

بررسی تأثیر تنش‌های برجا بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها در مغارهای زیرزمینی

محسن صالحی^۱، حمیدرضا نجاتی^{۲*}، کامران گشتاسبی^۳

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۷/۱۵

دریافت مقاله: ۹۶/۰۳/۰۴

چکیده

امروزه ساخت سازه‌های بزرگ زیرزمینی نظیر مغارها افزایش یافته است. حفاری و ساخت مغارها در اعماق زمین باعث می‌شود میدان تنش به طور موضعی به هم خورده و توزیع جدیدی از تنش‌ها در سنگ دربرگیرنده مغار به وجود آید و پایداری مغار را تحت تأثیر خود قرار دهد. برای پایداری مغار از سیستم‌های مختلف نگهداری استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها تاندون‌ها می‌باشند. تاندون‌ها تحت بار پیش‌تندگی قرار گرفته و عمل نگهداری را انجام می‌دهند. با توجه به فرار گرفتن مغارها در اعماق مختلف و نسبت تنش‌های متفاوت، اثر تاندون‌ها بر پایداری و کاهش جابه‌جایی‌های دیواره مغار متفاوت خواهد بود. در این تحقیق مغار نیروگاه سد راغون در تاجیکستان مورد بررسی قرار گرفته است که برای پایداری آن از سیستم نگهداری بتن برجا، داول و تاندون استفاده شده است. این مغار در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین قرار دارد. برای بررسی اثر تنش‌های برجا بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها، مغار مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار $Flac^{2D}$ شبیه‌سازی شده است. پس از بررسی پایداری مغار راغون و مقایسه نتایج آن با اطلاعات ثبت شده توسط ابزار دقیق، تأثیر تنش‌های برجا بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور مغار مورد مطالعه در عمق‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری و نسبت تنش‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در مقابل مقدار بار پیش‌تندگی -های مختلف بر میزان جابه‌جایی و همگرایی دیواره مغار مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه و بررسی نتایج حاصل از روش عددی نشان می‌دهد که با کاهش عمق، اثر تاندون‌های تحت بار پیش‌تندگی بر کاهش جابه‌جایی دیواره مغار افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش نسبت تنش، استفاده از تاندون‌های تحت بار پیش‌تندگی موثرتر بوده و جابه‌جایی دیواره مغار با نسبت بیشتری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش نیروی پیش‌تندگی تاندون‌ها در اعماق زیاد (بیش از ۴۰۰ متر) تأثیر چندانی بر کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار ندارد و توصیه می‌شود در چنین شرایطی تاندون‌ها با کمترین مقدار پیش‌تندگی نسب شوند.

کلید واژه‌ها: فضای زیرزمینی، مغار، تاندون، تنش برجا، نسبت تنش، $Flac^{2D}$

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ استادیار گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، h.nejati@modares.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* مسوول مکاتبات

۱. مقدمه

امروزه احداث سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها و فضا‌های بزرگ زیرزمینی از جمله مغارهای نیروگاهی افزایش چشمگیری یافته است. سنگ‌هایی که در اعماق زمین قرار گرفته‌اند تحت تأثیر تنش‌های ناشی از وزن لایه‌های بالایی و تنش‌هایی که منشأ تکتونیکی دارند قرار می‌گیرند. در اثر حفاری توزیع جدیدی از تنش‌ها در توده سنگ اطراف فضای حفاری شده به وجود می‌آید و پایداری آن را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Hoek et al., 2000). بنابراین پایداری، تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده مغار پس از حفاری از اهمیت خاصی برخوردار است. بررسی سیر تحول نگهداری مغارها نشان می‌دهد با پیشرفت علم مکانیک سنگ، استفاده از تکنیک تقویت سنگ به کمک انواع سنگ دوزها به تدریج جایگزین نگهداری سنتی می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از بولت‌های ظرفیت بالا و کابل‌های فولادی به عنوان مکمل روش‌های دیگر تقویت سنگ مانند بولت‌ها و داول‌های معمولی جهت نگهداری مغارها مرسوم شده است (ترابی و همکاران، ۱۳۸۳).

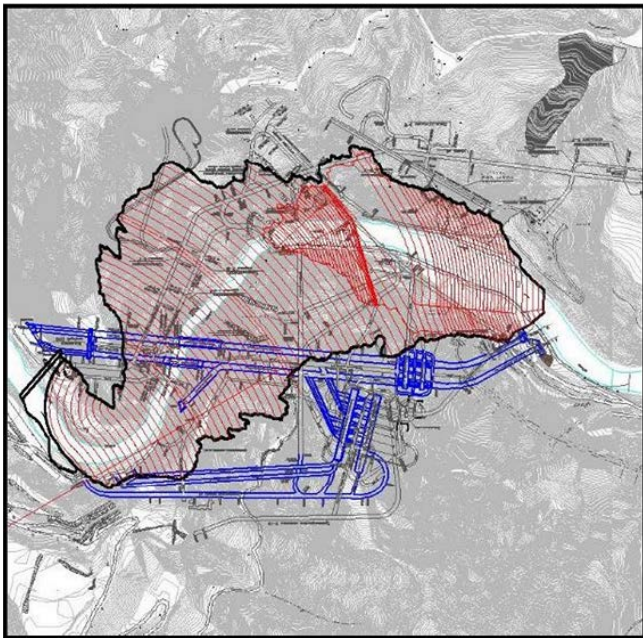
گاو فو کیانگ (GAO Fu-qiang) و همکارش در سال ۲۰۰۸ میلادی در مطالعه عددی خود با استفاده از نرم‌افزار فلک سه بعدی، اثر میل‌مهارهای پیش‌تنیده شده را بر توزیع مجدد تنش اطراف یک تونل در معدن زغال‌چین را بررسی کردند. آن‌ها حالت‌های مختلف استفاده از میل‌مهارها، در ابتدا بدون پیش‌تنیدگی و سپس تحت بارهای ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ کیلو نیوتن در دیواره و سقف جاده مدل‌سازی کرده و با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که توده سنگ پیش‌تنیده شده توسط میل‌مهارها اثر قابل‌توجهی بر توزیع مجدد تنش در اطراف جاده دارد و با افزایش مقدار بار پیش‌تنیدگی میل‌مهارها، توزیع مجدد تنش‌های عمودی و افقی در دیواره و سقف تونل افزایش یافته است و مقاومت توده سنگ به طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. در مطالعه دیگر توسط بوون (Boon) و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در مورد طراحی تونل در توده سنگ درزه دار با استفاده از روش المان مجزا که اثر

طول، فاصله‌داری و مقدار بار پیش‌تنیدگی میل‌مهارها بر میزان جابه‌جایی شعاعی دیواره تونل را مورد بررسی قرار داده‌اند به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار بار پیش‌تنیدگی، مقدار جابه‌جایی شعاعی تونل کاهش می‌یابد. همچنین نیکلسون (Nicholson) در سال ۱۹۹۴ بیان کرده که انکراهی پیش‌تنیده شده با افزایش مقاومت برشی در طول ناپیوستگی‌ها، توده سنگ را مقاوم و از جدایش بلوک‌های لق شده جلوگیری می‌کند و باعث افزایش قفل‌شدگی طبیعی بلوک‌ها می‌شود. شهابی و همکارش در سال ۲۰۰۴ اثر نصب تاندون‌های از نوع میله‌ای (مونوبارها) در پایداری سقف و دیواره‌های مغار نیروگاه مسجدسلیمان را بررسی کرده‌اند. در مغار نیروگاه به دلیل وجود لایه‌های گل سنگ و سنگ رس در بعضی مناطق اطراف مغار، مونوبارهای ۶۵۰ کیلو نیوتنی برای اطمینان از پایداری در سقف و دیواره مغار نصب شد. نتایج تحلیل و بررسی نشان داد نسبت بین میزان افزایش جابه‌جایی پس از نصب و راه‌اندازی مونوبارها و قبل از نصب آن‌ها، به طور متوسط ۱۸۶٪ کاهش یافته است.

