

تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری تراز ۲۷۴۱ معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران

سجاد چهره قانی*^۱، حسین آزاد سولا^۲، حمید چاکری^۳ و آرش نوذری^۴

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۰۲

دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۱۳

چکیده

پایداری فضاهاى بزرگ زیرزمینی در استخراج معادن و تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده پس از حفاری از اهمیت خاصی در استخراج زیرزمینی مواد معدنی برخوردار می‌باشد. معدن سرب و روی انگوران در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان زنجان قرار دارد و بر اساس برنامه‌ریزی بعمل آمده، سالیانه حداقل ۱۲۰۰۰۰ تن استخراج کانسنگ از بخش زیرزمینی معدن انگوران انجام خواهد شد. کانسنگ موجود در این معدن از سه تیپ سنگی شامل کانسنگ سولفور، کربناته و نیز مخلوط سولفور و کربناته تشکیل شده است که سنگ کانسنگ سولفور بیشترین و کانسنگ کربناته نیز کمترین مقاومت را دارد. هدف از این تحقیق، تحلیل پایداری کارگاه‌ها و گالری تراز ۲۷۴۱ معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران می‌باشد تا بتوان ابعاد مناسب کارگاه و پایه‌ها را بدست آورده و تحکیمات لازم را نیز ارائه نمود که از روش عددی اجزا محدود جهت انجام تحلیل‌های مکانیک سنگی استفاده شده است. برای این منظور در دو حالت کانسنگ سولفور و اکسیده، ابعاد و تحکیمات مختلف کارگاه‌ها براساس مقایسه جابجایی‌های رخ داده در اطراف کارگاه‌ها با میزان کرنش‌های بحرانی و مجاز محاسبه شده از روابط ساکورایی تعیین شده است. نتایج تحلیل‌های انجام شده بر مبنای داده‌های ورودی نشان دهنده وضعیت مناسب پایداری در کانسنگ سولفور می‌باشد. تاثیر لنگه باقی‌مانده در کانسنگ سولفور برای دو عرض لنگه ۵ و ۱۰ متری بررسی شد و نتایج نشان داد که در کانسنگ سولفور در هر دو حالت کارگاه‌ها بدون سیستم نگهداری پایدار هستند. اما به دلیل ناپیوستگی‌ها موجود در سقف و قسمت‌هایی که میکس سولفور و اکسیده هستند، نیاز به سیستم نگهداری می‌باشد. در کانسنگ اکسیده و مخلوط، به دلیل ضعیف بودن خصوصیات سنگ بدون توجه به ابعاد لنگه حتما باید از سیستم نگهداری استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران، تحلیل پایداری، سیستم نگهداری، روش عددی المان محدود، معیار ساکورایی.

۱. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبات: s.chehreghani@urmia.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

۳. استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند

۴. دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

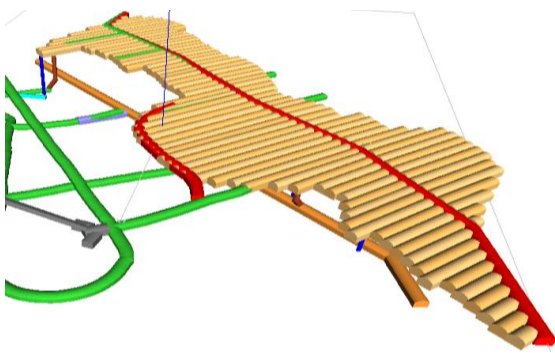
۱. مقدمه

حفر فضاهای زیرزمینی، از دیرباز بنا به دلایل مختلفی از جمله استخراج معادن و احداث نیروگاه‌های آبی، مورد توجه مهندسین بوده است. پایداری فضاهای بزرگ زیرزمینی، تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده پس از حفاری و راه‌های بهینه‌سازی حفاری از اهمیت خاصی در حفر فضاهای زیرزمینی برخوردار می‌باشد (قزوینی و قزوینیان، ۱۳۹۲). پایداری این سازه‌ها، به ابعاد و هندسه فضا، روش حفر و تعداد مراحل حفاری، شرایط تنش برجا و به سیستم نگهداری و زمان نصب آن بستگی دارد (بهزادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶). با پیشرفت سریع علوم کامپیوتر و مهندسی از جمله مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته، روش‌های تحلیلی و تئوریک به سرعت روتق یافت به طوری که امروزه با وجود کامپیوترهای با سرعت بالا و در دسترس بودن برنامه‌های آماده در این زمینه، می‌توان ادعا نمود که هر سازه زیرزمینی با هر مشخصه‌ای را می‌توان مدل کرده و قبل از اجرا، از نظر پایداری یا اعمال سیستم نگهداری تحلیل نمود (قزوینی و قزوینیان، ۱۳۹۲). غفوری و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از روش‌های تجربی RMR، Q و GSI و نیز روش عددی المان مجزا، سیستم نگهداری موقت تونل انتقال آب سد درونگر خراسان شامل پیچ‌سنگ، شاتکریت و قاب‌های فلزی را در چهار قطعه مختلف از تونل تعیین نمودند. در این مطالعه با انتقال از روش تجربی به روش عددی بر میزان دقت و اعتمادپذیری طراحی انجام شده، افزوده شد. معینی و همکاران (۱۳۸۹)، سیستم نگهداری محل تقاطع تونل‌های انتقال آب با مخازن ضربه‌گیر سد گتوند علیا را با استفاده از روش‌های تجربی و تفاضل محدود تعیین کردند و نشان دادند بعد از نصب سیسم نگهداری، میزان جابجایی ماکزیمم کمتر از مقدار جابجایی بحرانی ساکورایی است.

بخشنده و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش همگرایی-همجواری و معیار شکست هوک-براون به تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت با استفاده از نرم افزار

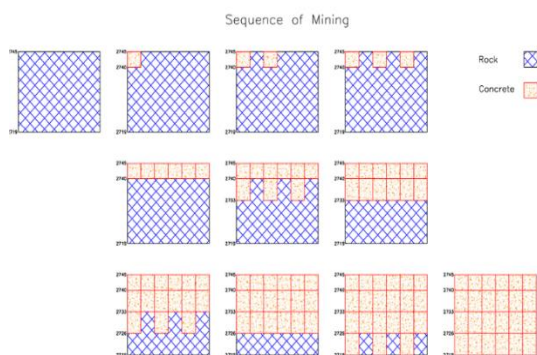
عددی مبتنی بر تفاضل محدود FLAC 3D پرداخته و کاربردی بودن معیار هوک و براون را نشان داده‌اند. ترکمانجو و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از روش کاهش مقاومت و مفهوم ضریب ایمنی، وضعیت پایداری جبهه‌کار در تونلسازی مکانیزه به روش فشار متعادل کننده زمین (EPB: Earth Pressure Balance) را در شرایط ناهمگن به کمک مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel و Phase2 بررسی و تحلیل نمودند. سبزواری و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل آب بر سد معشوره را انجام داده‌اند. ایشان در روش تجربی از دو روش Q و RMR و در تحلیل به روش عددی از نرم افزار phase ۲ که بر پایه اجزای محدود استوار است استفاده نموده‌اند و در نهایت نتایج حاصل از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی سیستم نگهدارنده مشابهی را ارائه داده است.

