگی مدل، از سنگ سخت تا سنگ نرم در پنج سطح به صورت متنوع انتخاب شد که سطح ۱ سخت‌ترین و سطح ۵ نرم‌ترین این سنگ‌ها بود. آن‌ها نتایج حاصل از کار خود را به این ترتیب بیان کردند [۲].

الف- اثر شکل هندسی بر پایداری تقاطع: به منظور

بررسی اثر شکل هندسی بر پایداری تقاطع، عمق روباره ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده و خواص مکانیکی سطح ۴ انتخاب شده است. تقاطع‌های دو بعدی با پنج شکل هندسی مختلف (تقاطع صلیب با زاویه ۹۰ درجه، تقاطع X با زاویه ۴۵ درجه، تقاطع T شکل، تقاطع L شکل و تقاطع Y شکل) با یک تونل منفرد مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که برای تقاطع‌های زیرزمینی دو بعدی، اشکال هندسی ساده‌تر پایداری بیشتری دارند. در شکل شکست و تغییر شکل اشکال هندسی مختلف تقاطع در مورد سقف و لبه تقاطع مقایسه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است تقاطع صلیب ناپایدارترین تقاطع در حالت دو بعدی است.



شکل ۱: تاثیر شکل تقاطع بر جابه‌جایی و گسیختگی [۲]

ب- تاثیر عمق تونل بر پایداری تقاطع: نقاط صلیبی در سطوح مختلف عمق تونل از ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ متر (در خواص مکانیکی سطح ۴) مورد تحلیل قرار گرفت. شکل پایداری تقاطع در اعماق مختلف تونل را نشان می‌دهد و نشانگر آن است که پایداری نسبت به افزایش عمق تونل به صورت خطی

گسترش حمل و نقل در شهرهای بزرگ و همچنین عواملی مانند کمبود فضای شهری و وجود موانع طبیعی، ساخت تونل‌های جدیدی را ایجاب می‌کند، در این صورت با توجه به نحوه حفر تونل، ایجاد تونل‌های جدید در کنار و در تقاطع با تونل قبلی، امری اجتناب ناپذیر خواهد بود؛ بنابراین عکس‌العمل و تحلیل پایداری بین تونل‌های جدید و موجود یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که در هنگام ایجاد تونل‌های جدید به آن پرداخته می‌شود.

پایداری تونل در محل تقاطع با سایر تونل‌ها یک شرط لازم برای عملکرد مناسب تونل‌ها در معادن و دیگر شبکه‌های زیرزمینی است. بی‌ثباتی بالقوه تقاطع‌ها به چند دلیل است که مهم‌ترین آن‌ها تنش‌های القایی بزرگی است که در سنگ‌های اطراف تقاطع‌ها اتفاق می‌افتد. تقاطع‌ها در استمرار کار بخش‌های حیاتی معدن و دیگر شبکه‌های زیرزمینی (تهویه، حمل و نقل پرسنل و انتقال مواد و نظایر آن) نقش مهمی را ایفا می‌کنند. گرسک^۱ در سال ۱۹۸۶ مهم‌ترین عوامل موثر در مورد تقاطع‌ها را به شرح زیر بیان کرده است [۱].

الف- زمان خود ایستایی: در تقاطع، معمولا وسعت سقف

نگهداری شده نسبت به محدوده دهانه‌های منفرد بزرگ‌تر است. در صورتی که از زمان پیدایش سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ، بزرگ‌ترین دهانه نگهداری نشده مربوط به کوتاه‌ترین زمان خود ایستایی برای حفاری مناطق زیرزمینی شناخته شده است.

ب- جهت ناپیوستگی‌ها: تا جایی که جهت ناپیوستگی‌ها

با توجه به دهانه‌های منفرد در نظر گرفته شود، ایجاد یک پیکربندی تقاطع که متناسب با تمام دهانه‌های تشکیل‌دهنده تقاطع باشد، کار دشواری است؛ به عبارت دیگر در نظر گرفتن یک جهت مناسب برای یک دهانه ممکن است برای دهانه‌های دیگر چندان مناسب نباشد.

پ- برهم‌نهی تنش‌های مرزی: وضعیت تنش‌های القایی

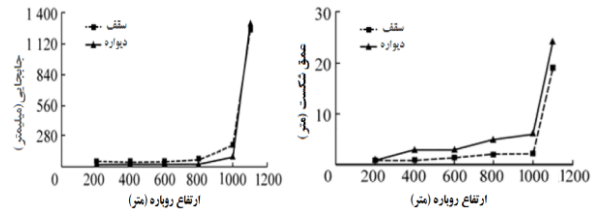
اطراف تقاطع به دلیل تغییر ناگهانی ساختار هندسی مقطع عرضی در امتداد محور طولی دهانه به صورت سه بعدی است، به عبارت دیگر تنش توزیع شده اطراف دهانه‌های منفرد به صورت تجمعی بر تقاطع وارد می‌شود [۱].

ت- حذف نقش نگهدارنده دیواره کناری: در تقاطع،

سیستم نگهداری اعمال شده به دیواره‌های جانبی حذف می‌شود. حذف محدودیت و ایجاد سطح آزاد اضافی ممکن

تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد.

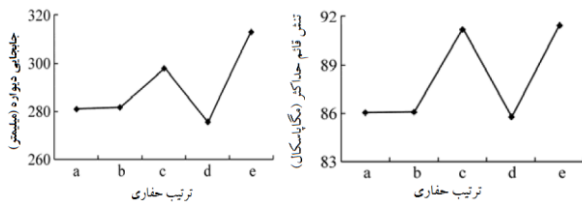
بر اساس نتایج مدلسازی، حداقل تنش عمودی و تغییر شکل در توالی حفاری (a)، (b) و (d)، بدست آمده است. این روش‌های حفاری، وضعیت تنش‌های اطراف دهانه را دو بار برهم می‌زنند، اما این آشفتگی تنش به دلیل این که حفاری در زمان‌های مختلفی انجام شده است، نسبت به روش‌های حفاری دیگر کوچک‌تر است. بنابراین جهت حفر تقاطع نیز بر پایداری تقاطع موثر است. اگر جهت حفاری به سمت تقاطع باشد اثر قابل توجهی بر پایداری تقاطع می‌گذارند و اگر جهت حفاری در حال دور شدن از نقطه مرکزی تقاطع باشد اثر آن نیز به نسبت کوچک خواهد بود.



