

جانمایی بهینه افقی میان فضاهای بزرگ مقیاس در سنگ های با تناوب سخت و سست - مطالعه موردی فضاهای زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد کردستان

علی عالی انوری *^۱

سید محمد هاشمی جبلی^۲

چکیده

باتوجه به ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد کردستان که شامل تناوبی از لایه های ماسه سنگ دگرگون شده با میان لایه های اسلیت و فیلیت است و همچنین ابعاد نسبتاً بالای این سازه ها، چگونگی قرارگیری این سازه ها نسبت به یکدیگر به گونه ای که پایداری یکدیگر را تحت الشعاع قرار ندهند بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت اندرکنش سازه های زیرزمینی و تعیین فاصله مناسب بین آنها به منظور جلوگیری از تداخل میدانهای تنش و زون های پلاستیک تشکیل شده در اطراف آنها تعیین فاصله بهینه بین مغار نیروگاه با مغار ترانسفورمر که مهمترین سازه موجود در کنار مغار نیروگاه می باشد ضروری است. در این مقاله با استفاده از روشهای عددی المان مجزا و با در نظر گرفتن ساختارهای زمین شناسی حاکم بر محیط از قبیل سیستم ناپیوستگی ها و تفاوت ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ ها، پایداری و فاصله بهینه مغارها مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل ها نشان می دهند فاصله بهینه میان مغار ترانسفورمر و مغار نیروگاه در حدود ۴۰ متر می تواند تاثیر تنش ها را تا حد زیادی کاهش داده و با اعمال یک سیستم نگهداری مناسب اثرات مخرب تنش ها را به کمترین حد ممکن رسانید.

واژه های کلیدی

بهینه سازی، مغار نیروگاه تلمبه ذخیره ای، سد آزاد کردستان، تحلیل پایداری، تحلیل عددی.

مقدمه

۱. استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان، ali_aalianvari@kashanu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه کاشان.

مجزا نبوده و با قرار گیری در راستای یکدیگر موجب تکامل روند طراحی سازه های زیرزمینی می گردند. عمدتاً در مراحل اولیه ساخت فضاهای زیرزمینی که داده های فراوان و دقیقی در اختیار نیست، طراحی با روش تجربی که از سرعت و سادگی بیشتری برخوردار است، آغاز می شود. پس از به دست آمدن یک برآورد اولیه از وضعیت فضا و سیستم نگهداری مورد نیاز، فرآیند طراحی با تحلیل های پیچیده تر ادامه می یابد تا ضمن بررسی دقیق تر رفتار توده سنگ و سیستم نگهدارنده، اصلاحات مورد نظر اعمال شود (هوک^۳ ۱۹۸۳). از جمله مهمترین روش های تجربی می توان به سیستم های مهندسی طبقه بندی توده سنگ و همچنین معادلات تحلیلی اشاره نمود. علاوه بر روش های تحلیلی که بیانگر تخمینی کلی از شرایط پایداری مغار و فضاهای زیرزمینی هستند، با توجه به معادلات اساسی حاکم بر وضعیت ژئومکانیکی توده سنگ و مشخصات ساختگاه، با بهره گیری از روش های عددی نظیر المان محدود (FEM)^۴، تفاضل محدود (DFM)^۵، المان های مجزاء (DEM)^۶ و یا حجم محدود (FVM)^۷ می توان وضعیت سازه را شبیه سازی نمود و حالات مختلف آن را مورد بررسی و تحلیل قرار داد (ساکورایی^۸، ۱۹۹۷). در سال ۲۰۱۶ پنجمی و همکاران با استفاده از روش المان مرزی (BEM)^۹ به بررسی تنش در اطراف لوله های مدفون پرداختند (پنجی ۲۰۱۶) با دقیق شدن اطلاعات ورودی مدل می توان رفتار توده سنگ را با دقت مناسب شبیه سازی کرده و به نتایج قابل قبول تری دست یافت. از مدل های عددی برای محاسبه زون اغتشاش اطراف حفاریات، مشخص کردن رفتار یک توده سنگ درزه دار در حالت نگهداری شده و یا بدون نگهداری و تعیین مقدار جابجایی های ایجاد شده در محل استفاده می شود (ترزاقی^{۱۰}، ۱۹۵۸).