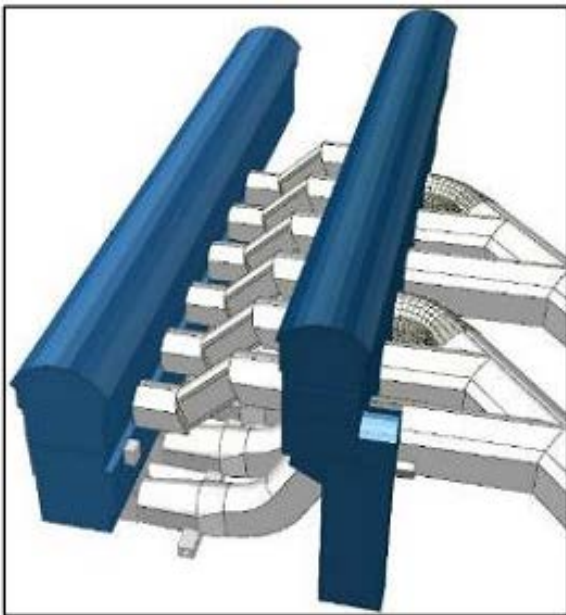
با توجه به اینکه فضا‌های زیرزمینی و مغارها در اعماق مختلف از زمین و با نسبت تنش‌های متفاوت، حفاری و ساخته می‌شوند اهمیت استفاده یا عدم استفاده از تاندون‌ها با توجه به هزینه بالا و زمان مورد نیاز برای نصب و پیش‌تنیدگی آن‌ها در مقایسه با داول‌ها در نگهداری فضای زیرزمینی بسیار زیاد است و همچنین تأثیر مقدار بار پیش‌تنیدگی بر پایداری و کنترل تغییر شکل‌های فضای زیرزمینی مهم می‌باشد، در این تحقیق موارد ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مطالعه موردی

مغار نیروگاهی سد راغون در حدود ۱۱۰ کیلومتری شرق - شمال شرق شهر دوشنبه تاجیکستان قرار دارد. این مغار یک نیروگاه زیرزمینی بزرگ برق آبی بر روی رودخانه وخش (Vakhsh) است که شامل سالن مونتاز (AH)، سالن ماشین



شکل ۱. طرح کلی از نیروگاه زیرزمینی سد راغون (Barla, 2013).



شکل ۲. نمای سه بعدی مغار نیروگاه راغون (Barla, 2013).

(MH)، سالن ترانسفورمر (TH) و تعداد زیادی بازکننده زیرزمینی و تونل است.

شکل ۱ طرح کلی از نیروگاه زیرزمینی سد راغون را نشان می‌دهد که در سمت چپ سد راغون قرار گرفته است و شکل ۲ نمای سه بعدی قسمت‌های مختلف مغار را نشان می‌دهد.

مغار نیروگاه یا سالن ماشین (MH) راغون ۲۰ متر عرض و ۲۲۰ متر طول دارد و بیشینه ارتفاع آن تا کف پیت توربین حدود ۷۲ متر است که بین ترازهای ۱۰۰۱/۲ و ۹۳۱/۶ متر قرار دارد. سالن ترانسفورمر (TH) ۴۲/۷ متر با مغار نیروگاه فاصله دارد. طول مغار ۲۰۰ متر و عرض آن ۱۹ متر بوده و حدود ۴۴ متر ارتفاع دارد. که بین ترازهای ۱۰۱۹/۲ و ۹۶۶/۹ متر واقع شده است (Barla, 2013).

دو مغار نیروگاه در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین در یک بلوک تکتونیکی قرار گرفته‌اند و به وسیله گسلی فعال از توده سنگ اطراف مغار که حاوی ماسه‌سنگ و سنگ سیلت است از یک دیگر جدا شده‌اند (Barla, 2013).

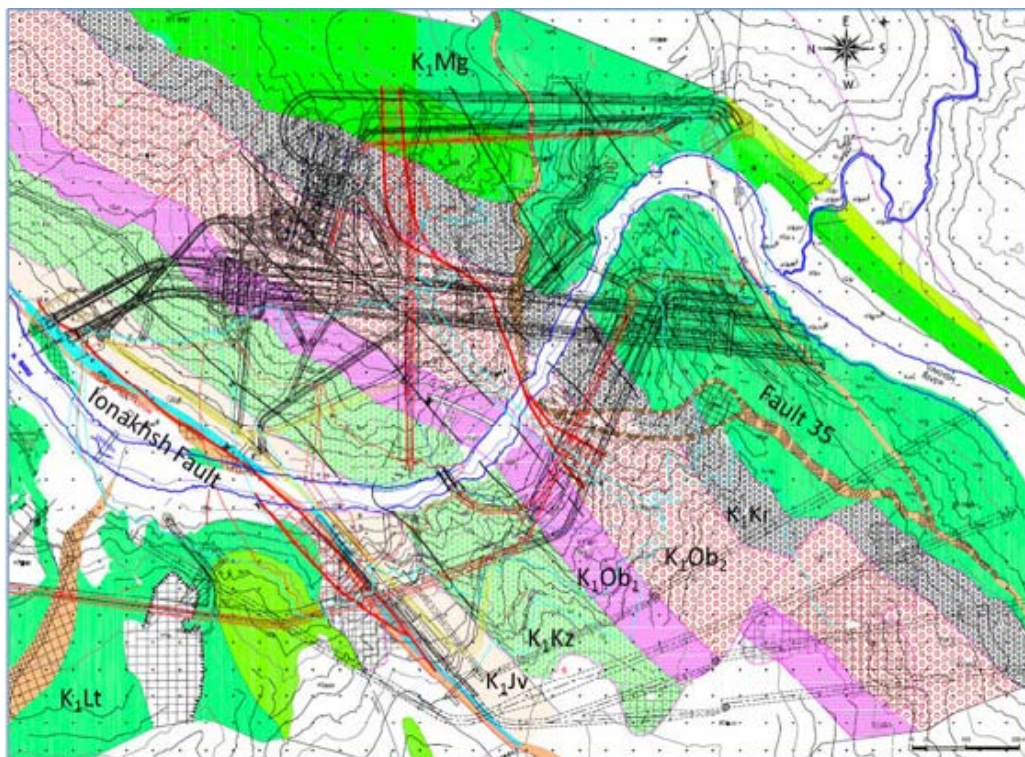
حفاری و ساخت مغار در سال ۱۹۸۹ میلادی آغاز شده و تا سال ۱۹۹۱ ادامه یافت و پس از آن پروژه ساخت متوقف شده و طی این دو سال حفاری و نصب نگهداری در مغار نیروگاه و مغار ترانسفور به ترتیب به ترازهای ۹۶۴/۲ و ۱۰۰۴/۳ متر رسید. سپس در طول سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۹ احداث و حفاری مغار متوقف شده بود. و از سال ۲۰۰۹ میلادی حفاری مغار ادامه پیدا کرده است و هم اکنون نیز در حال حفاری می‌باشد (Barla, 2013).

۳. زمین شناسی توده سنگ مغار نیروگاه راغون

مغار نیروگاه راغون از دو سازند تشکیل شده است که در قسمت بالایی (K_1Ob_2) شامل ماسه سنگ قرمز و قهوه‌ای با درون لایه‌های خاکستری - خاکستری روشن است. و قسمت پایینی (K_1Ob_1) که بیشتر متشکل از سنگ سیلت‌های خاکستری - قهوه‌ای و ژپس با لایه‌های درونی که ماسه سنگ خاکستری روشن به صورت درون لایه‌ای در قسمت میانی

می‌باشد (Barla, 2013).

بر اساس مطالعات انجام شده سازند K_1Ob_2 تشکیل شده از ۹۶٪ ماسه سنگ، ۲/۵٪ سنگ سیلت و ۱/۵٪ آرفیلیت و سازند K_1Ob_1 متشکل از ۸۵٪ سنگ سیلت، ۱۴/۶٪ آرفیلیت، ۳٪ ژپس و ۰/۱٪ ماسه سنگ است که شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی لایه‌های اطراف مغار را نشان می‌دهد (Barla, 2013).



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی لایه‌های اطراف مغار زیرزمینی راغون (Barla, 2014).

۴. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

مطالعات ژئوتکنیکی توسط موسسه‌ی پروژه‌های هیدرولیک (HPI) Hydro Project Institute از سال ۱۹۷۶ تا به حال بر روی منطقه مغار نیروگاه انجام شده و هر سال بررسی و به روز

شده است. با توجه به گزارش ارائه شده توسط HPI در ماه می ۲۰۱۵ پارامترهای توده سنگ مطابق با جدول ۱ است (Barla, 2013).

جدول ۱. پارامترهای توده سنگ تخمین زده شده در اطراف مغار (Barla, 2013).