شکل ۲: اثر عمق بر جابجایی و گسیختگی در تقاطع [۲]

پ- تاثیر خواص توده سنگ بر پایداری تقاطع: مقاومت

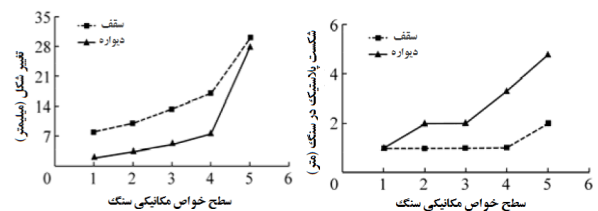
توده سنگ یکی از عوامل اصلی است که پایداری تقاطع را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که شکست و تغییر شکل به صورت غیر خطی با کاهش خواص توده سنگ، افزایش می‌یابد (در عمق کمتر از ۸۰۰ متر) و هنگامی که مقاومت توده سنگ کمتر از سطح معین (سطح ۴، سنگی با مقاومت متوسط) باشد تغییر شکل و شکست به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل ۵: اثر ترتیب حفاری بر جابه‌جایی دیواره و تنش قائم حداکثر [۲]

ث- اثر گام پیشروی بر پایداری تقاطع: گام پیشروی در

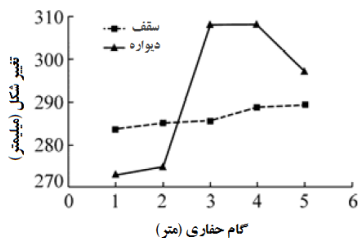
حفاری، برای نشان دادن متراژ حفاری در هر حرکت رو به جلو استفاده می‌شود. اعتقاد بر این است که در گام‌های پیشروی متفاوت، اثر حفاری بر پایداری تقاطع متفاوت است؛ بنابراین میزان جابه‌جایی برای ۵ سطح از گام‌های پیشروی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر به دست آورده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل برای گام‌های پیشروی کوچک‌تر، تقاطع پایداری بیشتری دارد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که هنگامی که حفاری در نزدیکی تقاطع انجام می‌گیرد، گام پیشروی حفاری کوچک‌تر (مانند ۱ یا ۲ متر) برای ایجاد آشفتگی کمتر بر تقاطع، در نظر گرفته شود.



شکل ۳: تاثیر خصوصیات سنگ بر تغییر شکل و عمق گسیختگی [۲]

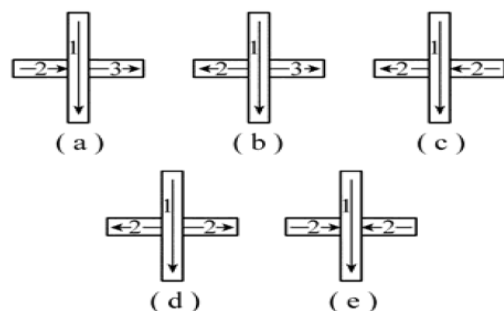
ت- تاثیر توالی حفاری در پایداری تقاطع: توالی حفاری

یکی دیگر از عواملی است که پایداری تقاطع را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مطالعه بر روی تقاطع صلیبی به عنوان ناپایدارترین حالت تقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. شکل توالی حفر تقاطع صلیبی را به روش‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۶: اثر گام پیشروی بر تغییر شکل در تقاطع [۲]

در این تحقیق، برخی از مهم‌ترین جنبه‌های دیگر برای پدیده برهم‌کنش بین تونل‌های موازی و تونل‌های دسترسی



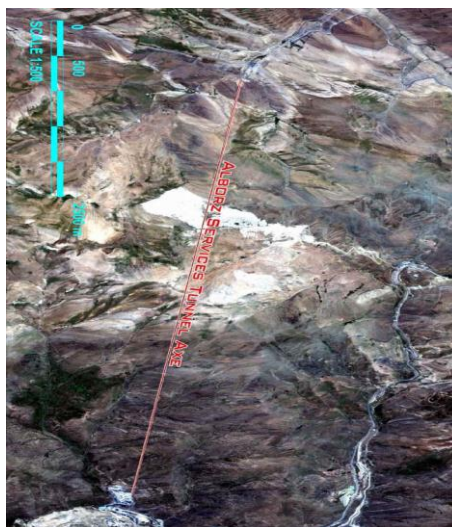
شکل ۴: روش‌های مختلف در ترتیب حفاری تقاطع [۲]

جدول ۱: پارامترهای فیزیکی- مکانیکی توده سنگ و شرایط تنش‌های برجا

مقدار	واحد	نوع پارامتر
۲/۴	گرم بر سانتی‌متر مکعب	جرم مخصوص
۰/۲۴	-	ضریب پواسون
۰/۹	-	نسبت تنش افقی به قائم
۳۷۵	متر	روباره
۴۰	-	RMR
۶/۷	مگاپاسکال	مقاومت فشاری
۳/۷	گیگاپاسکال	مدول تغییر شکل پذیری
۳۷	درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۰/۷۸	مگاپاسکال	چسبندگی



شکل ۷: موقعیت مسیر تونل البرز بر روی نقشه کشور



شکل ۸: موقعیت مسیر تونل بر روی تصاویر ماهواره‌ای

شیب‌دار آزادراه تهران- شمال که به صورت متقاطع با هم‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای پی بردن به رفتار سیستم نگهداری تونل‌های اصلی، در ناحیه تقاطع با تونل‌های دسترسی شیب‌دار در هنگام حفر تونل‌های دسترسی شیب‌دار، از آنالیز عددی سه بعدی کامل با استفاده از مواد الاستوپلاستیک استفاده شده است. تاثیر حفاری ثانویه بر روی سیستم نگهداری (شاتکریت) تونل موجود (تونل اصلی) مورد توجه قرار گرفته است. از این رو افزایش نیروهای محوری و لنگرهای خمشی در طی حفاری در ناحیه تقاطع تونل‌های دسترسی شیب‌دار و اصلی، ممکن است، پایداری تونل اصلی را تهدید کند.

۲- مشخصات زمین شناسی و ژئوتکنیکی

تونل‌های بزرگ البرز به صورت دوقلو از بزرگ‌ترین سازه‌های در دست احداث آزادراه تهران شمال است که ارتفاعات البرز مرکزی با پیچیدگی‌های خاص زمین‌شناختی، زمین‌ساختاری (از جنوب به شمال توف سنگ‌های کرج، توده‌های گچی، آهک‌های پرمین و مجموعه شیل- ماسه سنگ ژوراسیک) را قطع می‌کنند. این تونل‌ها به واسطه طول زیاد و شرایط توپوگرافی خاص منطقه در رده تونل‌های بلند و عمیق دسته‌بندی می‌شوند. واحدهای سنگی اصلی موجود در امتداد تونل‌های البرز (شکل ۷ و شکل ۸)، عبارت از واحدهای ماسه سنگی، لای سنگی، شیلی، پلیتی، انواع مختلف توف سنگ‌ها، ژپس، سنگ‌های آهکی، برش آهکی، کوارتزیت و میان لایه‌های زغالی است. پارامترهای فیزیکی- مکانیکی توده سنگ و همچنین شرایط تنش‌های برجا در جدول نشان داده شده است. اطلاعات مندرج در جدول به کمک روش هوک و همکاران به دست آمده است [۳].