از آنجا که تعیین فاصله بهینه میان مغارها، علاوه بر تامین پایداری مورد نیاز موجب کاهش قابل ملاحظه هزینه های حفاری نیز می گردد لذا در این مقاله فاصله افقی بهینه میان مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد،

طی یک قرن اخیر و همزمان با پیشرفت دانش بشری در عرصه های گوناگون و بوجود آمدن نیازهای جدید، ایجاد و استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی (تونل ها و مغارها) نیز رو به افزایش گذاشته است. پایین تر بودن هزینه های اولیه و اجرایی نسبت به ایجاد تاسیسات در سطح زمین، جدا از مسائل توپوگرافی و عدم محدودیت در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی، امنیت در برابر سرقت و خرابکاری و بالاخره پایین بودن هزینه های سرمایه گذاری و گرمایش از جمله مزایایی است که باعث رویکرد به استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی در عرصه های گوناگون شده است. دامنه کاربری مغارها و فضاهای زیرزمینی بسیار متنوع است. از مراکز شهری و خدماتی نظیر بیمارستان و ورزشگاه گرفته تا نیروگاه های برق آبی و مخازن ذخیره هیدروکربن های نفتی از جمله مواردی است که تاکنون در فضاهای زیرزمینی احداث شده اند؛ در مجموع می توان اصلی ترین کاربری مغارها را در پنج گروه شامل نیروگاه های برق آبی و تلمبه ذخیره ای، ذخیره سیالات، مخازن دفن فضولات هسته ای، سیستم های فاضلاب و آب های هرز و کاربری های متفرقه دسته بندی نمود (براون^۱ ۱۹۸۷).

در اکثر سازه های زیرزمینی نیروگاه های برق آبی، مغار نیروگاه یکی از بزرگ ترین و حساس ترین سازه های حفر شده در مجموعه نیروگاه است. با توجه به اهمیت وسایل و تجهیزاتی که در مغارها جای می گیرد، موضوع پایداری و نگهداری این نوع سازه ها دارای اهمیت بسزایی است. از جمله مهمترین مشکلاتی که در عملیات اجرایی با آن مواجه می شویم، می توان به مواردی همچون کاهش پایداری توده سنگ اطراف مغار، اعمال فشار مازاد بر سیستم نگهدارنده دائم و موقت، تأثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ و متعاقباً ایجاد خطرات جانی و مالی اشاره کرد (کرش^۲ ۱۹۸۹). تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با سه روش تجربی، تحلیلی و عددی انجام می پذیرد. چگونگی استفاده از این سه روش از اهمیت زیادی برخوردار است، البته این سه روش از یکدیگر

⁶ Discrete Element Method

⁷ Finite Volume Method

⁸ Sakurai

⁹ Boundary Element Method

¹⁰ Terzaghi

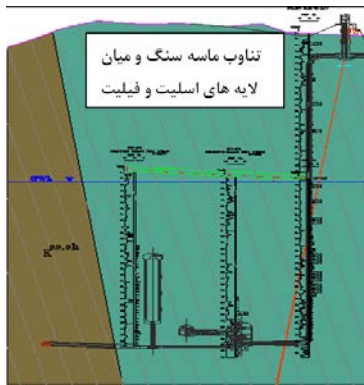
¹ Brown

² Kirsch

³ Hoek

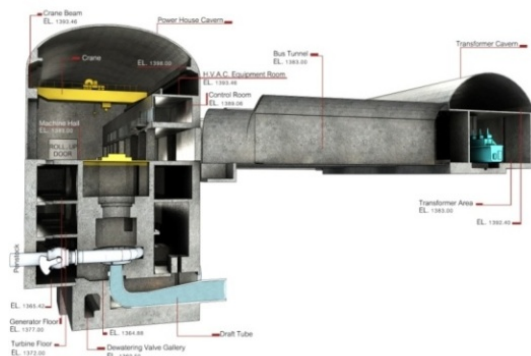
⁴ Finite Element Method

⁵ Differential Fracture Method



شکل (۲): محدوده قرارگیری سازه های مورد مطالعه (گزارش زمین شناسی مهندسی طرح-۱۳۹۲)

مغار نیروگاه طرح تلمبه ذخیره ای سد آزاد به عرض ۲۶/۱ متر و ارتفاع ۴۶/۱۴ متر و طول ۸۵ متر در عمق حدود ۵۲۰ متری زمین در ساحل چپ دریاچه سد آزاد پیش بینی شده است. مغار ترانسفورمر نیز به عرض ۱۸/۳ و ارتفاع ۱۸/۶ و طول ۱۳۶/۸ جانمایی شده است.