شریف زاده و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از سیستم های رده بندی توده سنگ و مدلسازی های عددی با نرم افزار UDEC که قابلیت انجام تحلیل در محیط های درزه دار و ناپیوسته را دارد وضعیت پایداری تونل باز کننده معدن زیرزمینی بوکسیت جاجرم را بررسی نموده و در نهایت سیستم نگهداری مناسب قاب های فولادی به فواصل یک متری به همراه لارده‌های بتنی پیشنهاد شده است. ترینس و جانسون (Trinh and Jonsson, 2013) طراحی پایداری اتاق‌های زیرزمینی طویل را در سنگهای سخت معدن کانوان با استفاده از روش طبقه‌بندی توده‌سنگ Q انجام داده و در ادامه با استفاده از روش مدل-سازی عددی اجزای محدود، نتایج طراحی سیستم نگهداری مورد تایید قرار گرفته است. اوزتورک (Ozturk C.A., 2013) سیستم نگهداری حفاریات بازکننده یک معدن زیرزمینی آسفالتیت را در کشور ترکیه با استفاده از روش طبقه‌بندی RMR و روش عددی اجزای محدود مورد طراحی و بررسی قرار داده است. در این تحقیق انتخاب روش نگهداری بر اساس طبقه‌بندی توده سنگ و تایید کفایت و پایداری آن با استفاده از روش عددی اجزاء محدود صورت گرفته است.



شکل ۱. پلان موقعیت کارگاه‌های تراز ۲۷۴۱ (شرکت تهیه و

تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۵)



شکل ۲. ترتیب استخراج و پرکردن کارگاه‌ها (شرکت تهیه و

تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۵)

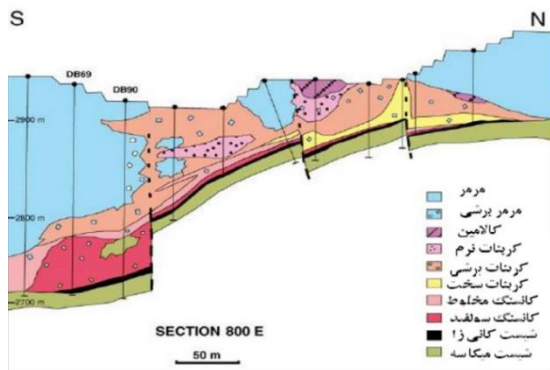
بدلیل انتخاب روش استخراج نواری (اتاق‌های طویل) می‌توان از فرض کرنش صفحه‌ای برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم نگهداری داخل اتاق‌ها استفاده کرد. بنابراین سیستم نگهداری موقت داخل اتاق‌های استخراجی و همچنین تونل‌های دسترسی به صورت دوبعدی مدل می‌گردد. به دلیل اینکه در روش استخراج ارائه شده، طبقات به توالی و از بالا استخراج و پر شده و عملاً کارگاهی که در بخش پایینی آن نیز در حال حفاری یا استخراج باشد یک تیر بتنی در سقفش وجود خواهد داشت؛ لذا تاثیر روش‌های متنوع دسترسی و استخراج مواد معدنی و پرکردن فضای استخراجی نیز به کمک مدل‌سازی دو بعدی در مقاطع بحرانی لحاظ شده است. در این تحقیق، برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری کارگاه‌های استخراج از روش عددی اجزا محدود (Finite Element Method) برای مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک

جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2019) طراحی سیستم نگهداری کارگاه‌های استخراج جبهه کار طولانی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزار FLAC 3D انجام و میزان جابجایی‌های رخ داده در کارگاه استخراج را پیش‌بینی کرده‌اند. بر این اساس داده‌های حاصل از پایش جابجایی دیواره، نتایج شبیه‌سازی عددی از اعتبار کافی برخوردار بوده است.

با توجه به اینکه بخشی از کارگاه‌های استخراج این تراز در زون اکسیدی و مخلوط اکسیدی-سولفیدی قرار دارد و براساس ویژگی‌های ژئومکانیکی این زونها امکان ناپایداری و ریزش کارگاه وجود دارد، هدف از این تحقیق، تحلیل پایداری کارگاه‌ها و گالری تراز ۲۷۴۱ معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران می‌باشد تا بتوان ابعاد مناسب کارگاه و پایه‌ها را بدست آورده و تحکیمات لازم را نیز ارائه نمود. معدن سرب و روی انگوران در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان زنجان قرار دارد و بر اساس برنامه‌ریزی بعمل آمده، سالیانه حداقل ۱۲۰۰۰۰ تن استخراج کانسنگ از بخش زیرزمینی معدن انگوران انجام خواهد شد. ماده معدنی بخش زیرزمینی بصورت توده‌ای است که ادامه ماده معدنی بخش روباز است و تا تراز ۲۷۰۰ ادامه دارد. حد روباز زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران، در تراز ۲۷۴۵ متر قرار دارد که دو بخش روباز و زیرزمینی را از یکدیگر جدا نموده است. با توجه به شرایط خاص معدن انگوران و اهمیت تولید ماده معدنی سرب و روی در کشور، استخراج حداکثری ماده معدنی (درصد بازیابی حداکثر) و حداکثری عیار، خصوصیات هندسی کانسار، خواص ژئومکانیکی ماده معدنی، سنگ در برگیرنده و ...، روش مناسب برای استخراج این معدن، اتاق و پایه نواری همراه با پرکردن پایین رو پیشنهاد شده است.

شکل (۱) موقعیت و ترتیب کارگاه‌های این تراز را مطابق با گزارش طراحی تفصیلی استخراج معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران نشان می‌دهد و در شکل (۲)، نمای کلی از ترتیب استخراج و پرکردن هر تراز نشان داده شده است (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۵).

بدلیل نبود اطلاعات کافی از وضعیت چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول یانگ توده سنگ و نیز مقاومت کششی کانسنگ‌های مختلف، از خروجی نرم افزار Roclab متناسب با شرایط معدن استفاده شده است.



شکل ۳. مقطع E ۸۰۰، توده معدنی انگوران و سنگ همبر با حالت استراتی فرم.

مصالح خاک و سنگ، مدل رفتاری موهر-کولمب به کار گرفته شده است.

۲. پارامترهای ژئومکانیکی معدن زیرزمینی انگوران

کانسار انگوران از نظر کیفی یکی از کانسارهای شاخص جهان به شمار می‌رود. این کانسار از سه بخش اکسیدی، سولفوری و مخلوط تشکیل شده است. بخش اکسیدی در بالاترین قسمت کانسار، بخش سولفوری در پایین‌ترین قسمت و بخش مخلوط بین آن دو قرار گرفته است (شکل ۳). پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده در مدلسازی از جمله: RQD (شاخص کیفی سنگ)، GSI (شاخص مقاومت زمین-شناسی)، مقاومت فشاری، از روی مغزه‌های بدست آمده از حفاری‌ها، خصوصیات درزه‌ها بدست آمده است (شرکت ایتوک ایران، ۱۳۸۶). جدول (۱) نشان‌دهنده پارامترهای توده‌های سنگ بدست آمده از گمانه‌ها است. شایان ذکر است که

جدول ۱. پارامترهای بدست آمده برای توده سنگ‌های بخش زیرزمینی معدن انگوران با استفاده از نرم افزار Roclab.