۳- مشخصات هندسی و سیستم نگهداری

عرض تونل اصلی البرز ۱۲/۰۴ متر و ارتفاع آن ۹/۰۷ متر است. تونل‌های اصلی (رفت و برگشت) البرز به وسیله دستک‌های تحت عنوان دستک‌های تهویه که به صورت شیب‌دار (با شیبی حدود ۱۵ درصد) در فواصل تقریبی ۶۰۰ متر به تونل اکتشافی که فی‌مابین تونل‌های اصلی حفر شده است، متصل می‌شود. عرض دستک‌های تهویه ۵/۲ متر و ارتفاع آن‌ها ۵/۳۳ متر است. تونل سرویس و تهویه نسبت به دو تونل اصلی در تراز پایین‌تری قرار دارد و تراز سقف تونل سرویس و تهویه هم در تراز کف دو تونل اصلی است. شکل

جدول ۲: خواص شاکریت به کار رفته در سیستم نگهداری

اندازه	واحد	نوع پارامتر
۲/۳	گرم بر سانتی‌متر مکعب	جرم مخصوص
۰/۲	-	ضریب پواسون
۳۴	مگاپاسکال	مقاومت فشاری
-۲/۵	مگاپاسکال	مقاومت کششی
۳۰	گیگاپاسکال	مدول تغییر شکل پذیری

سازه‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین تفسیر و تحلیل نتایج حاصل از آنها برای مهندسان و طراحان به راحتی امکان‌پذیر شده است.

از آنجا که مفاهیم پیوسته و ناپیوسته به منظور حل مساله نسبی است. انتخاب روش‌های پیوسته و یا ناپیوسته به فاکتورهای خاص مساله و اساساً به هندسه و مقیاس سیستم شکستگی بستگی دارد و یک روش بر روش دیگر برتری مطلق ندارد. بعد از بررسی‌های لازم برای آنالیز و مدلسازی باید برای انتخاب روش پیوسته و یا ناپیوسته تصمیم‌گیری شود [۴].

بنابراین با توجه به موارد زیر محیط به صورت پیوسته در نظر گرفته شد و از روش تفاضل محدود به منظور حل مساله استفاده شد [۵، ۷]:

الف- به علت عرض ۱۲ متری تونل اصلی و فاصله‌داری کم درزه‌ها (به علت تعدد دسته درزه‌ها) و این موضوع که نسبت عرض تونل به فاصله‌داری درزه‌ها زیاد است.

ب- مدل باید با ابعاد واقعی در نظر گرفته شود به همین دلیل حجم عملیاتی بالایی باید انجام گیرد.

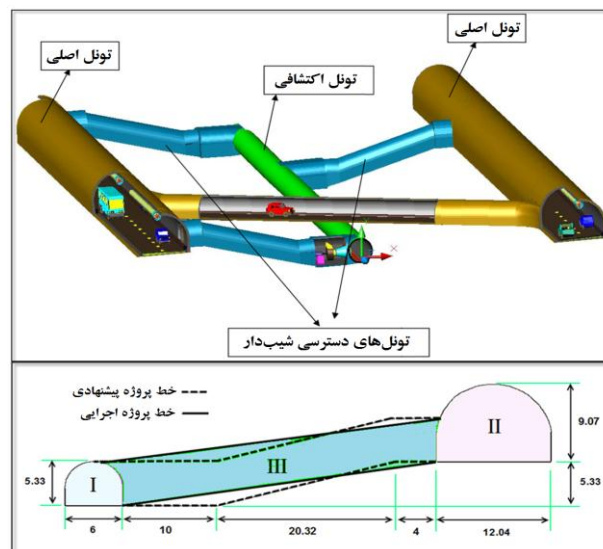
پ- با توجه به ابعاد عملیاتی مدل چنانچه از محیط ناپیوسته استفاده شود زمان عملیات به شدت افزایش می‌یابد و حتی می‌توان گفت که با این فاصله‌داری نسبتاً کم، نرم افزاری که قادر به حل این مدل باشد، وجود ندارد.

ت- با توجه به تجربه‌های قبلی که طراحان پروژه‌های مختلف به دست آوردند با این شرایط نیز استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ برای طراحی‌های عملی کارایی دارد.

به همین منظور در این پژوهش از نرم افزار عددی بسیار قوی $FLAC^{3D}$ ، به دلیل قابلیت‌های مناسب و اعتبار نتایجی که در محیط‌های پیوسته و یا شبه پیوسته دارد، استفاده شده است.

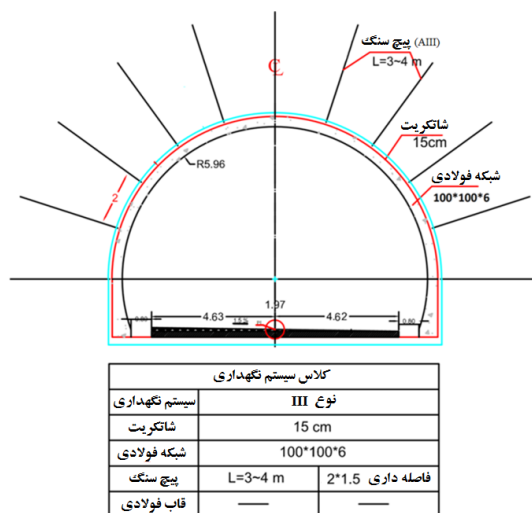
بعد از مرحله ساخت مدل (شکل ۱۱) و ورود پارامترهای

شمارتیک تونل‌های دوقلوی البرز به همراه تونل اکتشافی و دستک‌های تهویه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: شمارتیک تونل‌های دوقلوی البرز به همراه تونل اکتشافی و دستک‌های تهویه

ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی سیستم نگهداری در شکل ۱۰ و جدول ۲ نشان داده شده است.

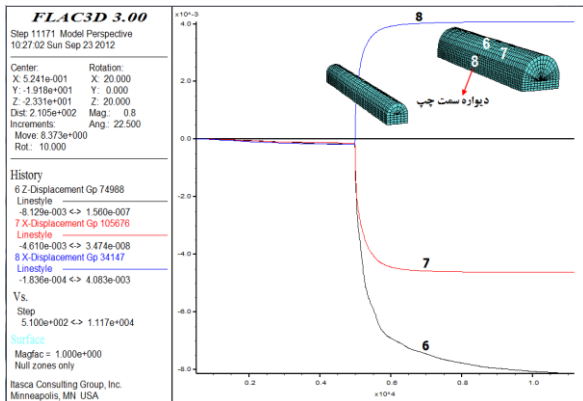


شکل ۱۰: الگوی سیستم نگهداری تونل اصلی

۴- مدلسازی عددی و هندسی

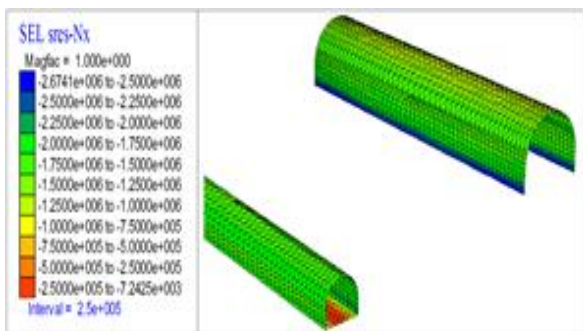
امروزه با پیشرفت استفاده از رایانه و همچنین نرم افزار- های عددی به منظور تحلیل‌های با سرعت و دقت بالا، پیش‌بینی تغییر مکان‌ها و تنش در خاک یا سنگ دربرگیرنده

که بعد از حفر تونل اکتشافی و اصلی در مدل ایجاد شده است پرداخته می‌شود. در شکل ۱۳ تاریخچه جابجایی سه نقطه در دیواره سمت چپ (دیواره سمت تقاطع)، سقف و دیواره سمت راست تونل اصلی را می‌توان مشاهده کرد، قسمت اول این نمودار مربوط به حفر تونل اکتشافی و قسمت دوم مربوط به حفر تونل اصلی است.