نوع سنگ	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)	چسبندگی (MPa)
ماسه سنگ	۲۶۰۰	۹۰۰۰	۰/۲۲	۴۲	۱/۷
سنگ سیلت	۲۶۵۰	۵۵۰۰	۰/۲۸	۳۳	۱/۱
زون گسل	۲۶۲۰	۲۰۰۰	۰/۳۲	۳۰	۰/۲۷

۵. تنش برجا

تنش‌های برجا، تنش‌هایی طبیعی هستند که قبل از هر گونه فعالیت در توده سنگ وجود دارند که ناشی از وزن لایه‌های بالایی و تنش‌هایی که منشأ تکتونیکی دارند قرار می‌گیرند. وقتی یک فضای زیرزمینی بزرگ در سنگ ایجاد می‌شود میدان تنش به طور موضعی به هم خورده و باعث تمرکز تنش در اطراف فضای حفاری شده می‌شود. توزیع جدیدی از تنش‌ها در سنگ دربرگیرنده فضای زیرزمینی به وجود می‌آید با اضافه شدن این تنش‌ها به تنش‌های برجا اگر مجموع آن‌ها از مقاومت سنگ بیشتر شود باعث تسلیم سنگ‌های اطراف آن شده و پایداری قسمت حفاری شده را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. ناپایداری حاصل می‌تواند به صورت تغییر شکل و ریزش در سقف و دیواره‌های جانبی فضای زیرزمینی خود را نشان دهد (Hoek et al., 2000).

هر جزیی از سنگ که در زیر سطح زمین قرار گرفته است وزن ستون عمودی سنگی که روی این جز اثر می‌کند ناشی از عمق و وزن مخصوص روباره توده سنگ می‌باشد. این مقدار تنش توسط رابطه (۱) تخمین زده می‌شود:

$$\sigma_v = \gamma z \quad (1)$$

که در آن σ_v تنش عمودی، γ وزن مخصوص روباره سنگ و z عمق زیر سطح زمین است. اگر چنانچه وزن مخصوص طبقات با عمق تغییر یابد می‌توان در فرمول بالا به جای γ ، وزن مخصوص متوسط را قرار داد و یا مقدار تنش قائم را از رابطه (۲) به دست آورد (Brown and Hoek, 1978).

$$\sigma_v = \sum_{i=0}^n \gamma_i z_i \quad (2)$$

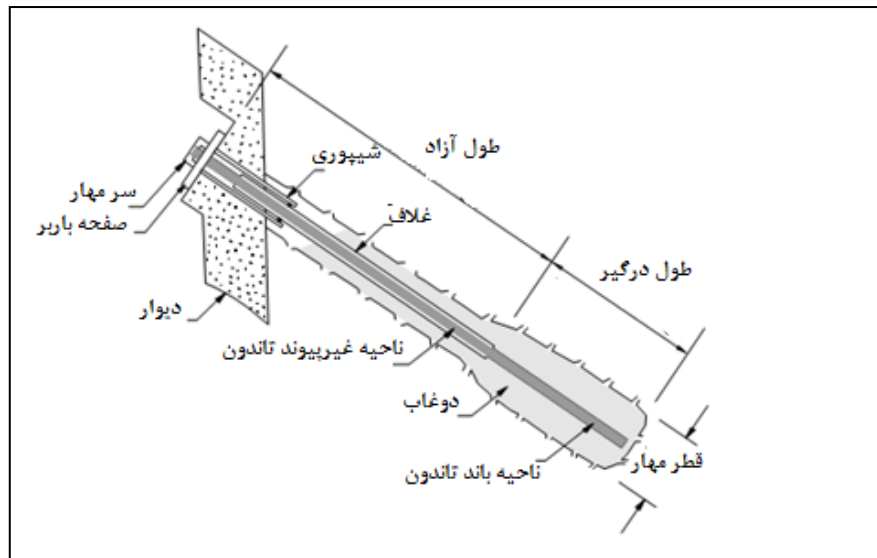
که در آن γ_i و z_i به ترتیب وزن مخصوص و ارتفاع لایه‌های مختلف در عمق زمین را نشان می‌دهد.

تخمین تنش‌های افقی موثر بر جز سنگ در عمق z زیر سطح زمین به مراتب سخت‌تر از تنش‌های عمودی است معمولاً نسبت تنش افقی متوسط به تنش عمودی با حرف k مشخص می‌شود، به این صورت که: (Brown and Hoek, 1978)

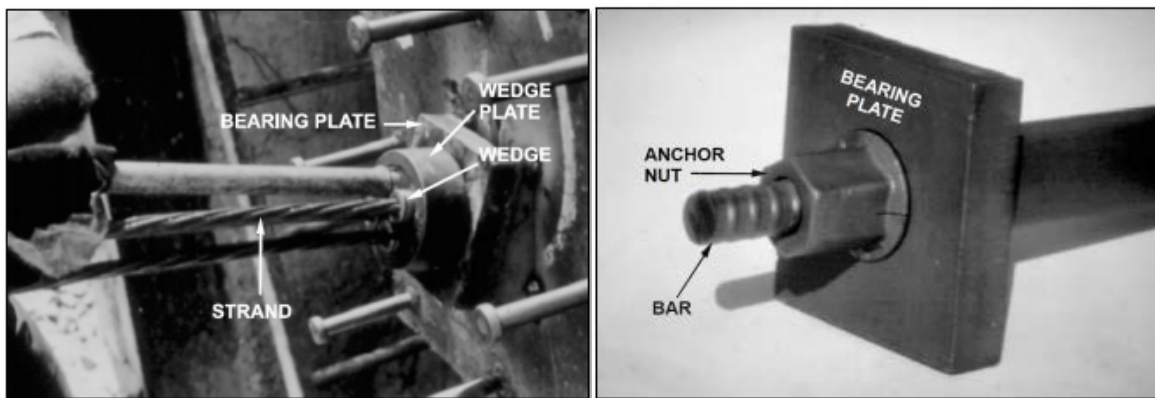
$$\sigma_h = k \sigma_v = k \gamma z \quad (3)$$

۶. میل مهارهای ظرفیت بالا (تاندون)

امروزه استفاده از انواع میل‌مهاری موثرترین و ارزان‌ترین شیوه نگهداری توده سنگ پیرامون بسیاری از فضاهای زیرزمینی است. مهاری‌ها می‌توانند به یکی از صورت‌های غیرفعال و فعال وجود داشته باشند. در روش منفعل، میل مهار با استفاده از دوغاب در سنگ محکم می‌شود و برای فعال سازی نیاز به حرکت توده سنگ است و برای اینکه به طور موثری مورد بهره‌برداری قرار بگیرد، باید آن را قبل از آغاز حرکت توده سنگ، در محل محکم کرد. در روش فعال میل مهار پس از نصب، تحت بار پیش‌تندگی قرار گرفته و نیروی کششی ایجاد شده در خود را به زمین منتقل می‌کند (Kim et al., 2007). انکرهای کابلی پیش‌تند شده معمولاً در مهندسی معدن و ژئوتکنیک استفاده می‌شود (Pelizza et al., 2000). زیرا (Tezuka and Seoka, 2013)، (Koca et al., 2011). نصب آن‌ها به طور قابل توجهی مقاومت و پایداری توده سنگ مسلح را افزایش می‌دهد و باعث افزایش ظرفیت باربری زمین و همچنین کاهش قابل توجه تغییر شکل‌ها می‌شود (Li, 2012; Maejima et al., 2003). تاندون‌ها، انکر یا مهاری‌های با ظرفیت بالا هستند. اساسی‌ترین مؤلفه‌های یک سیستم مهاربندی مهار، طول آزاد و طول محصور می‌باشد که اجزای آن در شکل ۴ نشان داده شده است. روند اجرای سیستم مهاربندی به این صورت می‌باشد که ابتدا چال‌هایی با قطرهای مختلف حفر شده و سپس سیال حفاری از داخل چال خارج می‌شود و تاندون در داخل چال نصب و پس از آن دوغاب به داخل چال، تزریق خواهد شد. با توجه به خصوصیات دوغاب، ۱ تا ۷ روز برای گیرش کامل آن نیاز است. پس از آن، عملیات پیش‌تندگی تاندون اجرا می‌شود و نهایتاً سر تاندون پوشیده می‌شود. تاندون‌ها در دو نوع استرند (رشته کابل فولادی) و میله‌ای می‌باشند. شکل ۵ دو نوع تاندون را نشان می‌دهد. تاندون‌های موقتی برای بازه‌ی کمتر از دو سال استفاده می‌شود ولی تاندون‌های دائمی از خوردگی محافظت می‌شود تا از عملکرد بلندمدت آن‌ها در طول عمر طراحی اطمینان حاصل شود (Sabtini et al., 1999).