Geotechnical Type	Input data				Output data				
	D	mi	Density (gr/cm ³)	UCS (Mpa)	GSI	Tensile St (Mpa)	Em (MPa)	φ (Deg)	C (Mpa)
Marble	0.8	9	2.68	55	52	0.074	4992.67	40.3	0.426
Breccia carbonate	0.8	18	2.9	30	37	0.005	1554.93	33.77	0.254
Sulphide rock mass	0.8	18	3.43	40	55	0.035	5060	45.32	0.46
Oxide rock mass	0.8	10	2.81	5	17	0.0002	200.74	9.6	0.045
Mix(sulphide-oxide)	0.8	10	2.64	15	20	0.001	413.23	15.5	0.083
Schist	0.8	10	2.5	75	50	0.075	5196	42.6	0.469

محدوده‌های تقریبی ۰/۱ تا ۰/۲۵ متغیر باشد، توده سنگ به عنوان یک محیط ناپیوسته مورد بحث قرار می‌گیرد و برای گستره‌های خارج از این محدوده توده سنگ در محیط مکانیکی پیوسته مطرح می‌شود، هرچند که ممکن است ناهمسانگرد باشد.

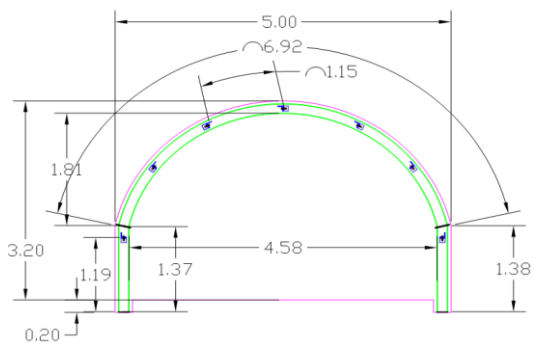
با عنایت به وضعیت ژئوتکنیکی معدن زیرزمینی انگوران، مناطق سولفور و کربناته به دلیل مقاومت کافی و شرایط تکتونیکی مناسب، رفتاری متناسب با محیط پیوسته و نیز مناطق کربناته نیز به دلیل مقاومت کمتر و ناپیوستگی‌های زیاد مشابه با محیط‌های خاکی و شبه پیوسته در نظر گرفته شد که

۳. مدل‌سازی و تحلیل پایداری کارگاه‌های تراز ۲۷۴۱

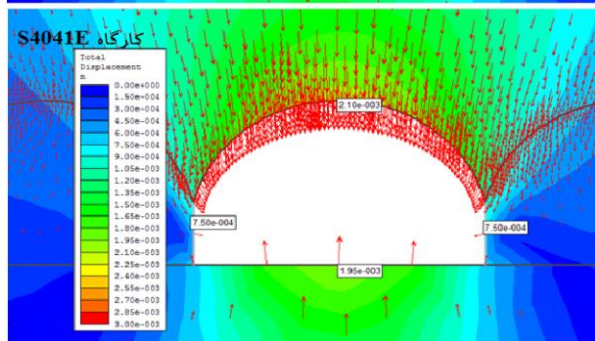
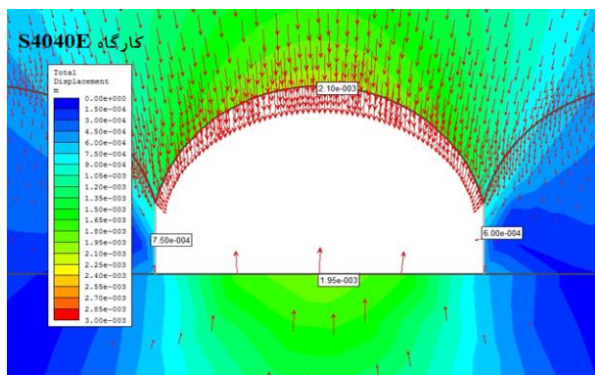
۱. مشخصات و ابعاد کارگاه‌های استخراج

مهندس مدل مورد نظر با توجه به روباره موجود، دارای ارتفاع ۱۲۲ و عرض ۱۵۶ متر می‌باشد. با توجه به اینکه ناپیوستگی‌ها نقش اساسی در تعیین پایداری یا عدم پایداری سازه زیرزمینی مورد نظر ایفا می‌کنند، لذا می‌بایست نرم افزار یا نرم افزارهایی انتخاب گردند که قابلیت مدلسازی محیط‌های ناپیوسته را دارا بوده و بتوانند گویای شرایط واقعی باشند. حد بین پیوستگی و ناپیوستگی یک محیط توسط محققین مختلفی مورد بحث قرار گرفته است. زمانی که نسبت فاصله داری به قطر تونل بین

به منظور تطبیق هرچه بیشتر نتایج مدل‌سازی با واقعیت در تراز ۲۷۴۱ ابتدا سه کارگاه S4030E، S4037E و S4044E که قبلاً در این تراز حفاری شده بودند را در مدل حفاری کرده و پس از اینکه مدل با توجه به شرایط مرزی و تنش‌های اعمالی به تعادل اولیه رسید با رعایت توالی استخراج کارگاه‌ها (Error! Reference source not found. ۲)، دو کارگاه S4034E و S4041E حفاری و جابجایی‌ها و توزیع تنش را قرائت شده است.



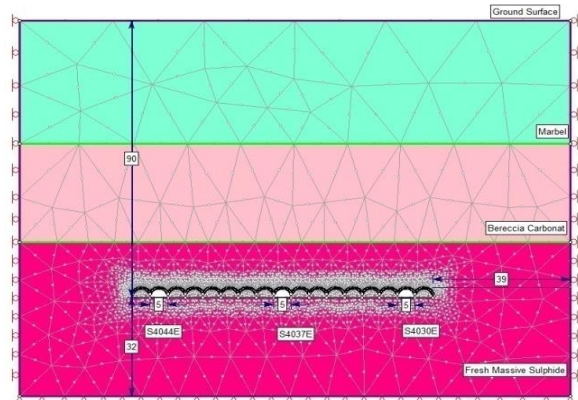
شکل ۵. مقطع کارگاه‌های استخراجی در بخش سولفور



شکل ۶. کانتورهای و بردارهای جابجایی اطراف دو کارگاه

S4041E و S4034E با لنگه ۱۰ متری.

بر این اساس از مدل‌سازی عددی اجزا محدود جهت شبیه‌سازی و تفسیر نتایج استفاده شده است. فاصله بین کارگاه استخراج و مرزهای مدل به منظور حذف اثرات مرزی مدل بیش از ۵ برابر عرض کارگاه در نظر گرفته شده است. مورد نظر دارای المان‌های مثلثی ۶ گرهی می‌باشد که المان‌های اطراف کارگاه به منظور بررسی دقیق‌تر تنش و جابجایی، ریزتر از سایر نقاط مدل هستند. تنش‌های قائم و افقی با توجه به عمق قرارگیری کارگاه و دانسیته متوسط سنگ روباره ($\gamma = 2.9 \text{ ton/m}^3$) و نسبت تنش افقی به قائم به مرزهای بالایی و کناری مدل اعمال می‌شود. رفتار توده‌سنگ اطراف الاستوپلاستیک فرض شده و از مدل رفتاری موهر-کولمب برای شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل (۴) هندسه مدل، کلاس‌بندی توده‌سنگ و مش‌بندی مدل در محیط مدل‌سازی عددی اجزای محدود را نشان می‌دهد.