شکل ۱۳: تاریخچه جابجایی سه نقطه در دیواره سمت چپ، سقف و دیواره سمت راست تونل اصلی

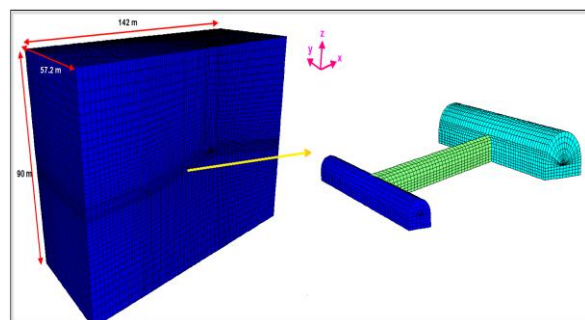
میزان نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری تونل اصلی و اکتشافی، قبل از حفر تونل شیب‌دار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری تونل اصلی و اکتشافی

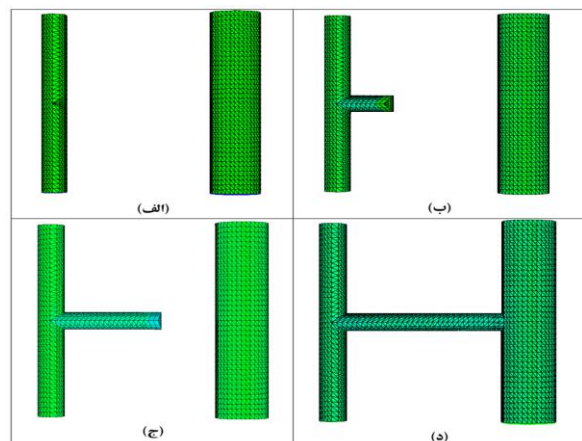
نیروهای محوری وارده بر سیستم نگهداری تونل اصلی در جهات محوری و طولی برای حالتی که تونل شیب‌دار به طور کامل حفر شده است، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده‌اند. همان طور که می‌توان مشاهده کرد نیروی محوری محیطی القا شده به سیستم نگهداری تونل اصلی بعد از حفر تونل شیب‌دار افزایش چشمگیری در نواحی نزدیک به تقاطع داشته ولی در ناحیه نزدیک به سقف تقاطع مقدار نیروی

مکانیک سنگی و احراز شرایط تعادل، نوبت به حفر تونل‌ها و نصب سیستم نگهداری می‌رسد. مراحل حفر تونل‌ها و نصب سیستم نگهداری به این ترتیب است که ابتدا در مدل‌های ایجاد شده تونل اکتشافی حفر و نگهداری و سپس به مدل اجازه تعادل داده شده است، سپس تونل اصلی نیز حفر و نگهداری شده و مجدداً به مدل اجازه تعادل داده شده است. علت این امر آن است که در شرایط واقعی ابتدا تونل اکتشافی به طور کامل حفر و نگهداری شده است و سپس اقدام به حفر تونل اصلی می‌شود.



شکل ۱۱: هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار FLAC^{3D}

به منظور حفر تونل دسترسی نیز از گام‌های پیشروی به طول حدود ۲ متر (با توجه به روش حفاری) استفاده شده است که با توجه به فاصله ۳۴ متری دیواره دو تونل اکتشافی و اصلی از یکدیگر معادل ۱۷ گام خواهد شد. شکل ۱۲، الف-ب-ج و د، برخی از مراحل حفر تونل دسترسی را به همراه سیستم نگهداری اعمال شده، نشان می‌دهد.

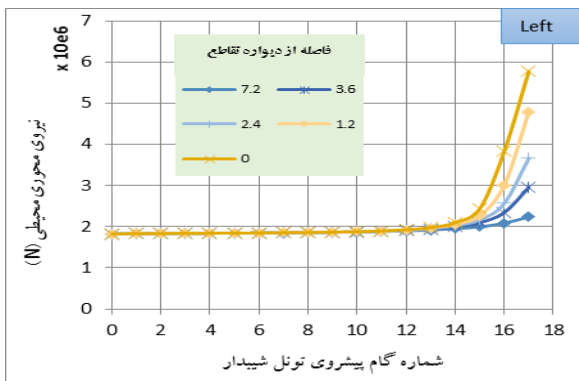


شکل ۱۲: برخی از مراحل حفر تونل دسترسی

۵- اثرات حفاری تونل شیب‌دار بر روی تونل اصلی

قبل از حفر تونل شیب‌دار به بررسی شرایط اولیه محیط

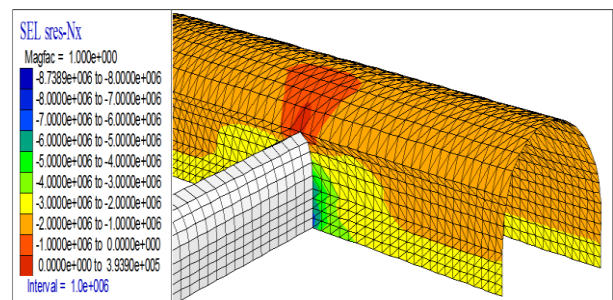
متر است) در فواصل مختلف از دیواره تقاطع در گام‌های پیشروی مختلف تونل شیب‌دار در شکل نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد تقریباً از گام سیزدهم که فاصله جبهه‌کار تونل شیب‌دار تا تونل اصلی تقریباً ۸ متر است (یعنی ۱/۵ برابر عرض تونل شیب‌دار) تأثیرات تونل شیب‌دار بر روی تونل اصلی آغاز می‌شود و این تأثیرات در گام هفدهم (گام آخر) به حداکثر خودش می‌رسد. با توجه به این نمودار، همچنین می‌توان پی برد که حداکثر نیروی محوری در دیواره چپ به میزان ۵/۸ مگا نیوتن که در گام هفدهم اتفاق افتاده، است. بنابراین با توجه به مقدار اولیه ۱/۸ مگا نیوتن میزان نیروی محوری در دیواره چپ ۳/۲ برابر شده است.



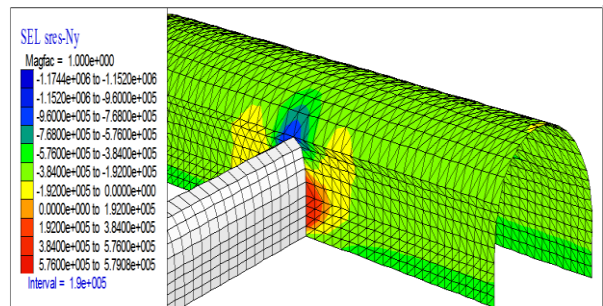
شکل ۱۷: نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار

نمودار لنگر خمشی محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار در شکل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر بر روی لنگر محیطی سیستم نگهداری در گام پیشروی شانزدهم در محل تقاطع گذاشته شده است. به نظر می‌رسد علت تغییرات این چینی لنگر خمشی محیطی به این ترتیب باشد که با حفر تونل شیب‌دار و رسیدن این تونل به ۸ متری تونل اصلی به دلیل دور بودن جبهه‌کار تأثیر چندانی بر روی تونل اصلی نداشته است ولی بعد از گام سیزدهم، دیواره تونل اصلی شروع به جابه‌جا شدن به سمت تونل شیب‌دار کرده در نتیجه لنگر خمشی محیطی، افزایش پیدا کرده است؛ ولی در گام هفدهم به دلیل حفر کامل تونل شیب‌دار روند تغییرات جابه‌جایی تغییر کرده و موجب کاهش لنگر خمشی شده است.