شکل ۴. اجزای مختلف سیستم مهاربندی ظرفیت بالا (Sabtini et al., 1999).



(ب)

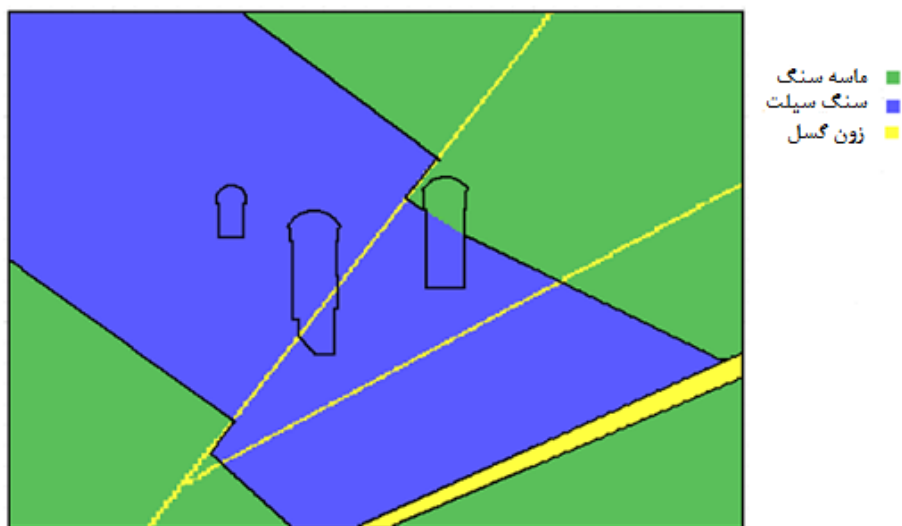
(الف)

شکل ۵. اجزای مختلف تاندون ها (الف) تاندون نوع میله ای و (ب) تاندون استرندی (Sabtini et al., 1999).

۷. مدل سازی عددی

در نرم افزار فلک دو بعدی را نشان می دهد. توالی حفاری و نصب نگهداری مغار نیروگاه تا ترازهای ۹۶۴/۲ و ۱۰۰۴/۳ متر به ترتیب در مغار اصلی و مغار ترانسفورمر تا سال ۱۹۹۱ میلادی انجام شد. نگهداری مغار شامل پوشش بتنی با مدول الاستیسیته ۲۷ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۲ به ضخامت های ۷۰ و ۶۰ سانتی متر به ترتیب در سقف و دیواره، و سیستم های مهاربندی داول و تاندون است.

در این تحقیق از نرم افزار $Flac^{2D}$ که بر اساس روش عددی تفاضل محدود می باشد برای بررسی تأثیر تنش های برجا بر رفتار مکانیکی تاندون ها استفاده شده است. مدلی با ابعاد ۳۵۰×۲۵۰ ساخته شده و خصوصیات توده سنگ اطراف مغار که متشکل از ماسه سنگ و سنگ سیلت می باشد به مدل اختصاص داده شده است. زون گسل نیز با توجه به مواد پرکننده آن، همانند توده سنگ محیط اطراف مغار مدل سازی شده است. شکل ۶ مقطع مدل زمین شناسی مغار طراحی شده



شکل ۶. مقطع مدل زمین‌شناسی مغار طراحی شده.

جدول ۳ خصوصیات تاندون و داول‌های استفاده شده در نگهداری مغار نشان داده شده است. به طوری که پس از حفاری هر قسمت نگهداری مربوط به آن قسمت انجام شد.

$$S_{bond} = C \times \pi \times (2t + D) \times L_{(=1m)} (N / m) \quad (5)$$

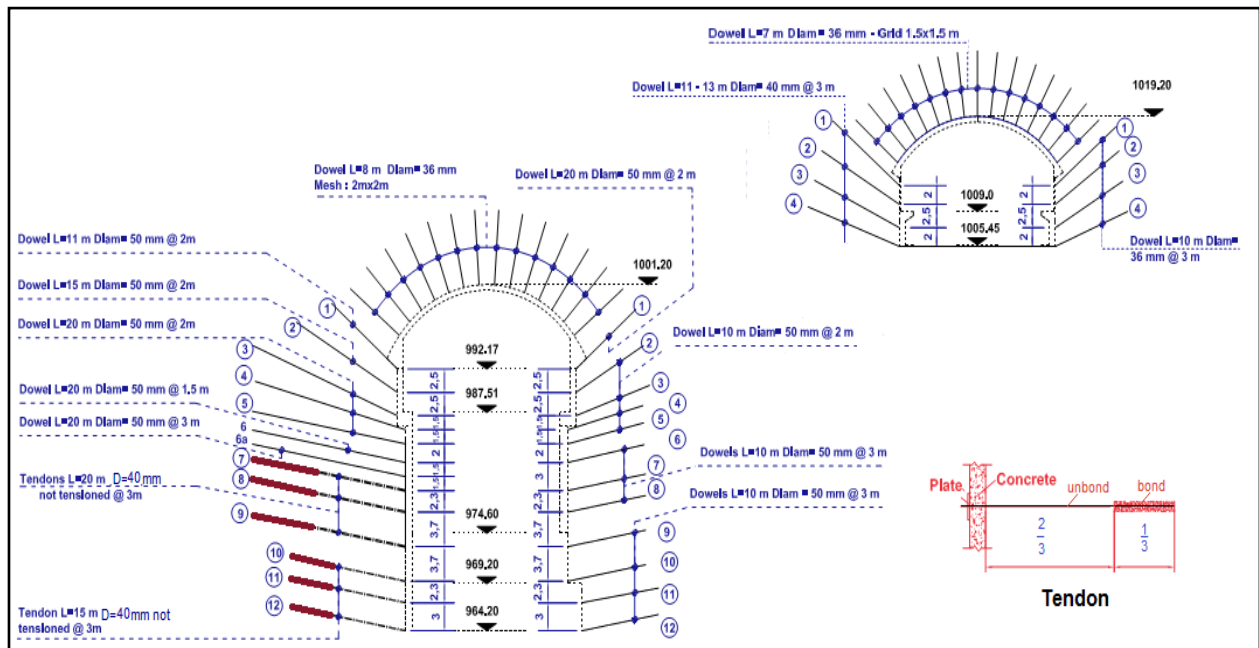
شکل ۷ طرح سیستم نگهداری مغار نیروگاه را نشان می‌دهد که تاندون‌های استفاده شده در آن تحت بار پیش‌تندگی قرار نگرفته است (Barla, 2014). برای محاسبه سختی باند و مقاومت باند بین دوغاب و میل-مهاری از رابطه ۴ و ۵ استفاده کرد (Falc ver.7.0 Manual):

شکل ۷ طرح سیستم نگهداری مغار نیروگاه را نشان می‌دهد که تاندون‌های استفاده شده در آن تحت بار پیش‌تندگی قرار نگرفته است (Barla, 2014). برای محاسبه سختی باند و مقاومت باند بین دوغاب و میل-مهاری از رابطه ۴ و ۵ استفاده کرد (Falc ver.7.0 Manual):

$$K_{bond} \cong \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (4)$$

جدول ۳. خصوصیات تاندون و داول‌های استفاده شده در نگهداری مغار راغون (Barla2013, ASTM A416)

تاندون	داول	نوع تقویت		پارامتر
		۴۰	۵۰	
۴۰	۴۰	۳۶	۳۶	قطر تقویت (mm)
۱۲۰	۷۶	۷۶	۷۶	قطر چال (mm)
۲۰	۱۸	۲۰	۲۰	ضخامت دوغاب (mm)
۱۸۲۵	۴۹۴	۴۰۷	۴۰۷	نیروی تسلیم (KN)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۵/۱۵	۸/۵۶	۷/۳۶	۷/۳۶	سختی باند (GPa)
۳/۷۷	۲/۴	۲/۴	۲/۴	مقاومت باند (MPa)

