



طراحی سیستم نگهداری یک مغار نیروگاهی با استفاده از روش المان مجزا

مهدیس دامغانی^۱، محمود فغفور مغربی^۲، علی اخترپور، حامد زارعی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد تمام دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه غیر انتفاعی گنبد کاووس

Eng.m.damghani@gmail.com

خلاصه

برای تعیین حائل مورد نیاز یک مغار روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی و روش‌های عددی می‌باشد. روش‌های تحلیلی کاربردشان محدود به شرایطی است که بتوان زمین محل حفاری مغار را بصورت یک محیط پیوسته فرض نمود که این فرض در غالب موارد صادق نمی‌باشد. روش‌های عددی نیازمند اطلاعات اولیه‌ای هستند که این اطلاعات معمولاً به سهولت قابل تعیین نمی‌باشند؛ در اکثر موارد برای تعیین حائل مورد لزوم، بخصوص حائل مورد نیاز در حین حفاری مغار، از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. در این مقاله تحلیل پایداری و تمهیدات سیستم نگهدارنده برای مغار، بر اساس روش تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای ۳DEC صورت گرفت و تغییر شکل‌ها از نوع الاستیک و به مقدار بسیار کوچک مورد تائید قرار گرفت. بر اساس اطلاعات بدست آمده و با در نظر گرفتن شرایط اجرا به نظر می‌رسد (بر اساس قضاوت مهندسی از کلیه داده‌ها)، سیستم نگهدارنده بهینه شامل نصب پیچ سنگ تمام تزریق با شاکریت به همراه تور فلزی است که شرایط پایداری مناسبی را فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: روش‌های عددی، سیستم نگهدارنده مغار، ۳DEC، پیچ سنگ، شاکریت.

۱. مقدمه

در پروژه‌های عمرانی و معدنی، آشنایی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ و توده‌های سنگی ضروری و مهم است. پس از اینکه با تحلیل نیروها یا بارهایی که بر سنگ اعمال می‌گردند، وضعیت تنش، کرنش و یا انرژی ذخیره شده پیش‌بینی شد، با استفاده از این ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌توان نحوه رفتار سنگ و توده‌های سنگی از جمله شکست و جابجایی در آن‌ها را برآورد کرد.

پدیده‌های ساختاری زمین (لایه‌بندی، درزه‌ها، زون برشی، گسل و...) و خصوصیات مکانیکی توده سنگ از عوامل اصلی کنترل کننده ناپایداری مغارها و سایر فضاهای حفر شده زیرزمینی است؛ بنابراین اطلاع از خصوصیات ژئومکانیکی محیطی که سازه زیرزمینی در آن احداث می‌شود، مبنای اصلی و تعیین کننده در طراحی، ارائه سیستم نگهداری، تحلیل پایداری این قبیل سازه‌ها می‌باشد. برای بررسی و ارائه راهکار مناسب برای پایدارسازی مغارها، روش‌های قابل توجهی ارائه شده است؛ که معمول‌ترین آن‌ها عبارتند از:

روش‌های تجربی: مبتنی بر امتیازبندی توده سنگ شامل استفاده از روابط Q ، RMR ، و $VNMI$

روش‌های تحلیلی: استفاده از معادلات تعادل حدی و فرم بسته (نرم‌افزار $Rocsupport$)

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی
استاد تمام دانشگاه فردوسی مشهد

روش های عددی (نرم افزارهای، 3DEC, Udec, Phase2, Plaxis, Flac) غالباً استفاده از روش های فوق به نتایج مشترکی ختم می شود، ولی بهترین راهکار معمولاً زمانی بدست می آید که ترکیب آن ها برای تحلیل پایداری و پایدارسازی مغارها استفاده شود.

۲. مشخصات هندسی و ژئومکانیکی توده سنگ در برگیرنده حفریات نیروگاه سد پیر تقی

ساختمان سد و نیروگاه پیر تقی در فاصله حدوداً ۵۰ کیلومتری شرق میانه و ۴۵ کیلومتری جنوب غرب خلخال بر روی رودخانه قزل اوزن در استان اردبیل واقع گردیده است (شکل ۱).