محوری کاهش یافته و به صورت کششی در آمده است؛ علت آن است که با حذف قسمتی از سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی، سیستم نگهداری دو ستون کناری مجبور به تحمل باری خواهند شد که در اثر حذف این بخش از سیستم نگهداری ایجاد شده است به عبارت دیگر، باری که سیستم نگهداری حذف شده تحمل می‌کرد بر روی این دو ستون خواهد افتاد و از طرف دیگر قسمت سقف تقاطع که آزاد گذاشته شده نیز در وضعیت کشش قرار خواهد گرفت. همان طور که در شکل ۱۶ می‌توان مشاهده کرد، میزان نیروی محوری طولی در ناحیه سقف تقاطع افزایش پیدا کرده ولی در دیواره‌های ناحیه تقاطع در وضعیت کشش قرار گرفته است. دلیل این تغییرات نیز این است که با حفر تونل شیب‌دار، دیواره‌های ستون‌های کناری تونل اصلی به سمت داخل تونل شیب‌دار جابه‌جا خواهند شد، در نتیجه نیروی محوری طولی در سیستم نگهداری ستون‌های کناری در وضعیت کشش قرار خواهد گرفت. این موضوع نیز به صورت نموداری در بخش بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

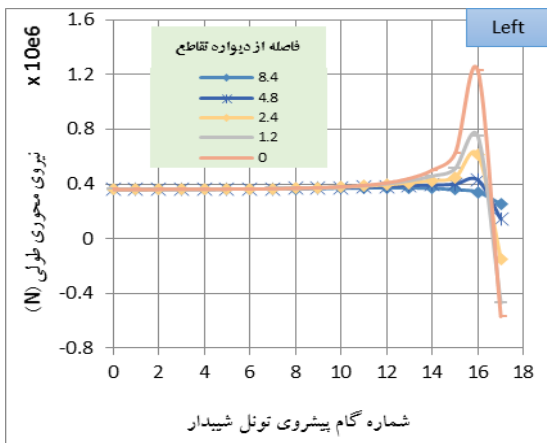


شکل ۱۵: نیروی محوری محیطی سیستم نگهداری تونل اصلی ناشی از حفاری تونل شیب‌دار

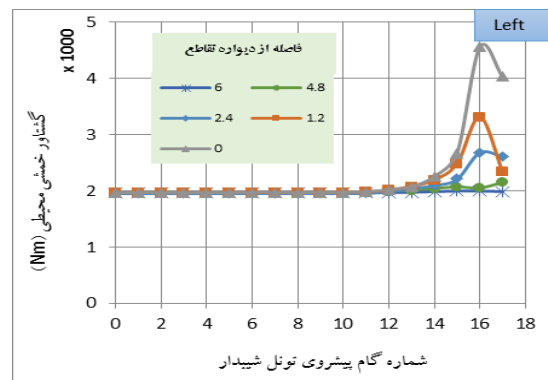


شکل ۱۶: نیروی محوری طولی سیستم نگهداری تونل اصلی ناشی از حفاری تونل شیب‌دار

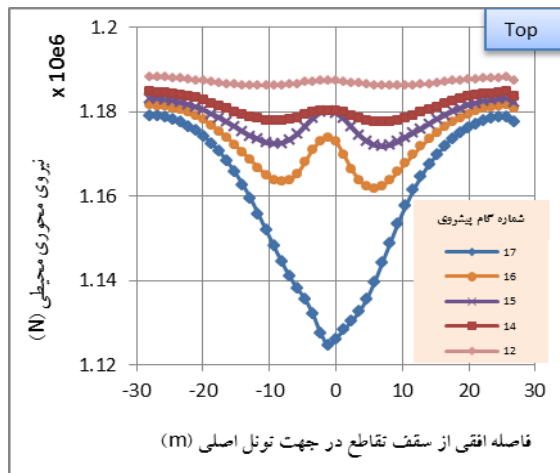
نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی (ارتفاع از کف تونل اصلی تقریباً ۲/۷



شکل ۱۹: نمودار نیروی محوری طولی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار



شکل ۱۸: نمودار لنگر خمشی محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره‌ی چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار



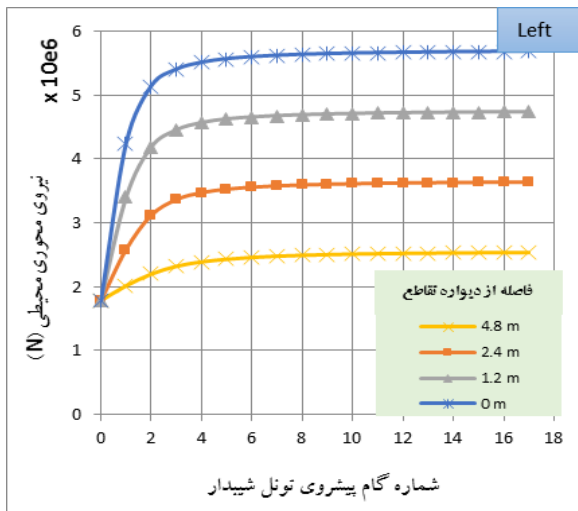
شکل ۲۰: نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری سقف تونل اصلی بر حسب فاصله از مرکز تقاطع

است، میزان تغییرات نیروی محوری در سقف تونل در حدود ۰/۱ مگا-نیوتن (از ۱/۲ به ۱/۱ مگا نیوتن) است که در مقایسه با دیواره سمت چپ تونل اصلی مقدار بسیار ناچیزی است. این امر در مورد نمودارهای لنگر خمشی محیطی و نیروی محوری طولی وارد بر سیستم نگهداری سقف تونل اصلی نیز صادق است.

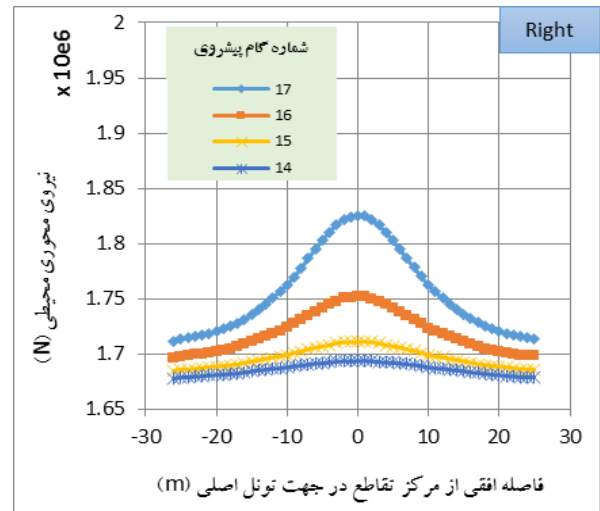
همان طور که در شکل ۲۱ که مربوط به نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره راست تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار است مشاهده می‌شود، به دلیل فاصله ۱۲ متری دیواره سمت راست تونل اصلی از محل تقاطع دارای تغییرات بسیار کمی است ولی به منظور آشنایی با روند تغییرات آن آورده شده است.