شکل (۳): موقعیت تقریبی قرارگیری مغار ترانسفورمر و مغار نیروگاه نسبت به یکدیگر (گزارش زمین شناسی مهندسی طرح-۱۳۹۲)

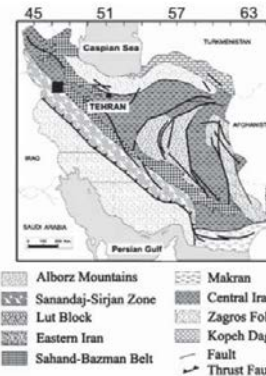
پارامترهای ژئومکانیکی سنگهای منطقه

با توجه به اهمیت سازه های زیرزمینی در محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد، برای اندازه گیری خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و توده سنگ ساختمانی، برنامه مطالعاتی گسترده ای شامل برداشت های سطحی زمین شناسی، حفر گمانه های اکتشافی عمیق و کوتاه، حفر گالری های اکتشافی و انجام آزمایش های برجا و آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفت. سپس با استفاده از این اطلاعات پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ های دربرگیرنده ساختمانی برآورد شده است. ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ محدوده مغار در جداول ۱ و ۲ ارائه شده اند.

با استفاده از روشهای عددی (نرم افزار UDEC) و روشهای تحلیلی و تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و با در نظر گرفتن ملاحظات زمین شناسی و اجرایی موقعیت مناسب انتخاب گردید.

نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد

طرح نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد در استان کردستان و در مجاورت رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه های مهم رودخانه سیروان در حال احداث می باشد. این نیروگاه بر اساس تقسیم بندی زمین شناسی ساختمانی در زون زمین شناسی سنندج-سیرجان قرار گرفته است. واحد سنگ چینه ای در محدوده این سازه ها، عمدتاً شامل ماسه سنگ های دگرگون شده ای با ضخامت از چندین سانتی متر تا حداکثر ۱ متر است که تحت تاثیر دگرگونی، کمی دگرگون شده اند لایه های کالکوفیلیت به ندرت در میان لایه ها دیده می شود که ضخامت آنها از چندین سانتی متر بیشتر نمی شود ابعاد دانه ها متوسط تا درشت دانه است و درزه و شکاف های این لایه ها عمدتاً با پرشدگی کربناته (عمدتاً کلسیتی) با ضخامت در حدود چند میلی متر پر شده است.



شکل (۱): موقعیت نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد روی نقشه زمین شناسی ایران (گزارش زمین شناسی مهندسی طرح-۱۳۹۲)

شکل ۲ مقطع زمین شناسی محدوده قرارگیری مغار نیروگاه را نشان می دهد

برداشت شده (نقشه‌های حین ساخت) از درون تونل های دسترسی (اصلی و میانی) و همچنین ۳۰۰ متر ابتدایی تونل پایاب استفاده شده است. در این راستا در ورودی و خروجی تونل‌ها و مسیر آنها درزه‌نگاری صورت پذیرفت و مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های برداشت شده در درون گمانه‌های اکتشافی نیز مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفت.

جدول(۳): خصوصیات هندسی ناپیوستگیها در اطراف مجموعه

نیروگاهی

فاصله داری(متر)	شیب/جهت شیب	ناپیوستگی
۰/۵	۸۲/۰۱۵	لایه بندی
۱	۷۰/۲۷۴	J1
۱	۵۴/۱۴۶	J2
۱	۴۹/۰۵۸	J3

با توجه به قرارگیری سازه‌ها در واحد ماسه سنگی با میان لایه های اسلیت و فیلیت، خصوصیات هندسی ناپیوستگی ها در این واحد سنگی در جدول ۴ ارائه شده است.