شکل ۱- پلان موقعیت ساختمان سد و نیروگاه پیر تقی [۶]

محدوده مورد مطالعه از نظر جغرافیایی در شمال باختر ایران و از نظر زمین شناسی با توجه به تقسیم بندی ساختاری - رسوبی ایران عمدتاً در بخشی از واحد زمین شناسی ایران مرکزی که آذربایجان نامیده می شود و بخش اندکی نیز در زون سندانج - سیرجان قرار گرفته است. از دیدگاه سنگ چینه شناسی در گستره ای وسیع تر از محدوده مورد مطالعه تماماً سنگ های آتشفشانی و آذر آواری متعلق به سازند کرج و سازندهای جوان تر از آن (متعلق به سن ائوسن و الیگوسن) گسترش یافته اند. این سنگ ها طیف وسیعی از سنگ های ریولیتی و ریوداستیتی با بافت پورفیریتیک و بلورهای درشت کوارتز تا بازالت و آندزی بازالت با بافت مگاپورفیریتیک از یک سو و تناوبی از لایه های توف، توف برشی، ایگنمبریت و توف های لیتیک همراه با افق های شیشه ولکانیکی از سوی دیگر را شامل می گردند. [۶]

هندسده ناپیوستگی های موجود بر اساس برداشت های ضمن حفاری در سقف مغار ترانسفورمر اصلاح شده و مشخصات درزه ها به کمک نرم افزار Dips مورد بررسی قرار گرفت. پس از تعیین عمده درزه های موجود به عنوان پارامترهای ورودی ناپیوستگی در مدل سازی لحاظ گردید. در جدول ۱ وضعیت ناپیوستگی ها نشان داده شده است.

جدول ۱- ویژگی عمده ترین ناپیوستگی های موجود در محدوده مغار [۶]

زاویه اصطکاک	سختی برشی (GPa/m)	سختی نرمال (GPa/m)	جهت شیب (درجه)	شیب (درجه)	ناپیوستگی ها
۳۰	۲	۱۰	۲۹۴	۷۶	J۱
۳۰	۲	۱۰	۱۴۲	۲۲	J۲
۳۰	۲	۱۰	۳۲۸	۲۳	J۳
۳۰	۲	۱۰	۳۵۰	۸۰	J۴

به منظور تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی واحدهای سنگی دربرگیرنده مغار، آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگی بدست آمده از حفاری های اکتشافی، انجام شده است.

جدول ۲- خواص توده سنگ و نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر در محدوده مغار [۶]

پارامتر			Ave	Max	Min
وزن مخصوص (γ) (KN/m ³)			۲۵/۷	۲۶/۲	۲۴/۱
مقاومت فشاری تک‌محوره UCS, (MPa)			۲۰/۳	۳۱/۴	۹/۲
مدول الاستیسیته، E (GPa)			۹/۴۸	۱۱/۴۳	۷/۵۲
نسبت پواسون (ν)			۰/۳	۰/۳۴	۰/۲۶
نتایج آزمایش سه محوره	مقاومت چسبندگی (c), MPa		۷/۳	۸/۳	۱/۳
	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)		۵۴/۷	۶۲/۹	۳۷/۴

آزمون‌های مذکور بر اساس استاندارد (ISRM, ۱۹۸۱) انجام شده و شامل: آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و سه محوره، وزن مخصوص، تخلخل و درصد جذب آب است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در (جدول ۲) ارائه شده است.
رابطه‌ی مدول حجمی K و مدول برشی G نسبت به مدول یانگ E و نسبت پواسون ν این صورت است:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

۳. معرفی سیستم‌های نگهداری مغار

به طور کلی وسایل نگهداری مغار به پنج بخش تقسیم می‌شوند که در این مقاله توضیح مختصری در مورد دو روش برتر انتخابی ارائه می‌گردد.