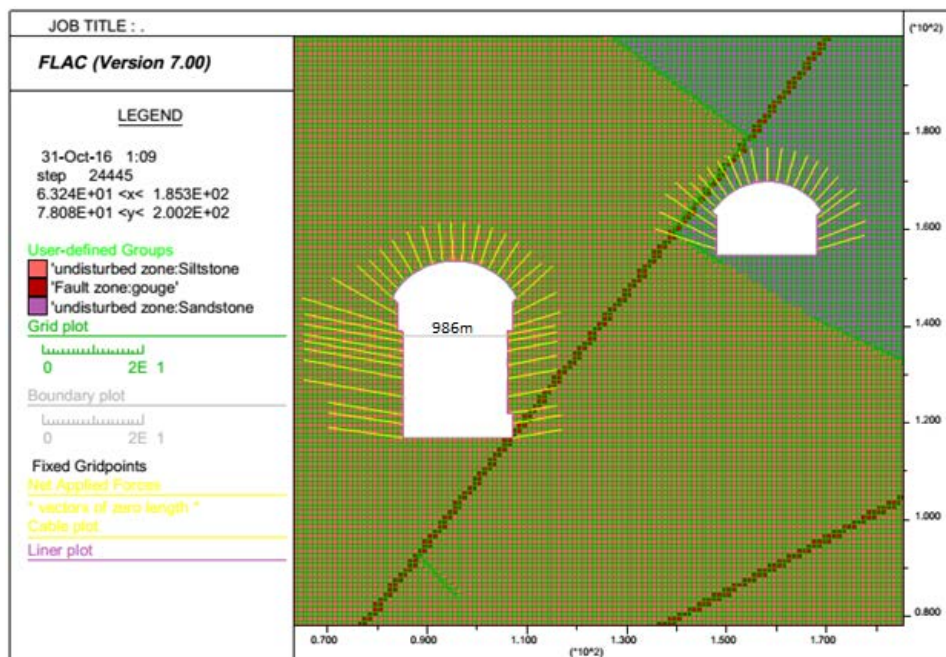


شکل ۷. طرح سیستم نگهداری مغار نیروگاه راغون (Barla 2013).

ترانسفورمر را نشان می‌دهد که تا سال ۱۹۹۱ انجام شده بود.

شکل ۸ توالی حفاری و نصب سیستم نگهداری تا تراز ۹۶۴/۲

و ۱۰۰۵/۴۵ متر به ترتیب در مغار نیروگاه و مغار



شکل ۸. حفاری و نصب سیستم نگهداری مغار نیروگاه و ترانسفورمر تا سال ۱۹۹۱.

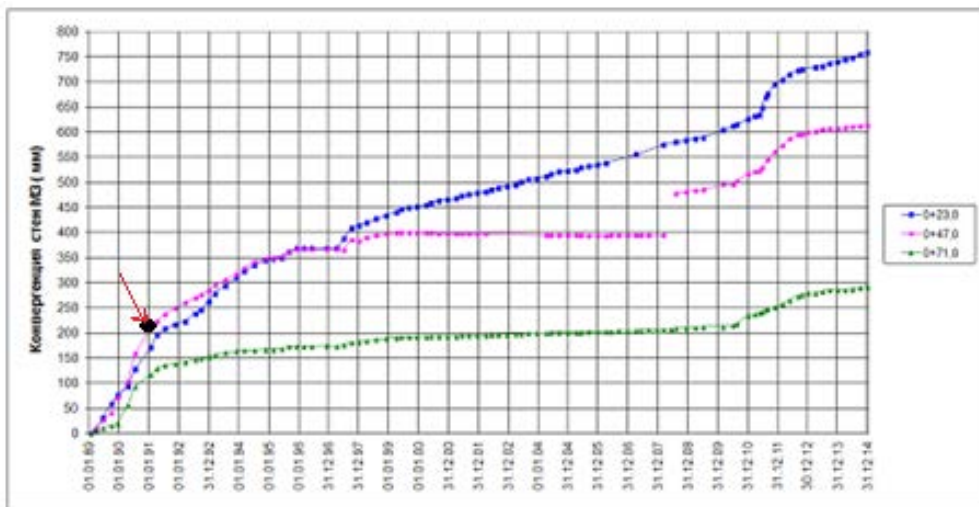
۸. تحلیل پایداری مغار نیروگاه

جابه‌جایی دو طرف دیواره مغار طی مراحل حفاری در طول سال‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شود. شکل ۹ تاریخچه داده‌های ابزار دقیق در تراز ۹۸۶ متر طی سال‌های مختلف را

پس از توالی حفاری و نصب نگهداری مغار راغون تا ارتفاع ۹۸۶ متر در سالن ماشین، در دو طرف دیواره مغار در این تراز، ابزار دقیق‌هایی نصب شده تا میزان همگرایی و

تا پس از حفاری و نصب نگهداری تا تراز مورد نظر، میزان جابه‌جایی‌ها در دو طرف دیواره مغار با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده و پارامترهای توده سنگ دربرگیرنده مغار با میزان همگرایی حاصل از نتایج ابزار دقیق کالیبره شود (از همگرایی سنج به عنوان ابزار دقیق برای محاسبه میزان همگرایی دیواره ها در مغارهای نیروگاه استفاده شده است).

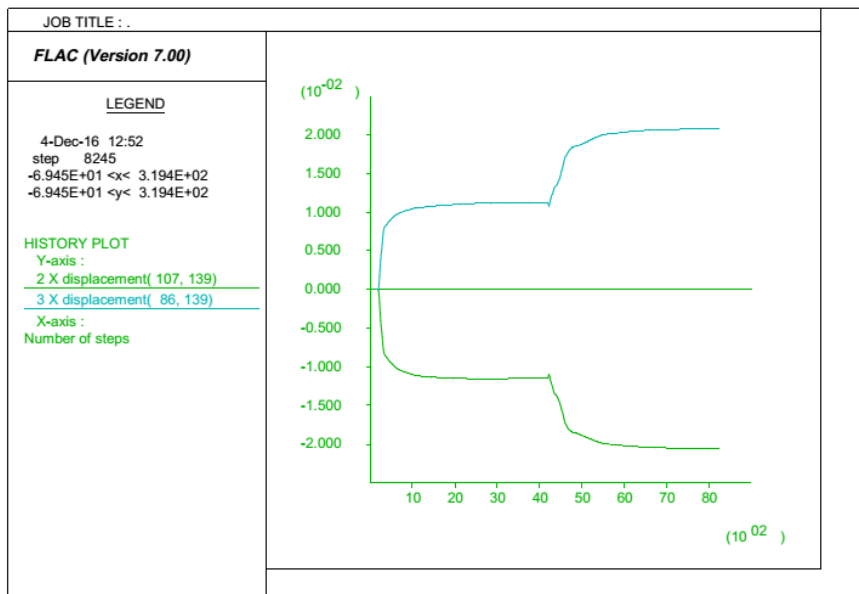
نشان می‌دهد. همچنین در شکل میزان همگرایی دو طرف دیواره در سال ۱۹۹۱ با فلش قرمز رنگ نشان داده شده است (Barla, 2013) مغار نیروگاه راغون با استفاده از مدل رفتاری موهرکولمب در نرم‌افزار فلک دو بعدی مدل‌سازی شده و خصوصیات پارامترهای توده سنگ دربرگیرنده مغار مطابق با جدول ۱ به مدل تخصیص داده شده است. دو نقطه هم‌تراز با سطح ۹۸۶ متر در دو طرف دیواره مغار مشخص شده است



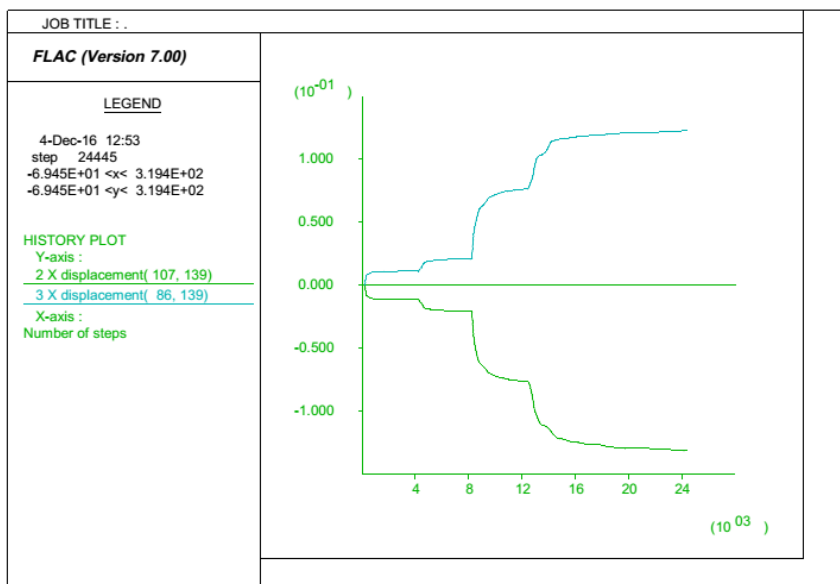
شکل ۹. تاریخچه همگرایی ثبت شده در مغار نیروگاه در تراز ۹۸۶ متر در طول سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۲ (Barla, 2013)