تحلیل پایداری مغار با استفاده از سیستم طبقه بندی مهندسی توده سنگ

جدول(۴): پارامترهای مقاومت برشی درزه های طبیعی در شرایط

اشباع(گزارش مکانیک سنگ طرح-۱۳۹۲)

واحد سنگی	ماسه سنگ دگرگون شده	
تعداد نمونه	۳۳	
معيار موهر-کولمب	c (Mpa)	۰/۲
	$\Phi(^{\circ})$	۳۵
معيار بارتن-باندیس	JRC	۹
	JCS(Mpa)	۳۵
	$\Phi(^{\circ})$	۲۹

در طراحی تجربی فضاهای زیرزمینی از روش‌های مرسوم طبقه بندی توده سنگ (RMR و Q) استفاده شده و براین اساس سیستم نگهداری پیشنهادی برآورد شده است. مغار نیروگاه مهمترین سازه موجود در طرح تلمبه ذخیره ای آزاد است. از آن جا که مغار نسبت به دیگر سازه‌های زمینی دارای ابعاد گسترده تری است پایداری آن از اهمیت ویژه ای برخوردار می

جدول(۱): میانگین پارامترهای برآوردشده برای ماده سنگ در

شرایط اشباع(گزارش مکانیک سنگ طرح-۱۳۹۲)

نوع سنگ	ماسه سنگ دگرگون شده	اسلیت- فیلیت
UCS (Mpa)	۶۹	۲۰
تخلخل (%)	۲/۲۶	۱/۸۴
جذب آب (%)	۰/۸۵	۰/۶۹
سرعت امواج (m/s)	۵۶۴۸	۵۵۳۹
برشی	۲۴۹۳	۲۸۰۰
	۲۴	۲۲
الاستیک (Gpa)	۳۱	۳۰
ضریب پواسون	۰/۲۴	۰/۲۹
	۰/۳۸	۰/۳۲
چگالی (gt/cm3)	۲/۶۷	۲/۶۹

جدول(۲): پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ(گزارش مکانیک

سنگ طرح-۱۳۹۲)

نوع سنگ	ماسه سنگ دگرگون شده	اسلیت- فیلیت
RMR89	۴۵-۵۳	۳۱-۴۸
Q	۰/۵۵-۰/۹۵	۰/۶-۱/۱
توصیف سنگ براساس روش GSI	Very Blocky-good to fair Rock(48-57)	Blocky-fair Rock(27-44)
چسبندگی (Mpa)	۰/۳-۰/۴	۰/۱۵-۰/۲
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵-۴۰	۲۵-۳۰
مدول تغییر شکل (Gpa)	۴-۶	۱/۵-۲/۵

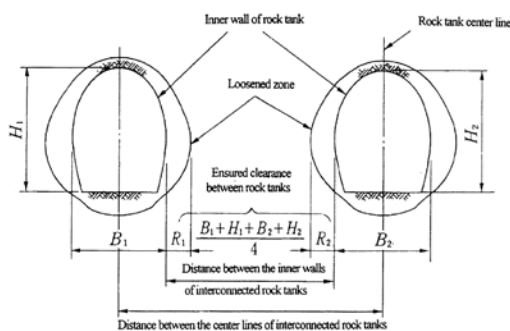
خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی ها

رفتار توده سنگ‌ها علاوه بر مشخصات سنگ بکر به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های آن قرار دارد. شکستگی های منطقه حاصل چین خوردگی ناحیه ای می باشد که بسته به تنوع لیتولوژی آثار کمی و کیفی متفاوتی از خود بجای گذارده است. برای ارزیابی مشخصات ناپیوستگی- های موجود در محل سازه‌های زیرزمینی و تونل های آب‌بر و دسترسی موجود در طرح تلمبه ذخیره ای آزاد از اطلاعات