۱-۳ میل مهارها^۱ RB

تجهیزاتی هستند که برای اتصال موضعی سنگ‌های اطراف مغار به لایه‌های عمیق‌تر به کار می‌روند. خود این وسایل شامل دو زیربخش دیگر هستند که در صورت خرابی هر کدام، میل مهاری نمی‌تواند عملکرد مطلوب داشته باشد. این زیر بخش‌ها عبارتند از:

میلگرد یا میله فولادی^۲ BE

چسب اپوکسی یا ماده سیمانی اطراف میلگرد^۳ EB

راک بولت‌ها یا میل مهارها در واقع نوعی از اتصالات پیچی هستند. در این سیستم ابتدا سوراخی در داخل توده سنگ ایجاد شده و سپس غلاف را درون سوراخ قرار می‌دهند. پس از آنکه غلاف به بدنه سوراخ چسبید، میله‌های مخصوصی با مقاومت بالا درون غلاف‌ها فرو می‌کنند. در آخر هم برای افزایش چسبندگی راک بولت به بدنه سوراخ، فضای دور آن را با مواد چسباننده قوی نظیر چسب‌های اپوکسی یا سیمان پر می‌کنند. عملکرد این زیربخش‌ها به صورت سری (متوالی) است و با خرابی هر یک کل مجموعه میل مهاری خراب می‌شود. به طور کل قابلیت اعتماد راک بولت‌ها به عوامل مختلفی نظیر میزان نیروی پیش تنیدگی اعمال شده در آن‌ها و یا شرایط محیطی استفاده از آن‌ها بستگی دارد. تعیین احتمال خرابی این زیر بخش‌ها با آزمایش‌های متعدد صورت می‌پذیرد.

۲-۳ پوشش بتنی نازک^۴ SC

^۱ : Rock Bolts

^۲ : Bar Element

^۳ : Epoxy Binder

^۴ : Shotcrete



پوشش‌های نازک بتنی یا در اصطلاح مهندسی شاتکریت، یکی از مهم‌ترین اجزای نگهدارنده بدنه مغار است که پیوستگی خوبی با سطح کار دارد. شاتکریت معمولاً بعد از سایر قسمت‌ها اجرا می‌شود و به عنوان پوشش نهایی مطرح می‌باشد. شاتکریت در واقع نوعی از پوشش‌های بتنی است که آن را به صورت درجا بر روی سطح کار می‌پاشند. به همین خاطر در اصطلاح مغارسازی به این عمل بتن پاشی می‌گویند. نکته مهمی که در تحلیل قابلیت اعتماد شاتکریت باید در نظر بگیریم آن است که خود شاتکریت به بخش شبکه‌های سیمی و راک بولت‌ها متصل است و خرابی این سه بخش با هم ارتباط مستقیم دارد.

۴. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری به روش عددی

توده سنگ محدوده مغار دارای چهار دسته درزه بوده و رفتار محیط متأثر از حضور ناپیوستگی‌ها خواهد بود. تعیین مرز پیوسته و یا ناپیوسته بودن توده سنگ امری مشکل بوده و نیازمند مطالعات فراوانی می‌باشد. در همین راستا بارتن در سال ۱۹۳۰ مطالعاتی را انجام داده و روشی را برای تعیین استفاده از روش عددی پیوسته و یا ناپیوسته ارائه نموده است [۱].

بر اساس این نظریه در صورتیکه مقدار کیفیت توده سنگ یا Q بین ۰٫۱ الی ۱۰۰ باشد میتوان از روش ناپیوسته جهت مدل‌سازی استفاده نمود مقدار Q محدوده مغار به طور میانگین ۶/۶ برآورد شده است که بر اساس نظریه بارتن شرایط ناپیوسته جهت انجام مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. از طرفی به دلیل عدم برقرار بودن فرض کرنش صفحه‌ای، استفاده از مدل‌سازی سه بعدی برای محدوده مغار صحیح بوده که در نهایت از نرم‌افزار المان مجزا سه بعدی $3DEC$ جهت مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

۵. تحلیل عددی به کمک نرم افزار $3DEC$

با ورود کامپیوتر روش‌های عددی متعددی برای تحلیل تنش‌ها توسعه پیدا کردند. این روش‌ها طی سال‌های گذشته برای کاهش هزینه‌ها و در نتیجه افزایش قابلیت‌ها، بهبود یافته و اصلاح شده‌اند. اساس روش‌های عددی تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط می‌باشد. یکی از روش‌های عددی روش اجزا مجزا می‌باشد که توسط کاندل در سال ۱۹۷۱ برای حل مسائل مکانیک سنگ در توده سنگ‌های درزه‌دار و در حالاتی که پیوستگی بین المان‌های جداگانه وجود ندارد، ابداع شد.