نمودار نیروی محوری طولی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار نیز در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است، میزان نیروی محوری در گام شانزدهم به میزان چشمگیری افزایش یافته است و فشاری در حدود ۱/۲ مگا نیوتن را در جهت طولی به سیستم نگهداری وارد کرده است سپس در گام هفدهم و بعد از حفر کامل تونل، نیروی محوری طولی به صورت کششی در آمده است و نیرویی در حدود ۰/۶ مگا نیوتن را به صورت کششی وارد کرده است. به نظر می‌رسد علت تغییرات این چینی نیروی محوری طولی نیز به این ترتیب باشد که با حفر تونل شیب‌دار و حرکت دیواره تونل شیب‌دار به داخل تونل شیب‌دار قسمت نزدیک به پشت جبهه کار تونل شیب‌دار به صورت یک تکیه‌گاه عمل کرده و موجب بیرون راندن قسمت‌های عقب‌تر جبهه کار به بیرون از تونل شیب‌دار می‌شود در نتیجه نیروی محوری طولی در وضعیت فشار قرار خواهد گرفت ولی با حفر کامل تونل شیب‌دار (گام هفدهم) و با حذف این تکیه‌گاه ستون‌های کناری تونل شیب‌دار شروع به حرکت به داخل تونل شیب‌دار خواهند کرد که در نتیجه باعث ایجاد کشش در سیستم نگهداری کناری خواهند شد. نتیجه دیگری که می‌توان از این نمودار همانند نمودارهای قبل گرفت این است که بعد از فاصله ۸ متری از محل تقاطع (۱/۵ برابر عرض تونل شیب‌دار از دیواره تونل شیب‌دار و در جهت تونل اصلی) می‌توان از تاثیراتی که حفر تونل شیب‌دار بر روی تونل اصلی دارد صرف نظر کرد.

با توجه به نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری سقف تونل اصلی که بر حسب فاصله از مرکز تقاطع و گام پیشروی تونل شیب‌دار در شکل ۲۰ نشان داده شده



شکل ۲۲: نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار



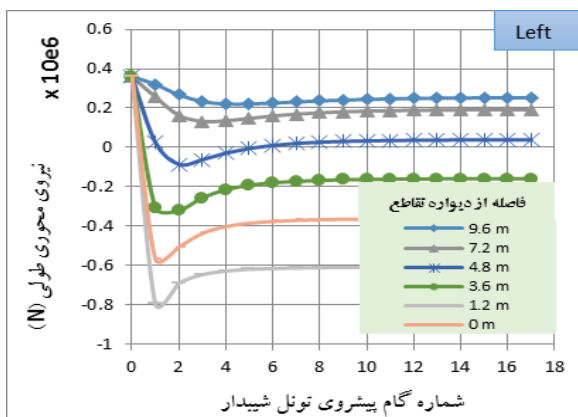
شکل ۲۱: نمودار نیروی محوری محیطی وارد بر سیستم نگهداری دیواره راست تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار

۶- تاثیر جهت حفاری

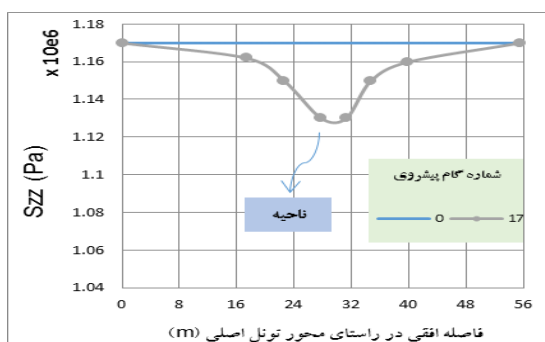
با توجه به نتایجی که از نمودارهای بخش قبل به دست آمد مشخص شد که بحرانی‌ترین ناحیه در تقاطع دیواره چپ تونل است به همین منظور اثر حفر تونل شیب‌دار از تونل اصلی به سمت تونل اکتشافی فقط بر روی دیواره چپ تونل اصلی مورد مطالعه قرار گرفت. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود با حفر تونل شیب‌دار از سمت تونل اصلی به سمت تونل اکتشافی سیستم نگهداری تونل اصلی در چهار گام اول به ماکزیمم نیروی محوری القایی رسیده است. این ماکزیمم نیروی محوری معادل ۵/۷ مگا نیوتن است که در مقایسه با ۵/۸ مگا نیوتن که در بخش قبل به آن اشاره شد، مقدار کمتری را نشان می‌دهد. در مورد نمودار نیروی محوری طولی که در شکل ۲۳ نشان داده شده است باید گفت که در همان گام اول در حدود ۰/۸ مگا نیوتن کششی در سیستم نگهداری ایجاد خواهد شد این در حالی است که در حالت قبل ابتدا ۱/۲ مگا نیوتن نیروی فشاری و سپس ۰/۶ مگا نیوتن نیروی کششی در جهت طولی وارد می‌شد. به همین دلیل حفاری دهانه تونل شیب‌دار از سمت فضای باز (تونل اصلی) به سمت تونل اکتشافی فشار کمتری را به دیواره تقاطع وارد خواهد کرد.

۷- ناحیه تنش زدایی شده

تنش در راستای Z در سقف تونل اصلی در شکل ۲۴ نشان داده شده است همان طور که ملاحظه می‌شود، تنش‌های ایجاد شده بر روی سقف تقاطع در مقایسه با



شکل ۲۳: نمودار نیروی محوری طولی وارد بر سیستم نگهداری دیواره چپ تونل اصلی بر حسب گام پیشروی تونل شیب‌دار



شکل ۲۴: تنش در راستای Z در سقف تونل اصلی

تنش‌هایی که بر روی دهانه منفرد قرار دارد کمی کوچک‌تراند در واقع بعد از حفر کامل تونل شیب‌دار یک ناحیه تنش‌زدایی شده در سقف تقاطع ایجاد می‌شود.

۸- تغییر شکل و کرنش بحرانی

۴ و ۵ محاسبه می‌شود [۹].

$$N = -\frac{|M|At}{\gamma I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (۴)$$

$$N = -\frac{|M|At}{\gamma I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (۵)$$

بنابراین از مجموعه گزاره‌های ۴ و ۵ برای رسم نمودار اثر متقابل لنگر خمشی و نیروی محوری استفاده می‌شود. مقادیر بحرانی نیروی برشی Q_{cr} وابسته به مقدار فاکتور ایمنی برای هر دو شکست در فشار و کشش در یک زمان نیز با استفاده از گزاره‌های ۶ به دست می‌آید [۹].