شکل ۴. هندسه مدل، کلاس‌بندی توده‌سنگ اطراف، هندسه

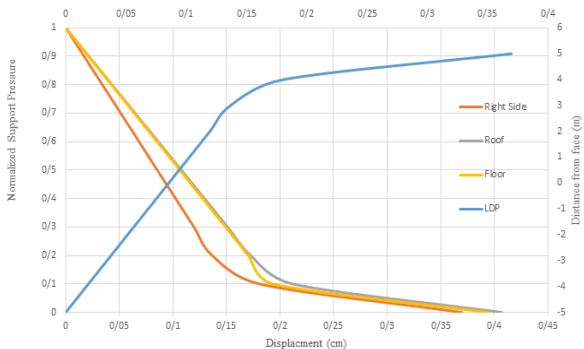
کارگاه‌ها، مش‌بندی و مرزهای مدل در تراز

۲.۳. تحلیل پایداری بخش کانسنگ سولفور

بخش اعظمی از کارگاه‌های تراز ۲۷۴۱ در کانسنگ سولفور قرار دارند. به منظور بررسی پایداری کارگاه‌ها در بخش سولفور تراز ۲۷۴۱، دو مدل با ابعاد پایه ۵ و ۱۰ متری مدل شده است. در شکل (۵) مشخصات و ابعاد کارگاه‌های استخراجی و پایه‌ها در تراز ۲۷۴۱ در کانسنگ سولفور نشان داده شده است. عرض و تعداد اتاق‌ها و پایه‌ها بمنظور تحلیل در بدترین شرایط انتخاب شده است.

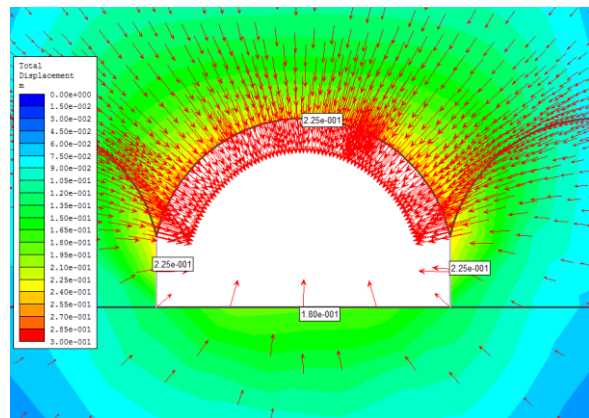
مشخصات ذکر شده برای توده سنگ بدست می‌آید. با توجه به انتخاب گام حفاری متوسط یک متری همگرایی در فاصله یک متری از سینه‌کار نیز از روی پروفیل تغییر شکل طولی تونل (LDP) بدست می‌آید. سپس در منحنی GRC با توجه به میزان همگرایی بدست آمده مقدار آزادشدگی تنش متناسب با آن را مشخص کرده و پس از اعمال تریخص تنش تعیین شده، سیستم نگهداری که با استفاده از المان سازه‌ای (ترکیبی از المان تیر، بتن و مش) شبیه سازه‌ای شده، نصب می‌گردد سپس مقدار تنش باقیمانده نیز آزاد شده و در انتها کل مدل تحت تحلیل مکانیکی قرار می‌گیرد و نتایج تحلیل در قالب نمودارهای (نیروی محوری-گشتاور خمشی) و (نیروی محوری-نیروی برشی) برای سیستم نگهداری بررسی می‌گردد.

منحنی GRC بدست آمده برای سقف و کف و دیواره کارگاه به همراه منحنی پروفیل جابجایی طولی تونل (منحنی مذکور با فرض دایروی بودن تونل- با شعاع معادل- فقط برای ترسیم پروفیل جابجایی شعاعی تونل در طول آن ساخته شده است). در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

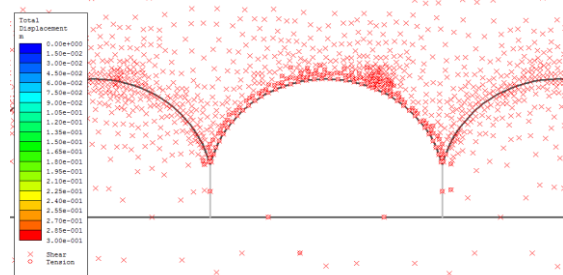


شکل ۱۲. منحنی پاسخ زمین به همراه پروفیل جابجایی طولی کارگاه در کانسنگ اکسیده تراز ۲۷۴۱.

با توجه به نیاز استفاده از سیستم نگهداری در بخش اکسیده و همچنین انتخاب نوعی از سیستم نگهداری که قابل بازیابی باشد تا در زمان پرکردن کارگاه بتوان به راحتی سیستم نگهداری موجود در کارگاه را بازیابی نمود لذا استفاده از قاب فولادی به همراه لارده بتنی (که در اکثر فضاها حفاری شده



شکل ۱۰. کانتورها و بردارهای جابجایی اطراف یک کارگاه حفاری شده در کانسنگ اکسیده تراز ۲۷۴۱.

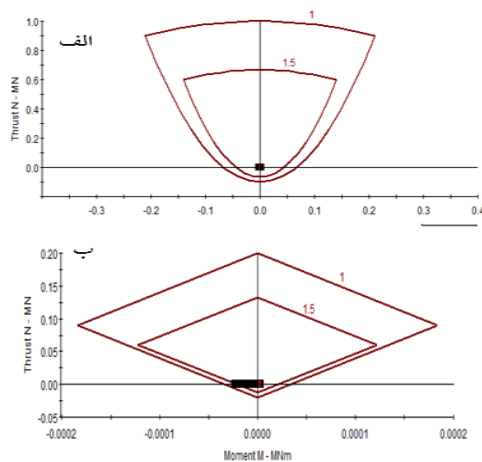


شکل ۱۱. ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف یک کارگاه حفاری شده در کانسنگ اکسیده تراز ۲۷۴۱.

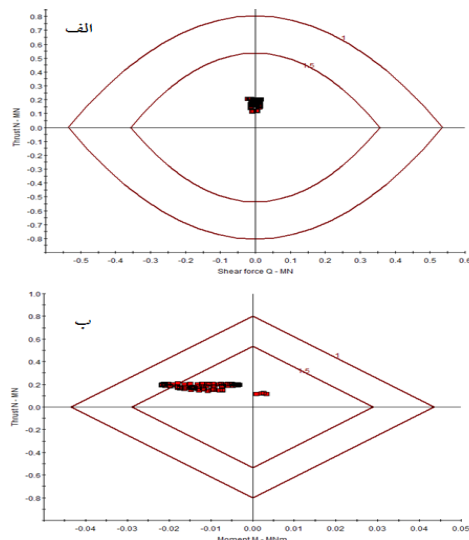
در این بخش کارگاه‌ها حفاری و نگهداری می‌شود. سپس در مرحله بعدی سیستم نگهداری آن برداشته شده و با بتن پر شده و با فرض رسیدن بتن به مقاومت نهایی خود کارگاه کناری آن استخراج و پایدارسازی می‌شود. به منظور بررسی تاثیر حفر کارگاه مجاور و لنگه بین آنها، حفر و نگهداری کارگاه مجاور که پس از پر شدن کارگاه نزدیک آن صورت می‌گیرد، شبیه‌سازی شده است.