نرم‌افزار $3DEC$ یک برنامه سه‌بعدی است که بر اساس روش اجزاء مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، بکار می‌رود. اصول این نرم‌افزار مشابه نرم‌افزار دوبعدی $UDEC$ می‌باشد. این نرم‌افزار قادر می‌باشد که محیط‌های ناپیوسته، مانند توده سنگ‌های درزه‌دار را تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا استاتیکی شبیه‌سازی و تحلیل نماید [۵].

یک محیط ناپیوسته را می‌توان ترکیبی از بلوک‌های مجزا در نظر گرفت که ناپیوستگی‌ها به‌عنوان شرایط مرزی بین این بلوک‌ها عمل می‌کنند. بنابراین، این برنامه می‌تواند جابجایی‌های بزرگ در طول ناپیوستگی‌ها و چرخش بلوک‌ها را مورد تحلیل قرار دهد. رفتار بلوک‌ها را می‌توان به‌صورت مصالح صلب یا تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفت. بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر خود به‌مش‌هایی از المان‌های تفاضل محدود تقسیم شده و هر المان بر اساس قانون تنش - کرنش، رفتار خطی یا غیرخطی دارد. جابجایی نسبی ناپیوستگی‌ها، به وسیله روابط خطی یا غیرخطی جابجایی - نیرو، کنترل می‌شود [۵].

برای اجرای یک مدل توسط این نرم‌افزار، می‌بایست سه جزء اساسی از مسئله تعیین شوند:

۱- مدل المان مجزایی که بر هنده مسئله منطبق می‌باشد

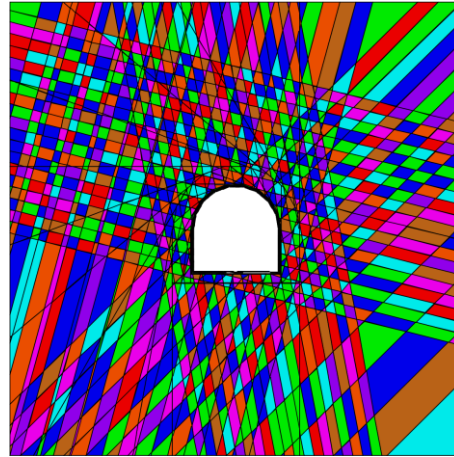
۲- مدل رفتاری و خصوصیات مواد

۳- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به ابعاد مجموعه سازه زیرزمینی، مدل در فضایی با ابعاد $۳۰ * ۲۵۰ * ۲۵۰$ متر ساخته شد. در شکل ۲ مدل اولیه و وضعیت قرارگیری سیستم درزه‌ها نشان داده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب هنده درزه برای وارد کردن در یک مدل، گامی تعیین‌کننده در تحلیل‌های المان مجزا است. معمولاً برای ساخت مدلی با اندازه و سرعت اجرای معقول در تحلیل‌های عملی، تنها درصد کمی از درزه‌ها را میتوان به‌طور واقعی در مدل وارد کرد؛ بنابراین باید داده‌های هندسی درزه را فیلتر کرده و با شناسایی درزه‌هایی که مستعد لغزش در شرایط بارگذاری تعریف شده هستند، تنها درزه‌هایی را که در واکنش مکانیکی مسئله مهم هستند انتخاب کند.

ابتدا برای رسیدن به تعادل اولیه، مدل ساخته شده بدون ایجاد حفاری تحت تنش‌های برجا قرار گرفته و برنامه اجرا گردید. پس از به تعادل

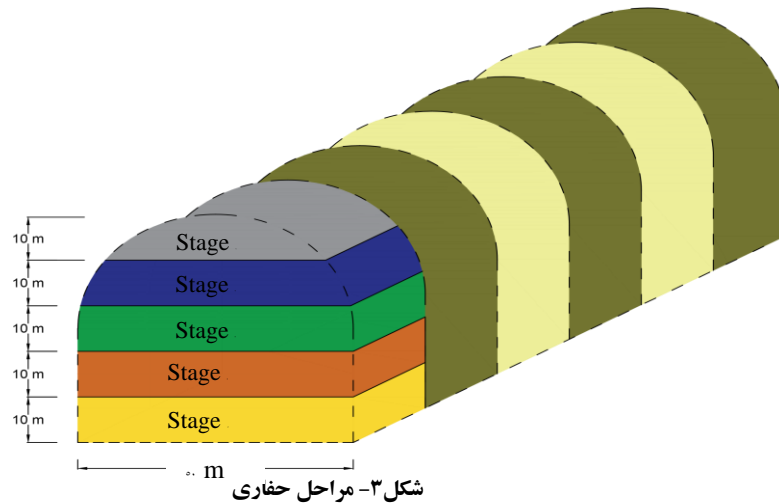
رسیدن مدل مراحل حفاری و ایجاد سیستم نگهداری انجام می‌شود.