از مدل‌سازی عددی و ابزار دقیق را نشان می‌دهد. از تفاضل مقدار همگرایی قبل از نصب ابزار دقیق و مقدار همگرایی در سال ۱۹۹۱ در مدل‌سازی عددی مقدار ۲۰/۷ به دست آمده است. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود میزان اختلاف مقادیر همگرایی دیواره مغار به دست آمده با استفاده از مدل‌سازی عددی و داده‌های ابزار دقیق ۱/۴ درصد است که این مقدار اختلاف، در حد کم و معقول می‌باشد و این نشان می‌دهد مقادیر پارامترهای توده سنگ دربرگیرنده مغار استفاده شده در طراحی قابل قبول می‌باشد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقدار همگرایی دیواره مغار قبل از نصب ابزار دقیق و حفاری مغار تا سال ۱۹۹۱ در تراز ۹۸۶ متر را نشان می‌دهد. همان طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد تا قبل از حفاری و نصب ابزار دقیق‌ها، میزان همگرایی دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر ۴ سانتی متر می‌باشد. همچنین مطابق با شکل ۱۱، میزان همگرایی دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر، پس از حفاری و نصب نگهداری تا تراز ۹۶۴/۲ در سالن ماشین، ۲۴/۷ سانتی متر شده است. جدول ۴ میزان همگرایی دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر در سال ۱۹۹۱ حاصل



شکل ۱۰. همگرایی دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر قبل از نصب ابزار دقیق (۴ سانتی متر).



شکل ۱۱. همگرایی کل دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر در سال ۱۹۹۱ (۲۴/۷ سانتی متر).

جدول ۴. میزان همگرایی دیواره مغار در سطح ۹۸۶ متر در سال ۱۹۹۱

همگرایی	قبل از نصب ابزار دقیق (cm)	پس از نصب ابزار دقیق در سال ۱۹۹۱ (cm)
ابزار دقیق	-	۲۱
مدل سازی عددی	۴	۲۰/۷
درصد خطا (%)	-	-۱/۴

۹. اثر عمق بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها

برای بررسی اثر تغییرات عمق بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها از مدل عددی مغار راغون استفاده شده است. بدین صورت که مغار مورد نظر در عمق‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متر و با نسبت تنش ۱/۱۵ مطابق با طرح اولیه سیستم نگهداری مغار، طراحی شده و مقادیر جابه‌جایی و همگرایی در نقاط مختلف دیواره مغار ثبت شد. سپس برای بررسی اثر تغییرات عمق بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها به جای طرح اولیه سیستم نگهداری، از طرح جدید استفاده شده است که شکل ۱۲ سیستم نگهداری طرح جدید را نشان می‌دهد. در طرح جدید از تاندون‌های با قطر ۵۰ میلیمتر تحت بارهای پیش‌تیدگی مختلف به جای داول‌های با قطر ۵۰ میلیمتر در دیواره مغار استفاده شده است.

برای محاسبه تعداد استرندها ۱۵ میلی‌متری که معادل با قطر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد می‌توان به صورت زیر عمل کرد: [۱۸]

$$s = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \times \frac{15^2}{4} = 176.7 \text{ mm}^2 \quad (۶)$$

s: سطح مقطع یک استرندها و d قطر استرندها

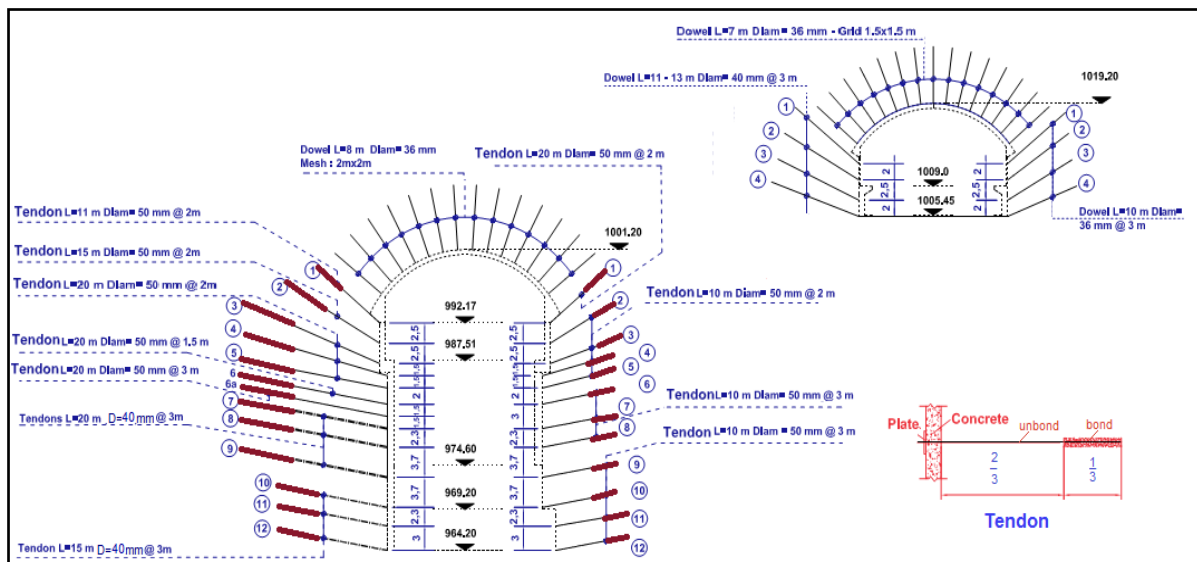
$$S = n \times s = 12 \times 176.7 = 2120 \text{ mm}^2 \quad (۷)$$

S: سطح مقطع تعداد استرندها تعریف شده، n تعداد استرندها

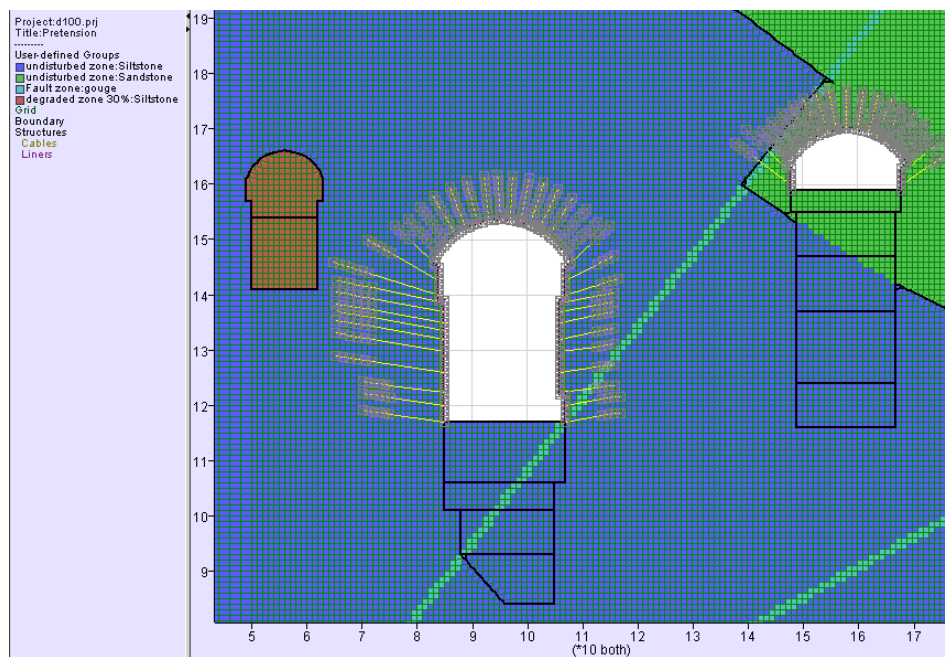
$$D = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2120}{\pi}} = 51.9 \text{ mm} \quad (۸)$$

تعداد ۱۲ استرندها ۱۵ میلیمتری معادل با قطر ۵۰ میلی‌متر است و نیروی تسلیم آن مطابق با جدول FHWA، ۳۱۳۰ کیلو نیوتن می‌باشد.