با توجه به اینکه نصب سیستم نگهداری بلافاصله پس از حفر صورت نمی‌گیرد و در این مدت مقدار زیادی از تنش‌های اطراف کارگاه آزاد می‌شود لذا به منظور داشتن معیاری برای ارزیابی کارگاه در حین حفاری و زمان نصب سیستم نگهداری، از روش همگرایی-همجواری (Convergence-Confinement method) استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا منحنی پاسخ زمین (GRC: Ground Reaction curve)، شعاع زون پلاستیک و ماکزیمم همگرایی تونل، با توجه به

به منظور ارزیابی کارایی و ایمن بودن سیستم نگهداری از دو نمودار (نیروی محوری-گشتاور خمشی) و (نیروی محوری-نیروی برشی) که به دیاگرام ظرفیت باربری معروف هستند استفاده می‌شود. از این دو نمودار بطور گسترده در طراحی بتن، سازه‌های مهندسی و همچنین سیستم نگهداری تونل استفاده می‌شود. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمودارهای (نیروی محوری-گشتاور خمشی) و (نیروی محوری-نیروی برشی) با توجه به پارامترهای ذکر شده برای قاب فولادی و لارده بتنی و بارهای وارد بر آنها را در ضرایب اطمینان ۱ و ۱/۵ نشان می‌دهد.

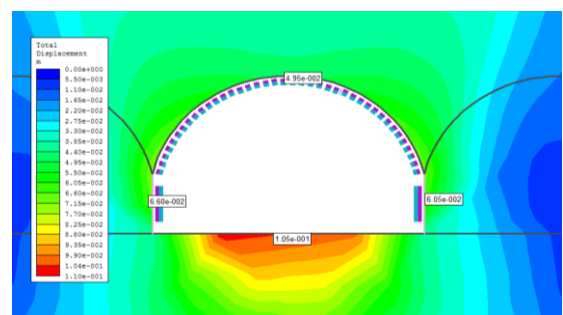


شکل ۱۵. نمودارهای الف: نیروی محوری-نیروی برشی و ب: نیروی محوری-گشتاور خمشی برای لارده بتنی.

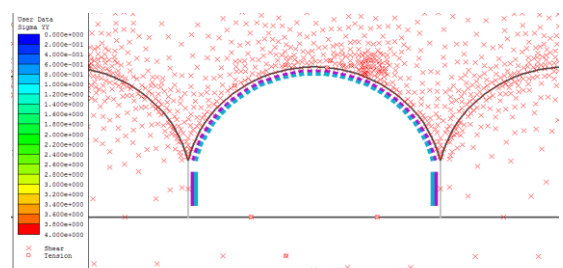


شکل ۱۶. نمودارهای الف: نیروی محوری-نیروی برشی و ب: نیروی محوری-گشتاور خمشی برای قاب فولادی.

در کانسنگ اکسیده و میکس اکسیده و سولفور لازم است) جهت طراحی سیستم نگهداری کارگاه‌ها و بازکننده‌ها مد نظر قرار گرفت. پس از آزمون قاب‌های فولادی با فواصل مختلف و با در نظر گرفتن نوع توده‌سنگ در نهایت سیستم نگهداری کارگاه استخراج به صورت قاب فولادی IPE160 و لارده بتنی با ضخامت ۵ سانتی متر و طول ۱۱۰ سانتی متر طراحی شده است. فاصله‌داری قاب‌های فولادی با توجه به محاسبات و مدل‌سازی‌های انجام شده در بخش اکسیده ۱ متر در نظر گرفته شد که این مقدار برای تمام بخش‌های مدل-سازی یکسان می‌باشد و پیش‌بینی شده است که در مناطق گسل‌خورده و بسیار ریزشی، این فاصله کمتر از ۱ متر باشد. مقدار جابجایی‌ها، ناحیه پلاستیک اطراف تونل پس از نصب سیستم نگهداری به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که پس از نصب سیستم نگهداری میزان جابجایی‌ها به نصف مقدار اولیه می‌رسد و حداکثر جابجایی‌ها پس از نصب سیستم نگهداری حدود ۹ سانتی‌متر می‌باشد که در سقف کارگاه اتفاق می‌افتد.

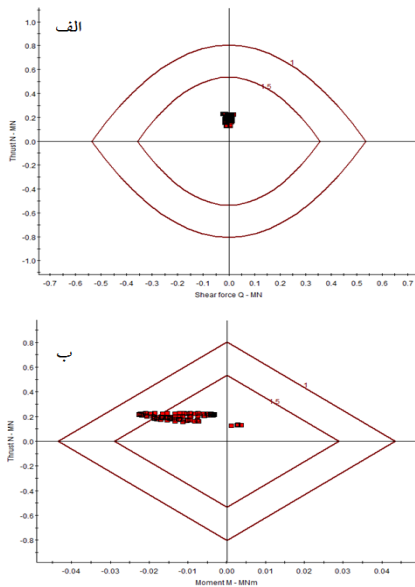


شکل ۱۳. جابجایی اطراف کارگاه پس از نصب سیستم نگهداری قاب فولادی به همراه لارده بتنی.

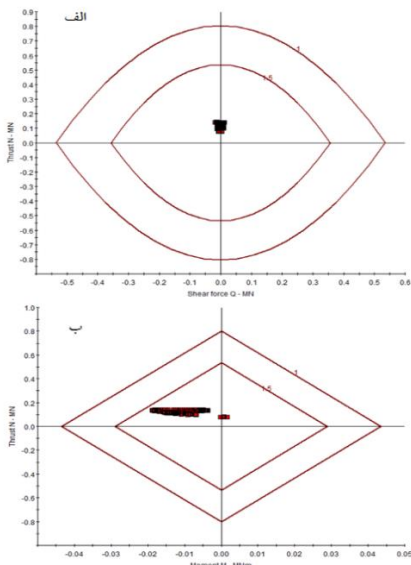


شکل ۱۴. ناحیه پلاستیک اطراف تونل بعد از نصب سیستم نگهداری.

همان طور که مشخص است نمودارهای مربوط به سیستم نگهداری برای دو کارگاه با فاصله داری قاب ۱ متری مناسب نیست و با کم کردن فاصله قاب‌ها به ۸۰ سانتی‌متر، فاکتور ایمنی سیستم نگهداری در محدوده مناسب‌تری قرار می‌گیرد.



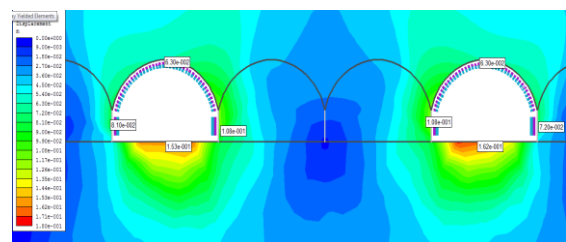
شکل ۱۹. نمودارهای الف: نیروی محوری-نیروی برشی و ب: نیروی محوری-گشتاور خمشی قاب فولادی با فاصله ۱ متر.



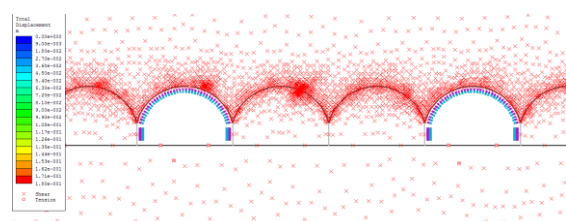
شکل ۲۰. نمودارهای الف: نیروی محوری-نیروی برشی و ب: نیروی محوری-گشتاور خمشی قاب فولادی با فاصله داری ۰/۸ متر.