شکل ۲- مدل ساخته شده به کمک نرم افزار *MDEC*

۱-۵ روش حفاری

برای شبیه سازی شرایط واقعی حفاری هر مرحله و نصب سیستم نگهداری آن، ابتدا برای هر کدام از مراحل حفاری، سیستم نگهداری اجرا شد. مراحل حفاری مطابق شکل ۳ مدل سازی شده است. حفاری به صورت چند مرحله ای می باشد به صورتی که ابتدا قسمت فوقانی مغار حفر و نگهداری می شود و سپس قسمتهای تحتانی حفر و نگهداری می شود. نحوه اعمال سیستم نگهداری به نرم افزارهای عددی به این صورت است که بعد از هر مرحله حفاری مغار سیستم نگهداری مربوط به آن مرحله هم اعمال می شود. همچنین برای اجرای مدل، مرحله حفاری به ۵ قسمت تقسیم می شود. این مراحل حفاری در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل حفاری

۲-۵ شبیه سازی سیستم نگهداری

حفاری و ساخت ایمن و اقتصادی سازه های زیرزمینی و مغارهای نیروگاه به عوامل متعددی وابسته است که انتخاب صحیح سیستم نگهداری یکی از مهم ترین پارامترها می باشد. نگهداری پیشنهادی در مغار ترانسفورمر، گالری و چاه های ارتباطی از سه پارامتر عمده شاتکریت، پیچ سنگ و کابل های تزریقی کششی تشکیل شده است. امروزه استفاده از انواع میل مهارها مؤثرترین و ارزان ترین شیوه نگهداری توده سنگ پیرامون بسیاری از فضاهای زیرزمینی است [۷]. علاوه بر خصوصیات مکانیکی فولاد، خصوصیات شاتکریت در مدل سازی *MDEC* راک بولت ها نیز مورد نیاز می باشد. پارامترهایی مانند

سختی باند تزریق و مقاومت باند تزریق از روابط موجود محاسبه و در مدل منظور شده است. شرح ابعاد و مشخصات مقاومتی سیستم نگهداری پیشنهادی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳- خصوصیات راک بولت های تزریقی

نوع نگهداری	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	سطح مقطع (m ²)	Kbond (N/m/m)	Sbond (N/m)
بولت های تمام تزریقی	۲۰	۱۰۰	۵e-۴	۱۵۰	۰٫۸

جدول ۴- خصوصیات شاکریت

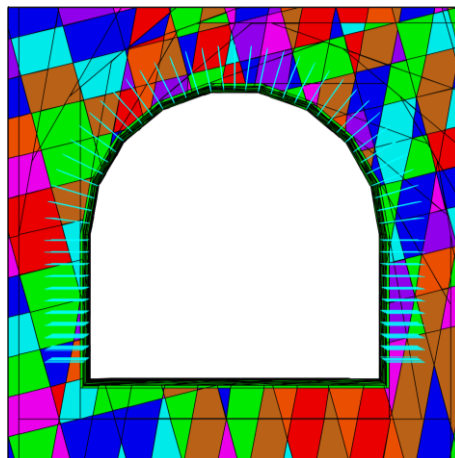
دانسیته (kg / m ³)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)
۲۴۰۰	۳e۴	۰٫۲	۱۶۷۰۰	۱۲۵۰۰

جهت کنترل تغییر شکل دیواره ابتدا سیستم راک بولت به طولها و فواصل مختلف نصب می شود. پس از نصب بولت، شاکریت به ضخامت های ۳۵-۳۰ سانتی متر مدل سازی گردید که مقادیر نیروی محوری، جابجایی ماکزیمم سقف و استفاده از شاکریت به ازای ضخامت های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. با ملاحظه جابجایی ماکزیمم سقف و مقایسه آن با روابط ساکورائی، در جدول ۵ سیستم نگهداری مناسب برای مغار شامل بولت به طول ۶ متر با فاصله داری ۲*۲ متر و شاکریت با ضخامت ۳۰ سانتی متر می باشد.