تاندون‌ها تحت بارهای پیش‌تیدگی ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۸۵ تن مدل‌سازی شده و اثر آن‌ها بر میزان جابه‌جایی و همگرایی دیواره‌های مغار نسبت به طرح اولیه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در زیر آمده است. هندسه تاندون‌های طراحی شده در مدل‌سازی عددی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



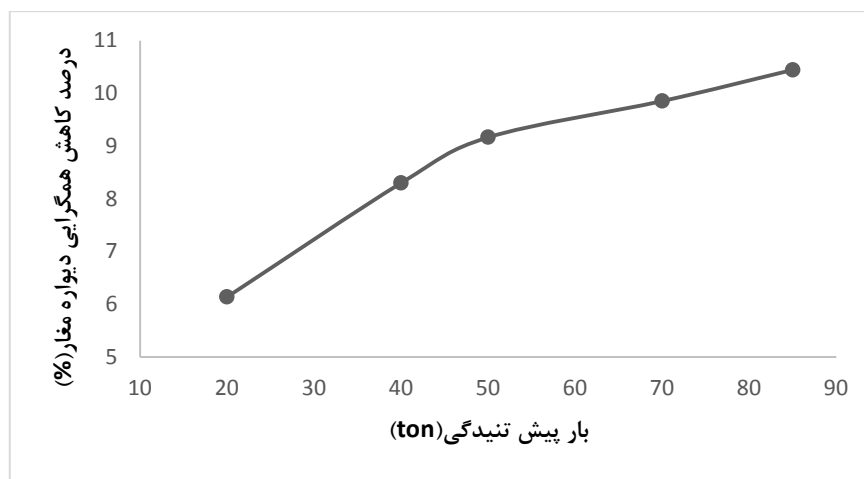
شکل ۱۲. طرح جدید سیستم نگهداری مغار.



شکل ۱۳. هندسه تاندون‌های طراحی شده در مدل‌سازی.

کاهش همگرایی برابر است با تفاضل مقدار جابه‌جایی و همگرایی دیواره مغار در طرح اولیه نگهداری (شکل ۷) و مقدار همگرایی دیواره در حالت استفاده از تاندون تحت بار پیش‌تنیدگی مختلف در طرح جدید (شکل ۱۲)، تقسیم بر مقدار همگرایی در طرح اولیه نگهداری ضرب در ۱۰۰ است.

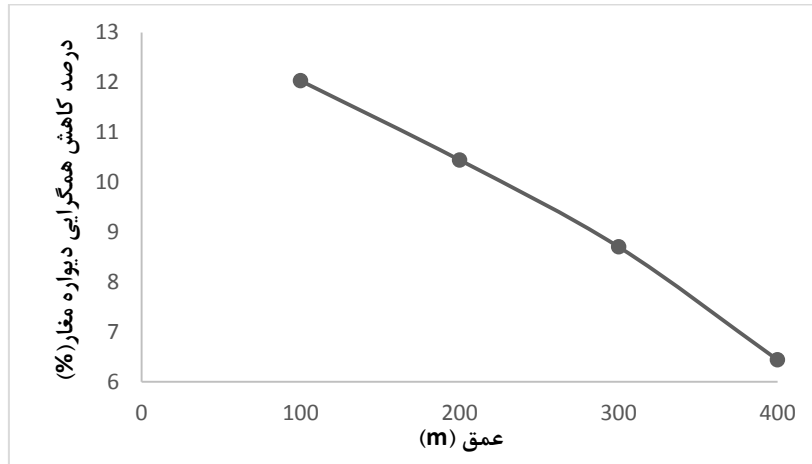
شکل ۱۴ ارتباط بین درصد کاهش همگرایی دیواره مغار و تاندون‌های پیش‌تنیده تحت بارهای ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۸۵ تن نسبت به حالتی که از داوول به عنوان نگهداری در دیواره‌های مغار استفاده شده را در نقاط مختلف دیواره در عمق روباره ۲۰۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. درصد



شکل ۱۴. نمودار درصد کاهش همگرایی - بار پیش‌تنیدگی‌های مختلف.

و ۴۰۰ متر نشان می‌دهد که از تاندون‌های تحت بار پیش‌تندگی ۲۰ تن استفاده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است با افزایش عمق روباره، درصد کاهش همگرایی دیواره مغار کاهش یافته است.

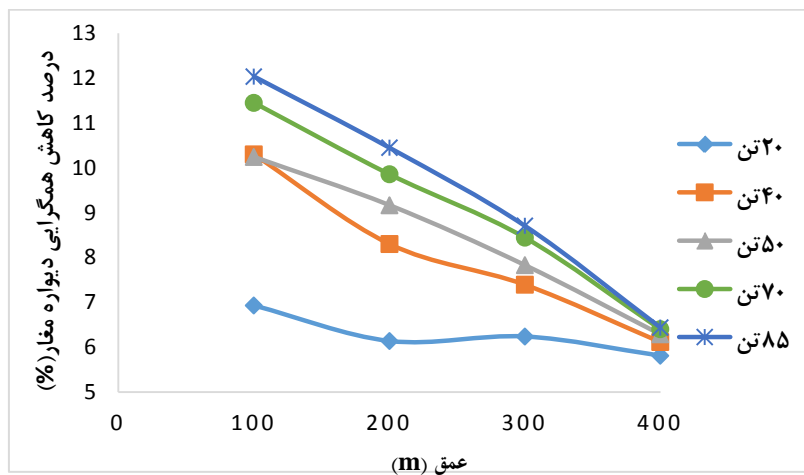
همان‌طور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد با افزایش میزان بار پیش‌تندگی تاندون‌ها، مقدار همگرایی دیواره مغار به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. شکل ۱۵ نتایج درصد کاهش همگرایی دیواره مغار در عمق‌های روباره ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰



شکل ۱۵. نمودار درصد کاهش همگرایی دیواره مغار به عمق‌های روباره مختلف تحت بار پیش‌تندگی ۲۰ تن.

می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان بیان نمود با کاهش عمق روباره و با افزایش میزان بار پیش‌تندگی تاندون‌ها، همگرایی دیواره مغار به مقدار بیشتری کاهش یافته است. به عبارت دیگر تاندون‌ها در عمق‌های کم عملکرد مناسب‌تری در کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار دارند.

شکل ۱۶ نمودار اثر تاندون‌ها را بر درصد کاهش همگرایی دیواره مغار در عمق‌های مختلف ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متر از سطح زمین و به ازای مقادیر مختلف بار پیش‌تندگی تاندون‌ها در طرح جدید نسبت به طرح اولیه که از سیستم نگهداری داوول استفاده شده بود را در دیواره مغار نشان

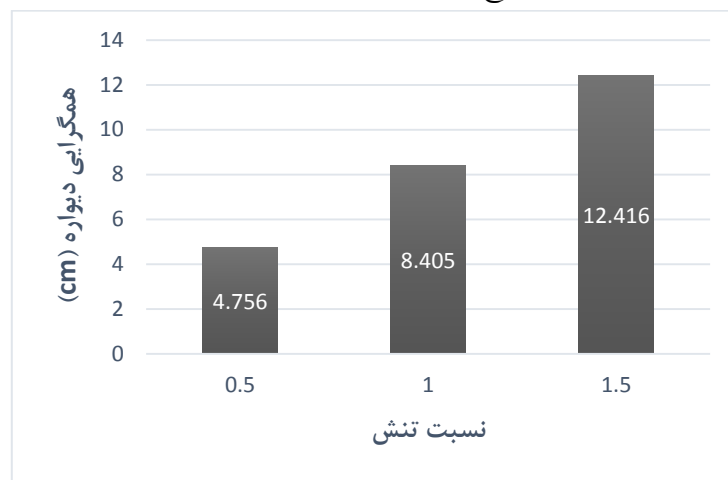


شکل ۱۶. نمودار درصد کاهش همگرایی دیواره مغار به عمق‌های روباره مختلف تحت بار پیش‌تندگی‌های متفاوت.