در این نمودارها مقدار ضریب اطمینان، معرف محدوده‌ای است که اگر نقاط ترسیم شده برای نیروهای داخلی در این محدوده قرار گیرند، نشان دهنده پایدار بودن سیستم نگهداری است. لازم به ذکر است در نمودارهای ظرفیت باربری بدست آمده، تاثیر تودلی‌ها که قاب‌های فولادی را بهم متصل می‌کنند در نظر گرفته نشده است. موارد گفته شده باعث افزایش ظرفیت باربری سیستم نگهداری می‌شود لذا در تحلیل نمودارهای مذکور می‌بایست مورد توجه قرار گیرند. با توجه به نمودارهای نشان داده شده ملاحظه می‌شود تمام نقاط مربوط به لارده بتنی داخل محدوده ضریب اطمینان ۱/۵ قرار دارند که نشان دهنده مناسب بودن سیستم نگهداری است. برای قاب فولادی نیز نمودارهای مذکور در ضریب اطمینان ۱/۵ نشان دهنده کافی و پایدار بودن سیستم نگهداری می‌باشد.

در صورتی که در کانسنگ اکسیده دو کارگاه با لنگه ۱۰ متری و با تاخیر (حفر کارگاه جدید بعد از اتمام حفاری کارگاه اول) حفاری شوند میزان جابجایی‌ها و زون پلاستیک و نمودار نیروی محوری-نیروی برشی و نمودار نیروی محوری-گشتاور خمشی سیستم نگهداری آنها به ترتیب به صورت شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ خواهد بود.

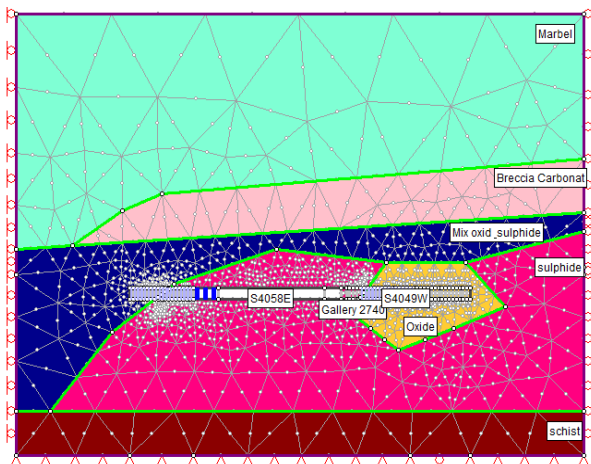


شکل ۱۷. جابجایی ناشی از حفاری دو کارگاه با تاخیر در کانسنگ اکسیده تراز ۲۷۴۱.

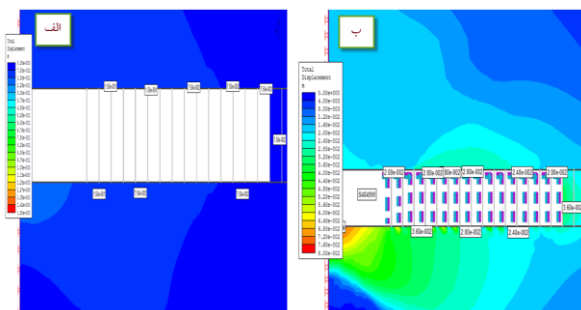


شکل ۱۸. زون پلاستیک ناشی از حفاری دو کارگاه با تاخیر در کانسنگ اکسیده تراز ۲۷۴۱.

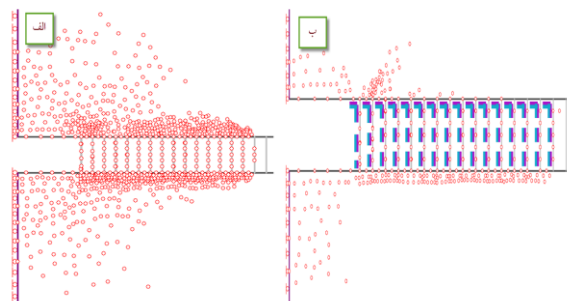
در صورتیکه این امر مانع از پیشروی کار شود، پیشنهاد می‌گردد که از مش‌های فولادی جهت کف‌بندی استفاده شود.



شکل ۲۱. هندسه مدل، کلاس‌بندی توده‌سنگ اطراف، مش-بندی و مرزهای مدل در مقطع عرضی کارگاه S4058E و S4049W.



شکل ۲۲. جابجایی مقطع عرضی کارگاه S4049W الف: قبل و ب: بعد از نصب سیستم نگهداری.



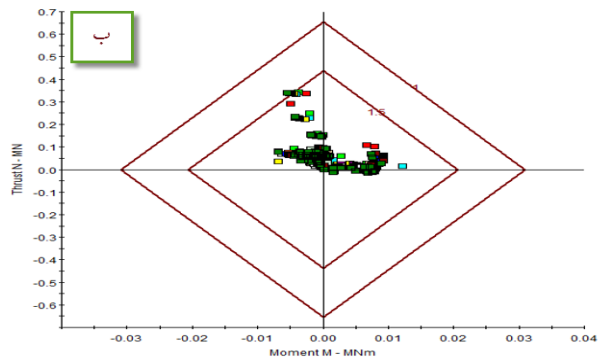
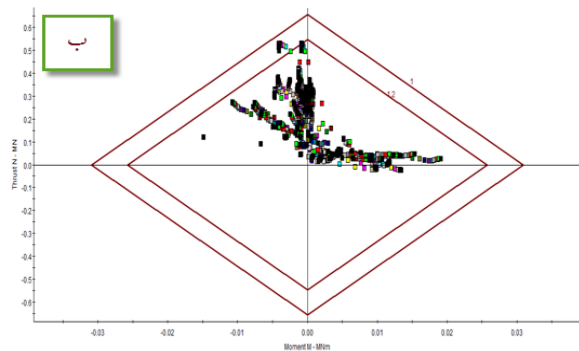
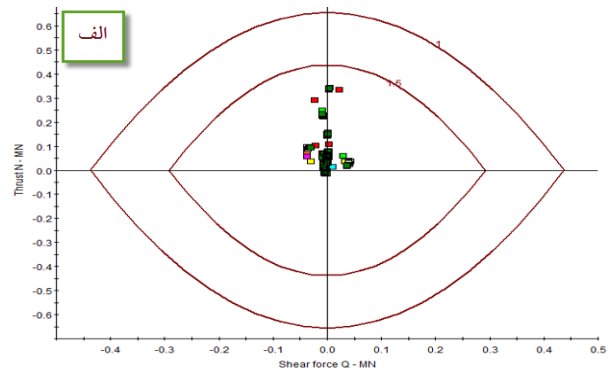
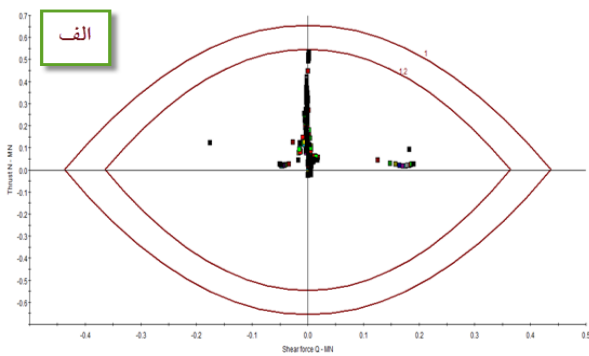
شکل ۲۳. ناحیه پلاستیک مقطع عرضی کارگاه S4049W الف: بدون سیستم نگهداری و ب: با سیستم نگهداری

لازم به ذکر است که با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده امکان استخراج همزمان دو کارگاه مجاور با حفظ لنگه ۱۰ متری بین آنها با توجه به شرایط توده‌سنگی بسیار ضعیف بلوک، امکان‌پذیر نمی‌باشد و لنگه بین دو کارگاه دچار شکست می‌شود. لذا می‌بایست پس از پرکردن کارگاه مجاور آن اقدام به حفاری کارگاه نمود. در صورت استخراج همزمان دو کارگاه می‌بایست حداقل فاصله بین آنها بیشتر از ۱۵ متر باشد.