جدول ۵- نیروهای وارده به بولت ها در ضخامت های مختلف پوشش شاکریت مغار و مقدار جابجایی ماکزیمم

ضخامت شاکریت (cm)	نیروی محوری (KN)	جابجایی ماکزیمم سقف (mm)
۲۵	۴۳۰	۴۷
۳۰	۶۰۰	۳۰
۳۵	۷۴۰	۱۵٫۴

شکل ۴ نیز نحوه آرایش پیچ سنگ های استفاده شده به منظور جلوگیری از لغزش قطعات ایجاد شده در مغار را نشان می دهد؛ و همانطور که اشاره شد حداقل نگهداری پیشنهادی برای مغار، لایه شاکریت به ضخامت ۳۰ سانتیمتر و استفاده از پیچ سنگ دوغابی به صورت غیر سیستماتیک در جاهایی است که احتمال ریزش در اثر تلاقی دسته درزه های مختلف وجود دارد استفاده شده است.

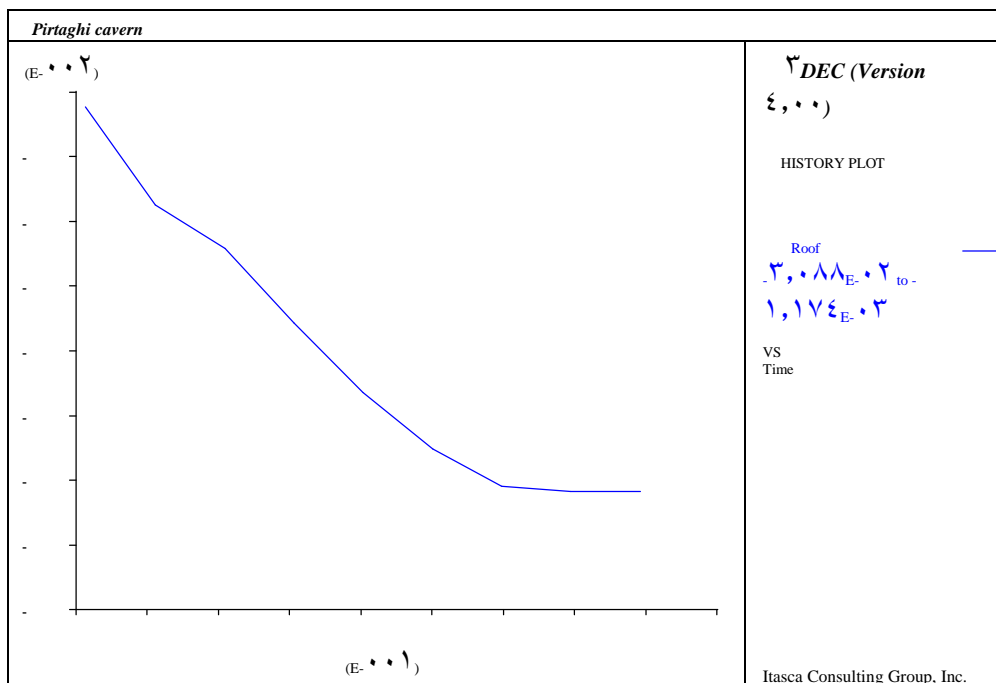


شکل ۴- مدل سازی شاکریت و راکبولت ها

۳-۵ تحلیل جابجایی در سقف پس از نصب سیستم نگهداری

یکی از پارامترهای مهم که معمولاً در تحلیل پایداری مغار مورد توجه قرار می‌گیرد، میزان جابجایی و نرخ کرنش در اطراف سازه زیرزمینی است. با برآورد میزان جابجایی در اطراف فضای زیرزمینی می‌توان به پایداری و یا عدم پایداری سازه موردنظر دست یافت. اگر میزان جابجایی و نرخ کرنش در اطراف حفریات زیرزمینی کمتر و یا مساوی مقدار بحرانی باشد، در این صورت می‌توان گفت که سازه موردنظر پایدار است. در غیر این صورت ناپایدار خواهد بود؛ بنابراین به کمک مدل سازی نرم افزاری مشاهده می‌شود حداکثر جابجایی در کف مغار به اندازه ۴/۵ سانتی متر و در سقف مغار هم مقدار جابجایی حداکثر ۳ سانتی متر می‌باشد.