۱۰. اثر نسبت تنش بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها

برای بررسی اثر نسبت تنش بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها از مدل عددی مغار راغون استفاده شده است. در ابتدا طرح اولیه مغار راغون که با سیستم نگهداری داوول و بتن برجا است با نسبت تنش‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در عمق روباره ۲۰۰ متر طراحی شده است و مقادیر جابه‌جایی و همگرایی دیواره مغار در نقاط مختلف ثبت شد. سپس برای بررسی اثر تغییرات نسبت تنش بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها به جای طرح اولیه

سیستم نگهداری، از طرح جدید استفاده شده است که در شکل ۱۲ سیستم نگهداری طرح جدید نشان داده شده است. تاندون‌ها تحت بارهای پیش‌تندگی ۲۰ تا ۸۵ تن با نسبت تنش‌های مختلف مدل‌سازی شده و اثر آن‌ها بر میزان جابه‌جایی و همگرایی دیواره‌های مغار نسبت به طرح اولیه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در زیر آمده است.

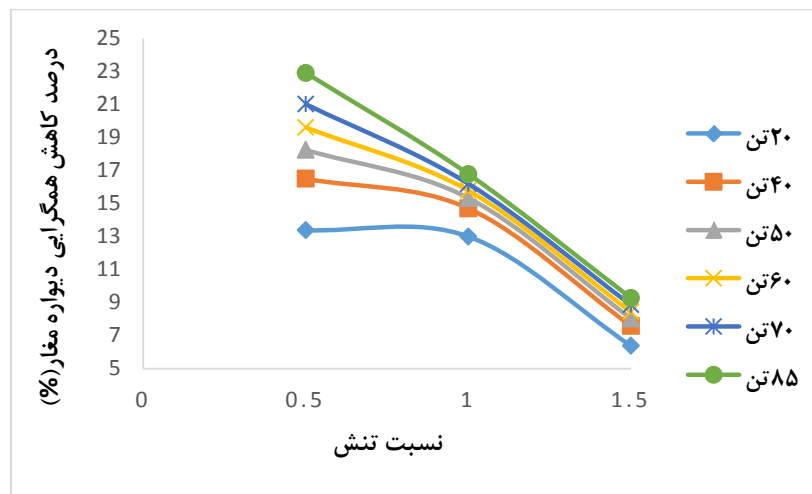


شکل ۱۷. نمودار همگرایی دیواره مغار به ازای نسبت تنش‌های مختلف در عمق ۲۰۰ متری.

شکل ۱۷ نتایج همگرایی دیواره مغار در طرح اولیه که ترکیب نگهداری داوول و بتن برجا است را به ازای نسبت تنش‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش نسبت تنش، مقدار همگرایی و جابه‌جایی در دیواره مغار افزایش یافته است.

شکل ۱۸ نمودار درصد کاهش همگرایی دیواره مغار در تراز ۹۸۶ متر با نسبت تنش‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در عمق ۲۰۰ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد که از تاندون‌های تحت بار پیش‌تندگی ۲۰ تا ۸۵ تن به جای داوول‌ها در طرح اولیه

در دیواره مغار استفاده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت تنش، میزان تأثیر تاندون‌ها در کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار کمتر بوده و همچنین با افزایش مقدار بار پیش‌تندگی تاندون‌ها، میزان همگرایی دیواره مغار به نسبت بیشتری کاهش یافته است. بنابراین با کاهش نسبت تنش، اثر مقدار بار پیش‌تندگی در کنترل و کاهش همگرایی دیواره مغار زیاد می‌شود. به عبارت دیگر تاندون‌ها در نسبت تنش‌های کم عملکرد مناسب‌تری در کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار دارند.



شکل ۱۸. نمودار درصد کاهش همگرایی دیواره مغار در مقابل نسبت تنش‌های به ازای بارهای پیش‌تنیدگی مختلف.

با افزایش مقدار بار پیش‌تنیدگی تاندون‌ها، جابه‌جایی و همگرایی دیواره مغار به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد. با افزایش عمق، اثر تاندون‌ها بر کاهش همگرایی و جابه‌جایی دیواره مغار کاهش می‌یابد به عبارت دیگر تاندون‌ها در عمق‌های کم عملکرد مناسب‌تری در کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار دارند. با افزایش نسبت تنش، مقدار جابه‌جایی و تغییر شکل دیواره مغار افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت تنش، استفاده از تاندون‌های تحت بار پیش‌تنیده موثرتر بوده و جابه‌جایی دیواره مغار با نسبت بیشتری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تاندون‌ها در نسبت تنش‌های کم عملکرد مناسب‌تری در کنترل جابه‌جایی محیط اطراف مغار دارند.

۱۱. نتیجه‌گیری

استفاده از تاندون‌ها در مغارهای بزرگ زیرزمینی برای کنترل جابه‌جایی‌های محیط اطراف فضای حفاری شده بسیار مرسوم می‌باشد. در این تحقیق تأثیر تنش‌های برجا بر رفتار مکانیکی تاندون‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که هر چه عمق مغارها بیشتر باشد رفتار مکانیکی تاندون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که در عمق ۴۰۰ متری از سطح زمین افزایش مقدار بار پیش‌تنیدگی تاندون‌ها از ۲۰ تن به ۸۵ تن تأثیر چندانی بر میزان همگرایی فضای حفاری ندارد. بدین ترتیب در مغارهایی که در اعماق زیاد قرار دارند استفاده از نیروی پیش‌تنیدگی بالا توصیه نمی‌شود. در ادامه سایر نتایج این تحقیق به اختصار ارائه می‌شود.

منابع

ترابی، سید رحمان؛ عباسیان، میثم؛ حاجی حسنی، محسن؛ (۱۳۸۳)، "بررسی اجمالی کاربرد میل‌مهارهای ظرفیت بالا در مغار نیروگاه طرح توسعه سد و نیروگاه مسجد سلیمان"، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ASTM A416., 2015. Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete.

Barla, G., 2013. Techno-Economic assessment study for rogun hydroelectric construction project.

Barla, G., 2014. Underground powerhouse stability in sandstone and siltstone formations. 15th Series – Rock Mechanics and Rock Engineering Conferences. Torino.

Boon, C. W., Houlsby, G. T., Utili, S., 2015. Designing tunnel support in jointed rock masses via the DEM. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(2): 603-632.

- Brown, E.T., Hoek, E., 1978. Trends in relationships between measured rock in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15, pp.211-215.
- Gao, F. Q., & Kang, H. P., 2008. Effect of pre-tensioned rock bolts on stress redistribution around a roadway—insight from numerical modeling. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(4): 509-515.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F., 2000. Support of underground excavations in hard rock. Itasca Consulting Group, Inc., 2011. *FLAC Version 7.0 User's Manual*, Minneapolis.
- Kim, N. K., Park, J. S., Kim, S. K., 2007. Numerical simulation of ground anchors. *Computers and Geotechnics*, 34(6): 498-507.
- Koca, M. Y., Kincal, C., Arslan, A. T., Yilmaz, H. R., 2011. Anchor application in Karatepe andesite rock slope, Izmir—Türkiye. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2): 245-258.
- Li, C. C., 2012. Performance of D-bolts under static loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(2): 183-192.
- Maejima, T., Morioka, H., Mori, T., & Aoki, K., 2003. Evaluation of loosened zones on excavation of a large underground rock cavern and application of observational construction techniques. *Tunnelling and underground space technology*, 18(2):223-232.
- Nicholson, G. A., 1994. Book review-Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice & Projects. by JA Hudson (Editor-in-chief) and ET Brown, C. Fairhurst and E. Hoek (senior editors), Vols. 1 to 5, 1983. Pergamon Press, Oxford, UK, ISBN 0-08-042066. *Engineering Geology*, 37(3-4): 311-313.
- Pelizza, S., Oreste, P. P., Peila, D., & Oggeri, C., 2000. Stability analysis of a large cavern in Italy for quarrying exploitation of a pink marble. *Tunnelling and underground space technology*, 15(4): 421-435.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., Bachus, R. C., 1999. Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems (No. FHWA-IF-99-015).
- Shahabi, M., & Shahverdiloo, M. R., 2004. Effect of Installing Monobars in Stability of Powerhouse Cavern Roof in Masjed-Soleiman Power Plant Extension. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. University of Missouri-Rolla
- Tezuka, M., & Seoka, T., 2003. Latest technology of underground rock cavern excavation in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2): 127-144.