۳.۴. تحلیل پایداری دو کارگاه روبروی هم در بخش کانسنگ اکسیده

به منظور بررسی پایداری دو کارگاه روبروی هم نیز مقطع عرضی عمود بر گالری ۲۷۴۱ در نظر گرفته شد که در آن دو کارگاه (S4058E و S4049W) روبروی هم قرار دارند و در حال استخراج هستند. مدل‌سازی کارگاه‌های مذکور با توجه به زمان حفاری این دو کارگاه در واقعیت (حفاری گرفته است). انجام شد (شکل ۲۱) و سیستم نگهداری نصب شد نتایج حاصل از مدل‌سازی این دو کارگاه نیز به ترتیب در شکل‌های ۲۲ تا ۲۷ آورده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است بیشترین جابجایی‌ها و تمرکز تنش‌ها در انتهای دو کارگاه مذکور و در بخش اکسیده و ترکیب اکسیده و سولفور قرار دارد که این جابجایی‌ها با نصب به موقع سیستم نگهداری قاب فولادی و لارده بتنی کنترل می‌شود.

در خصوص جابجایی رخ داده در کف تونل در کانسنگ اکسیده شایان توجه است که کارگاه‌های حفاری شده بصورت موقت خالی می‌مانند و حداکثر شش ماه پس از استخراج در برنامه پر کردن قرار می‌گیرند و در زمان پرکردن نیز با نظر کارگروه مکانیک سنگ کارگاه حداکثر تجهیزات نگهداری ممکن بازیابی و جمع‌آوری می‌شوند. با توجه به اینکه روش استخراج این معدن بصورت پایین‌رو می‌باشد و این آماس در تراز پایینتر استخراج قوس سقف را ایجاد خواهد نمود، می‌توان از جابجایی‌های کف کارگاه چشمپوشی کرد و



شکل ۲۷. نمودارهای الف: نیروی محوری-نیروی برشی و ب: نیروی محوری-گشتاور خمشی قاب فولادی کارگاه S4058E.

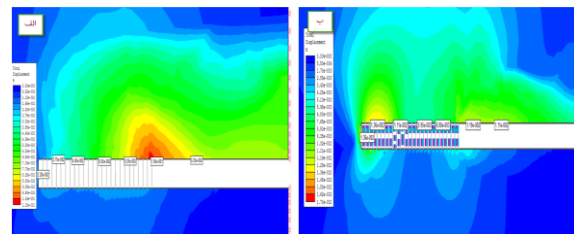
شکل ۲۴. نمودارهای الف) نیروی محوری-نیروی برشی و ب) نیروی محوری-گشتاور خمشی قاب فولادی کارگاه S4049W.

۴. اعتبارسنجی نتایج با معیار ساکورایی

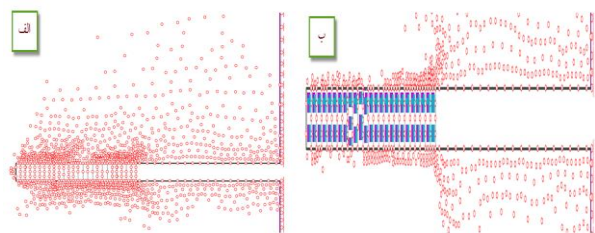
پس از تعیین میزان جابجایی‌ها و نیز ضخامت ناحیه پلاستیک کارگاه‌های تراز ۲۷۴۱، وضعیت پایداری تونل با استفاده از ترازهای هشدار خطر در اطراف تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. فلذا در این روش برای بررسی پایداری سازه، مقدار تراز هشدار خطر تعیین و با مقادیر بدست آمده از نرم‌افزارهای عددی مقایسه می‌گردد. اگر مقدار تعیین شده، از سطح هشدار خطر کمتر باشد، سازه پایدار است. استفاده از کرنش بحرانی (مجاز) یکی از روش‌هایی است که با آن جابجایی اندازه‌گیری شده در تونل‌ها مثل نشست تاج و همگرای را می‌توان بررسی کرد. کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. کرنش بحرانی با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌شود (Sakurai, S., 1997).

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1)$$

که در این رابطه:



شکل ۲۵. جابجایی مقطع عرضی کارگاه S4058E الف: قبل و ب: بعد از نصب سیستم نگهداری.



شکل ۲۶. ناحیه پلاستیک مقطع عرضی کارگاه S4058E الف: بدون سیستم نگهداری و ب: با سیستم نگهداری.

σ_c : مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ (MPa)

E: مدول یانگ توده سنگ (MPa)

ε_c : کرنش بحرانی بر حسب درصد هستند.

ساکورایی (۱۹۹۷) با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و داده های صحرائی، رابطه بین کرنش بحرانی و مقاومت فشاری و مدول یانگ را بدست آورد و سه تراز هشدار خطر به صورت زیر ارائه داد:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{I تراز هشدار خطر}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{II تراز هشدار خطر}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{III تراز هشدار خطر}$$

که در این رابطه، E مدول یانگ بر حسب MPa می باشد. ساکورایی تراز هشدار خطر II را به عنوان مبنای طراحی تونل ها پیشنهاد کرده است و ترازهای هشدار خطر I و III به عنوان دو حد بالایی و پایینی برای پایداری تونل ها بر اساس کرنش مجاز می باشد (Sakurai, S., 1997). در این تحقیق از

تراز هشدار II جهت تحلیل پایداری استفاده شده است. با تعیین کرنش بحرانی و با استفاده از رابطه ۵ جابجایی مجاز کارگاه ها بدست خواهد آمد:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (5)$$

که در این رابطه:

a: شعاع معادل کارگاه

u_c : حداکثر جابجایی سقف یا دیواره هستند.

مقادیر جابجایی های مجازی که بر اساس تراز هشدار خطر II و رابطه او ۵ قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری بدست آمد، برای کارگاه های مختلف به تفکیک در جدول (۲) ارائه شده است. که در اینجا کرنش مجاز معیار ساکورایی بصورت $\varepsilon_{\text{مجاز}} = \frac{\sigma_c}{E}$ و کرنش گسیختگی حاصل از مدل عددی به صورت $\varepsilon_{\text{II}} = \frac{U_{\text{max}}}{\text{دهانه معادل}}$ هستند.

جدول ۲: نتایج روابط ساکورایی برای کارگاه های گالری ۲۷۴۱.