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (۶)$$

همان طور که نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین لنگر خمشی و نیروی محوری شاتکریت (۱۵ سانتی‌متر شاتکریت) قبل از حفر تونل شیب‌دار (شکل ۲۶) نشان می‌دهد سیستم نگهداری تونل اصلی در وضعیت خوبی از لحاظ پایداری قرار دارد (روش Torres). با توجه به شکل ۲۷ که نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین نیروی برشی و نیروی محوری شاتکریت قبل از حفر تونل شیب‌دار را نشان می‌دهد نیز می‌توان بیان کرد که میزان نیروهای برشی در سیستم نگهداری تونل اصلی در حد ناچیزی بوده و از این لحاظ مشکلی برای سیستم نگهداری تونل اصلی پیش نخواهد آمد، بنابراین تنها با بررسی اثر متقابل نیروی محوری و لنگر خمشی می‌توان به پایداری سیستم نگهداری در ناحیه تقاطع پی برد. نقاطی که در روی نمودارهای ظرفیت نگهداری استفاده شده، مربوط به نقاطی است که تقریباً بر روی صفحه‌ای عمود بر محور اصلی تونل اصلی و در فاصله ۰/۶ و ۲/۴ متری از تقاطع قرار دارند. بعد از حفر تونل شیب‌دار نیز با توجه به شکل، سیستم نگهداری تونل اصلی در فاصله ۲/۴ متری از تقاطع همچنان با فاکتور ایمنی ۱/۳ پایداری خود را حفظ خواهد کرد. ولی در فاصله ۰/۶ تا ۲/۴ متری نیاز به افزایش ضخامت شاتکریت است و همان طور که در شکل ۲۹ می‌توان مشاهده کرد با افزایش ضخامت شاتکریت از ۱۵ به ۲۰ سانتی‌متر نیروی محوری و لنگر القایی در محدوده ۰/۶ متری از تقاطع در داخل نمودار ظرفیت نگهداری قرار خواهد گرفت. علاوه بر این در دیواره سمت چپ تونل اصلی از فاصله ۰/۶ تا ۲/۴ متری به دلیل وارد شدن به ترتیب ۰/۵۷ تا ۰/۱ مگا نیوتن نیروی کششی در راستای محور تونل پیشنهاد

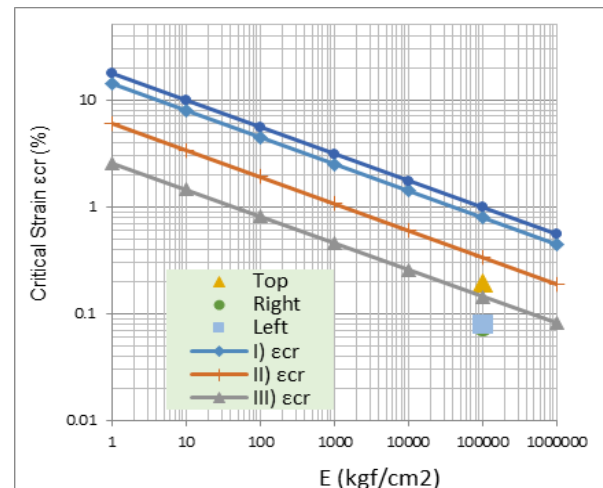
ساکورایی در سال ۱۹۸۶ روشی برای ارزیابی پایداری زمین با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرد در این روش، به منظور بررسی پایداری تونل، ساکورایی با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و داده‌های صحرایی، رابطه بین کرنش مجاز (بحرانی) و مدول یانگ را به شکل سه تراز هشدار خطر ارایه داد. در شرایط تراز هشدار خطر I (گزاره ۱) تونل مشکل پایداری دارد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II (گزاره ۲) به عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است و تراز هشدار خطر III (گزاره ۳) پایداری کوتاه مدت را نشان می‌دهد [۸].

$$I) \text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{Log } E - 0.85 \quad (۱)$$

$$II) \text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{Log } E - 1.22 \quad (۲)$$

$$III) \text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{Log } E - 1.59 \quad (۳)$$

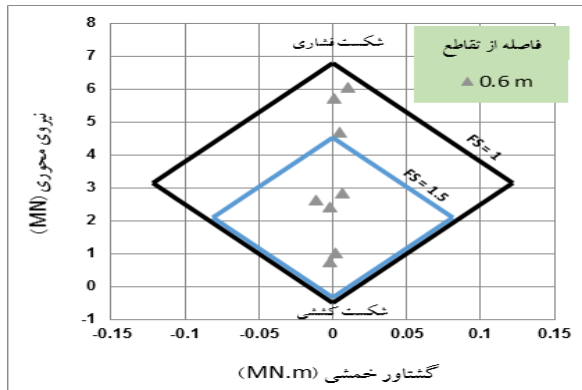
رابطه بین مدول تغییر شکل‌پذیری و کرنش بحرانی دیواره‌چپ، سقف و دیواره سمت راست تونل اصلی بعد از حفر تونل شیب‌دار در شکل ۲۵ نشان داده شده است، همان طور که در این شکل دیده می‌شود میزان جابه‌جایی بعد از حفر تونل شیب‌دار در حد مجاز است (روش ساکورایی) [۸].



شکل ۲۵. رابطه بین مدول تغییر شکل و کرنش بحرانی دیواره چپ، سقف و دیواره سمت راست تونل اصلی بعد از حفر تونل شیب‌دار

۹- نمودار ظرفیت نگهداری

روابط بین نیروی محوری و لنگر خمشی القا شده در سیستم نگهداری در لحظه شکست کششی و یا شکست فشاری برای فاکتور ایمنی‌های مختلف با استفاده از گزاره‌های



شکل ۲۹: نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین لنگر خمشی و نیروی محوری شاتکریت بعد از افزایش ضخامت شاتکریت به ۲۰ سانتی-متر

۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در انجام این تحقیق و همچنین بررسی‌های مشابهی که برای اعماق مختلف این تونل شده است می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

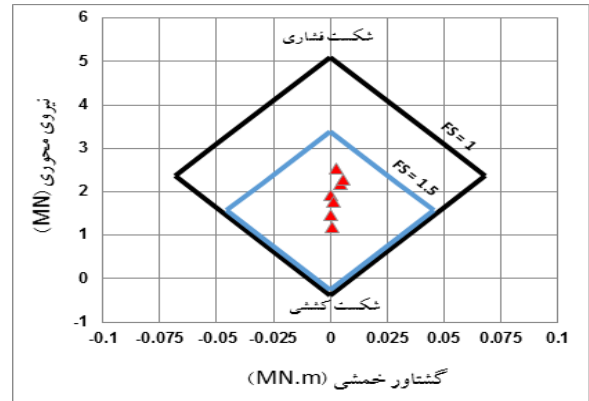
الف- بیشترین تغییرات واکنشی در ناحیه برخورد دو تونل (در لبه‌ها) اتفاق می‌افتد. برای مقاطع دورتر از ۸ متر (۱/۵) برابر عرض تونل شیب‌دار، تغییرات خیلی ناچیزی در میزان نیروی محوری محیطی مشاهده می‌شود.

ب- با پیشروی جبهه‌کار تونل شیب‌دار تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار سیستم نگهداری تونل اصلی مشاهده می‌شود. تغییرات از فاصله تقریباً ۸ متری برای دیواره چپ (نزدیک به جبهه‌کار تونل) شروع می‌شود و تا رسیدن به محدوده ۲ متری روند صعودی لنگر خمشی و نیروی محوری طولی ادامه پیدا می‌کند ولی با حفر کامل تونل لنگر خمشی و نیروی محوری طولی کاهش می‌یابد و حتی در مورد نیروی محوری طولی در محدوده کشش قرار می‌گیرد، ولی روند افزایشی نیروی محوری از فاصله ۸ متری تا حفر کامل تونل شیب‌دار، ادامه خواهد یافت.