در بخش‌هایی از سقف و دیواره‌های مدل تغییرات جابجایی‌ها در نقاط شاهد تعریف و مورد مطالعه قرار گرفت. نمودار ۱ مقدار حداکثر جابجایی محاسبه شده توسط نرم افزار برای چندین نقطه در سقف و دیواره‌های مغار را نشان داده شده است. مدل سازی به کمک ۳DEC نشان می‌دهد که بیشترین جابجایی‌ها در سقف مغار رخ داده است و در دیواره‌ها و کف مغار جابجایی زیادی اتفاق نیفتاده است.



نمودار ۱- حداکثر جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در نقطه شاهد سقف مغار

۶. نتیجه‌گیری

چهارچوب تمامی تحلیل‌های مکانیک سنگی بر پایه داده‌های زمین‌شناسی قرار دارد. اهمیت این داده‌ها به حدی است که اگر اطلاعات زمین‌شناسی ناکافی یا غلط باشد، حتی دقیق‌ترین و علمی‌ترین تحلیل‌های مکانیک سنگی نیز می‌تواند بی‌معنی و غلط از کار درآید. پس باید در تهیه اطلاعات زمین‌شناسی بسیار دقت کرد.

در این مقاله به ارزیابی پایداری و تخمین نگهداری مغار سد پیرتقی باروش عددی پرداخته شد. نتایج این بررسی حاکی از آن است که روش‌های عددی نگهداری ضعیفی را پیشنهاد کرده‌اند. اما نباید فراموش کرد که نگهداری سبک‌تر هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ فنی قابل توجه است.



در توده سنگ‌های با رفتار ناهمگون استفاده از روشهای مدل‌سازی عددی در کنار روشهای تجربی میتواند تا حد زیادی به پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ و مشخص کردن نقاط ضعف روشهای تجربی در طراحی کمک کند زیرا روشهای تجربی قادر به تعیین نحوه توزیع تنش‌ها و تغییر شکلها نیستند.

بررسی جابجایی‌های نقاط شاهد تحت شرایط متفاوت اعمال شده در مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سیستم نگهداری بهینه مغار پیشنهادی توسط روش‌های عددی به کمک نرم افزار ۳DEC، بولت به طول ۶ متر با فاصله‌داری ۲*۲ متر و شاتکریت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۷.۲. قدردانی

بدین‌وسیله از زحمات و همکاری مهندسین مشاور طوس آب تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. مراجع

۱. Barton, N. (۱۹۹۸), "Quantitative description of rock mass for the design of NMT reinforcement (Special Lecture ۱)", Int. Conf. on Hydro Power Development in Himalayas. Shimla, India.
۲. Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F. (۲۰۰۰), "Support of Underground Excavation in hard Rocks", A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield
۳. Lilly, P.A., Li, J. (۲۰۰۰), "Estimation Excavation Reliability From Displacement Modelling", Int. J. Rock Mech. Min. Sci, No. ۳۷, pp ۱۲۶۱-۱۲۶۲.
۴. Sakurai, S. (۱۹۸۳), "Direct strain Evaluation Technique in construction of underground opening", In proc ۲۲ U.S. symp, Rock Mech. Boston, pp ۲۷۸- ۲۸۲.
۵. Itasca Consulting Group, (۲۰۰۷), Inc. ۳DEC (۳ Dimensional Distinct Element Code Manual), Version ۴. Minneapolis: ICG.
۶. مهندسین مشاور طوس آب، (۱۳۹۰)، گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح سد و نیروگاه پیرتقی در حوضه قزل اوزن.
۷. مجدی، عباس؛ حسام مقدم علی و رضا مسعودی، (۱۳۸۷)، "بررسی پایداری بلند مدت مغار ترانسفورمر و گالری‌های ارتباطی در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد سیاه بیشه"، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.