Extraction model	Permitted strain of Sakurai criteria	Failure strain without support (numerical modelling)	Failure strain with support (numerical modelling)	support	
Sulfide ore	Pillar width 10 m	0.008	0.0009	-	without support
	Pillar width 5 m	0.008	0.00048	-	without support
Oxidized ore	One stope	0.025	0.045	0.0132	Steel set IPE 160 and concrete lagging (spacing 1 m)
	Two stopes 10 m pillar	0.025	0.062	0.0216	Steel set IPE 160 and concrete lagging (spacing 1 m)

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

کانسنگ اکسیده قرار دارند، به صورت دو بعدی با نرم افزار Phase 2D ver8.03 تحلیل و مدل سازی شده است. به منظور تحلیل و طراحی سازه نگهدارنده فضاهای زیرزمینی مختلف، مشخصات توده سنگ های دربرگیرنده هر بخش از داده های ژئومکانیکی سنگ های منطقه که با توجه به اطلاعات حفريات و گمانه های موجود می باشد استخراج شده است. بیشترین

یکی از مهم ترین موارد در زمان استخراج ماده معدنی، اطمینان یافتن از پایداری کارگاه استخراج می باشد. نکته بسیار مهم در زمینه نگهداری کارگاه، کوتاه بودن دوره بهره برداری از آن می باشد، لذا سیستم های نگهداری می بایست با حداقل ضرایب ایمنی مجاز طراحی شوند. در این تحقیق یکی از مقاطع حساس و بحرانی کارگاه های تراز ۲۷۴۱ که در

تا ۱۵ سانتی متر استفاده شده است. بدیهی است که در سازه هایی مانند تونلهای انتقال آب، با طول عمر بالا و حساسیت بالاتر، ضریب ایمنی بالاتر و سیستم نگهداری سنگین تری انتخاب شده است و برای مواردی مانند کارگاههای استخراج معادن که طول عمر کمتری خواهند داشت و یا در ادامه عملیات پر یا تخریب خواهند شد از ضریب اطمینان کمتر و نگهداری سبکتری استفاده شده است. با توجه به اینکه سیستم های نگهداری شاتکریت و بولت برای رسیدن به مقاومت نهایی نیاز به زمان دارند و این امر می تواند منجر به ریزش و تخریب در زونهای سست شود، برای این معدن سیستم قاب های فولادی برای نگهداری پیشنهاد شده است. نتایج تحلیل های انجام شده بر مبنای داده های ورودی نشان دهنده وضعیت مناسب پایداری در کانسنگ سولفور می باشد. تاثیر لنگه باقی مانده در کانسنگ سولفور برای دو عرض لنگه ۵ و ۱۰ متری بررسی شد و نتایج نشان داد که در کانسنگ سولفور در هر دو حالت کارگاهها بدون سیستم نگهداری پایدار هستند. اما به دلیل ناپیوستگی ها موجود در سقف و قسمت هایی که میکس سولفور و اکسید هستند، نیاز به سیستم نگهداری می باشد. در کانسنگ اکسید و مخلوط، به دلیل ضعیف بودن خصوصیات سنگ بدون توجه به ابعاد لنگه حتما باید از سیستم نگهداری استفاده نمود.

روباره لحاظ شده در این تحلیل ها با توجه به تحلیل هر بخش لحاظ شده است. با توجه به اینکه توده سنگ غالب دربرگیرنده کانسنگ اکسید و شیستی از نوع ضعیف و ریزشی می باشد لذا بنابر تحلیل و طراحی های انجام شده و به لحاظ سهولت در اجرای یکسان کارگاههای استخراجی و حفظ شرایط کاری ایمن، گالری ها و کارگاههای بلوک با گام پیشروی یک متری حفاری شده و پایداری می شوند. روند استخراج مذکور به ترتیب با استخراج کارگاههای تراز ۲۷۴۱ شروع شده و پس از پر کردن فضای استخراج شده با بتن (شرط ادامه فعالیت در طبقه بعدی، رسیدن مقاومت بتن به مقدار طراحی می باشد) در ادامه استخراج کارگاههای تراز ۲۷۳۷ استخراج و مجدداً با بتن پر شده و این روند برای طبقات زیرین ادامه پیدا می کند. در هنگام برخورد با زون های ضعیف، برای جلوگیری از گسترش زون پلاستیک و ناپایدار و در نتیجه ریزش سینه کار حتماً بایستی فضای پشت قاب بطور کامل و توسط مصالح مناسب (از جمله پوکه معدنی) پر شود. با بررسی تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری در پروژه های مختلف شامل تونلهای طویل انتقال آب و یا کارگاههای استخراج نواری مشاهده می شود که در اغلب موارد از سیستم نگهداری ترکیبی میل مهار به طول ۴ تا ۷ متر و با فاصله داری منظم ۱/۵ تا ۲/۵ متر و شاتکریت مسلح یا غیر مسلح به ضخامت ۵

منابع

- بخشنده امنیه، ح.، طایی سمیرمی، س.، رحیمی دیزجی، م.، پیرمردیان، ح.، ۱۳۹۳. تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت با روش همگرایی - همجواری و معیار شکست هوک - براون. زمین شناسی مهندسی (انجمن مهندسی زمینشناسی ایران)، ۷، شماره ۱ و ۲، ۸۳-۹۲.
- بهزادی نژاد، ح.، فرامرزی، ل.، داربر، م.، ۱۳۹۶. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت محل انشعاب تونل های پستاک از تونل انتقال آب سد رودبار لرستان با استفاده از نرم افزار FLAC 3D. مجله روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۷ (شماره ۱۳)، ۱۱۳-۱۲۳.
- ترکمان جو، ک.، نجفی، م.، قلیچ زاده، ج.، مهرنهاد، ح.، ۱۳۹۷. برآورد حداقل فشار نگهدارنده جبهه کار ناهمگن تونلسازی مکانیزه با استفاده از روش های تحلیلی و عددی، مطالعه موردی: مترو تهران، خط ۷، نشریه زمین شناسی مهندسی (انجمن مهندسی زمینشناسی ایران)، ۱۱، ۳، ۴۷-۶۰.
- سبزواری ده کیود، ب.، فلاح، ا.، مشرفی فر، م. و امامی، ع.، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل آب بر سد معشوره. نشریه زمین شناسی مهندسی (انجمن مهندسی زمین شناسی ایران)، ۱۰، شماره ۱ و ۲، ۹۷-۱۱۱.

شرکت ایتوک ایران، ۱۳۸۶. گزارش پیشرفت کار شماره ۴ پروژه مکانیک سنگ معدن انگوران زنجان، مطالعات مکانیک سنگ در معدن روباز سرب و روی انگوران.

شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۹۵. طراحی تفصیلی استخراج معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران.

شریف زاده، م.، شهریار، ک. و اشرفی، ع.، ۱۳۸۷. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل بازکننده معدن زیرزمینی بوکسیت جاجرم، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، دانشگاه تهران.

غفوری، م.، لشکری پور، غ.، طریق ازلی، ص.، ۱۳۸۷. ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی توده های سنگ مسیر تونل انتقال سد درونگر جهت طراحی سیستم نگهدارنده. نشریه زمین شناسی مهندسی - انجمن زمین شناسی، شماره ۱، ۱-۱۴.

قزوینی، م.، قزوینیان، ع.، ۱۳۹۲. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل های آب بر سد گتوند علیا. "مجله زمین شناسی ژئوتکنیک (زمین شناسی کاربردی، دوره ۹، شماره ۲، ۱۲۳-۱۳۳).

معینی، ع.، حسینی، م.، شریفی بروجردی، م.، ابتکار، ا.، ۱۳۸۹. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تقاطع تونل های آب بر با مخازن ضربه گیر سد گتوند علیا، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، 5(10)، 91-96.

Jiang, L., Kong, P., Shu, J. and Fan, K., 2019. "Numerical analysis of support designs based on a case study of a longwall entry". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9), pp.3373-3384.

Ozturk, C. A., 2013, "Support design of underground openings in an asphaltite mine." *Tunnelling and Underground Space Technology* n.38, pp. 288-305.

Sakurai, S., 1997, "Lessons learned from field measurements in tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12 (4): 453-460.

Trinh, N. and Jonsson, K., 2013, "Design considerations for an underground room in a hard rock subjected to a high horizontal stress field at Rana Gruber, Norway". *Tunnelling and underground space technology*, 38, pp.205-212.