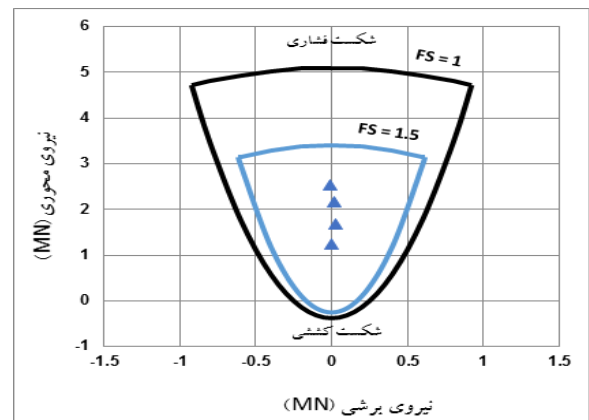
پ- بیشترین تاثیرات واکنشی در سیستم نگهداری تونل اصلی ناشی از حفاری تونل شیب‌دار، به ترتیب در دیواره چپ، دیواره راست و سقف تونل اتفاق می‌افتد.

ت- تنش‌های ایجاد شده بر روی سقف تقاطع در مقایسه با تنش‌هایی که بر روی دهانه منفرد قرار دارد کمی کوچک‌تراند در واقع بعد از حفر کامل تونل شیب‌دار یک ناحیه تنش‌زدایی شده در سقف تقاطع ایجاد می‌شود که نتایج حاصل از تجارب گذشته نیز حاکی از همین موضوع در است و علت اصلی این امر نیز به دلیل جابه‌جایی بیشتر سقف

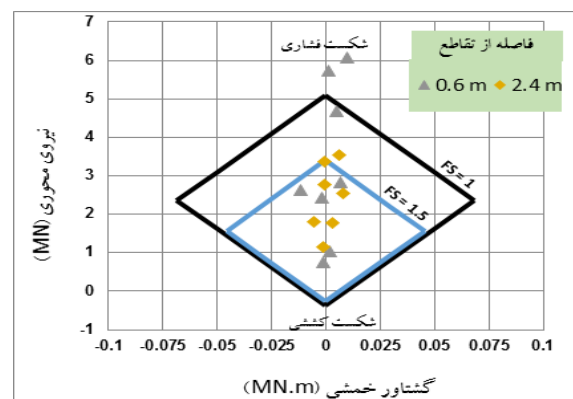
می‌شود از دو لایه مش $\phi 10$ در یک شبکه 10×10 ، استفاده شود (مقاومت کششی $\phi 10$ ، 0.3142 مگانیوتن است [۹، ۱۰].



شکل ۲۶: نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین لنگر خمشی و نیروی محوری شاتکریت قبل از حفر تونل شیب‌دار



شکل ۲۷: نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین نیروی برشی و نیروی محوری شاتکریت قبل از حفر تونل شیب‌دار



شکل ۲۸: نمودار ظرفیت نگهداری برای اثر متقابل بین لنگر خمشی و نیروی محوری شاتکریت بعد از حفر تونل شیب‌دار

۱۳- مراجع

- [1] Hasan, G. (1986). "Stability considerations for underground excavation intersections". Mining Science and Technology, 4(1): 49-57.
- [2] Ting-kan, L., Bao-hua, G., and Li-chao, C. (2008). "Numerical modeling for further understanding of roadway junction stability modeling at deep underground". Journal of Coal Science & Engineering, 14: 38-43.
- [3] Hoek, E., Carranza-Torres, C., and Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion". North American Rock Mechanics Society meeting, 7-10 July, Toronto, 267-273.
- [4] Jing, L. (2003). "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40: 283-353.
- [5] Barton N, and Bandis, S. (1990). "Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice". Proceedings of International Conference on Rock Joints, 4-6 June, Netherlands, Rotterdam: Balkema, 603-610.
- [6] Barla, G., and Barla, M. (2000). "Continuum or discontinuum modeling in tunnel engineering". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 52 (10): 567-576.
- [7] Bobet, A. (2010). "Numerical Methods in Geomechanics". The Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1B): 27-48.
- [8] Sakurai, S. (1993). "Back analysis in rock engineering comprehensive rock engineering". Tunnelling and Underground space Technology, 674: 51-67.
- [9] Carranza-Torres, C., and Diederichs, M. (2009). "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports". Tunnelling and Underground Space Technology, 24(5): 506-532.
- [10] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M. S., and Corkum, B. (2008). "Integration of geotechnical and structural design in tunneling". Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, 29 February, Minneapolis, 1-53.

در ناحیه تقاطع و آزادسازی بخشی از تنش‌ها است.
ث- چگالی تنش و در نتیجه نیروی محوری محیطی ایجاد شده در سیستم نگهداری، در گوشه‌های تقاطع (در فاصله ۰ تا ۰.۶ متری از محل تقاطع) بسیار زیاد است به همین دلیل شکل تقاطع برای کاهش چگالی تنش باید اصلاح شود. این کار را می‌توان با گرد کردن گوشه‌های تقاطع انجام داد.

ج- همچنین بر اساس نتایج به دست آمده اگر تقاطعی نیازمند به نگهداری اضافی باشد، باید این نگهداری اضافی از محل تقاطع با قدرت زیاد (سیستم نگهداری سنگین) شروع شده و در جهت دور شدن از محل تقاطع به تدریج کاهش یابد.

چ- با توجه به کرنش بحرانی در معیار ساکورایی حفر تونل تاثیر کمی بر روی کرنش نهایی تونل اصلی خواهد داشت.

ح- حفاری دهانه تونل شیب‌دار از سمت فضای باز (تونل اصلی) به سمت تونل اکتشافی فشار کمتری را به دیواره تقاطع وارد خواهد کرد.

خ- بنابراین با توجه به این نمودارها و میزان مقادیر اولیه و تغییرات نشان داده شده، دیواره سمت چپ دارای بحرانی‌ترین وضعیت است زیرا دارای مقادیر اولیه و تغییرات بالاتری است و در نتیجه اگر قرار باشد شکستی در سیستم نگهداری اتفاق افتد، ابتدا در این دیواره اتفاق خواهد افتاد.

۱۱- سپاس‌گزاری

تقدیر و سپاس فراوان از همه دوستان در شرکت مهندسان مشاور لانیز که زحمت فراوانی را متحمل شدند.

۱۲- ضمایم

نماد	واحد	شرح
ϵ_c	%	کرنش بحرانی
E	Kgf/cm ²	مدول تغییر شکل پذیری
N	N	نیروی محوری
M	N.m	لنگر خمشی
FS	-	فاکتور ایمنی
I	m ⁴	لنگر خمشی
A	m ²	سطح اعمال نیرو
t	M	ضخامت
σ	Pa	تنش
Q_{cr}	N	نیروی برشی بحرانی

^۱ Gercek
^۲ Ting-kan