سال ۱۹۹۹ چیکاهایسا و همکاران به تحلیل رفتار توده سنگ حفاری شده به عنوان موزه زیرزمینی پرداختند. هوشینو در سال ۱۹۹۳ به بررسی ساختار فضای حفاری شده زیرزمینی برای مخازن نفتی مناطق ارگانیک پرداخت. در سال ۲۰۰۳ تزوکا و سوکا رابطه‌ای ریاضی جهت تخمین فاصله بین دو مغار ارائه دادند. در این مطالعه نیز جهت صحت سنجی مدل‌سازی انجام شده از این رابطه استفاده شده است. فاصله مجاز بین مغارها تحت شرایط دینامیکی و شرایط هیدرولیکی زیر زمین تعیین می‌شود. به منظور اطمینان از فاصله بین مغارها تحت شرایط دینامیکی به طور سرانگشتی استفاده می‌شود. (چن ۲۰۱۵)

$$L = \left(\frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} \right) + R_1 + R_2 \quad (۲)$$

که در آن L فاصله بین مرکز دو مغار، B_1 و B_2 عرض مغارهای اول و دوم، R_1 و R_2 به ترتیب شعاع زون ریزش مغارهای اول و دوم (زون ریزش به ناحیه‌ای اطلاق می‌شود که فاکتور ایمنی در آن کمتر از $1/5$ است)، H_1 و H_2 به ترتیب ارتفاع مغارهای اول و دوم می‌باشد. این پارامترها در شکل ۴ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن روابط فوق و شرایط حاکم بر مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر آزاد، فاصله افقی میان دو مغار در حدود ۳۶ متر برآورد شده است.



شکل (۴): رابطه میان فاصله بهینه بهینه فضاهای زیرزمینی (چن

۲۰۱۵)

مدل سازی عددی

برای جانمایی و طراحی مغار نیروگاه ضروری است که شرایط زمین شناسی، ساختاری و همچنین تنش های موجود در منطقه به طور ویژه مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور برنامه کاملی از آزمایشات آزمایشگاهی و برجا به همراه برداشت های

باشد. با توجه به اینکه پایداری این سازه می بایست در طولانی مدت برقرار گردد و سیستم تحکیمات نصب شده در آن نیز از نظر ظرفیت کاری و همچنین کارایی لازم در بلند مدت توانایی لازم را داشته باشند. با در نظر گرفتن پارامترهای ارائه شده فوق و با استفاده از روش های طبقه بندی تجربی، سیستم های نگهداری در نظر گرفته شده برای مغار نیروگاه و ترانسفورمر در جدول ۵ نشان داده شده اند.

جدول (۵): طراحی تجربی سیستم نگهداری مجموعه نیروگاه بر اساس روش طبقه بندی مهندسی سنگ (گزارش مکانیک سنگ

طرح-۱۳۹۲)

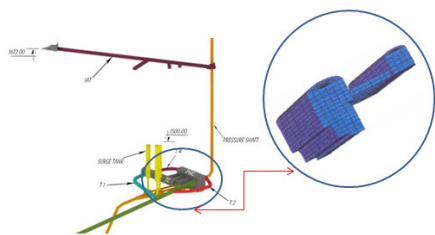
سیستم نگهداری توصیه شده	روش طبقه بندی	فضای زیرزمینی
سقف: ۹-۱۲ سانتیمتر شاکریت مسلح شده با فیبر فولادی و پیچ سنگ منظم به طول ۶-۷ متر با فاصله داری ۲/۰ متر	Q	مغار نیروگاه
دیواره ها: ۱۲-۱۵ سانتیمتر شاکریت مسلح شده با فیبر فولادی و پیچ سنگ منظم به طول ۱۰-۱۲ متر با فاصله داری ۱/۷۵ متر		
۱۰ میلیمتر شاکریت و شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۴ متر با فاصله داری ۱/۵ تا ۲ متر	RMR	مغار ترانسفورمر
۱۰ سانتیمتر شاکریت مسلح با فیبر فولادی و شبکه منظم پیچ سنگ به طول ۵ متر با فاصله داری ۲/۵ متر	Q	

باید توجه داشت علیرغم آن که در RMR محاسبه شده توده سنگ در رده با توصیف سنگ نسبتاً خوب تقسیم بندی شده است لیکن با توجه به وجود گسل ها و زون های برشی و خرد شده و اندازه گیری مقدار تراوایی تا میزان ۱۰۰ لوژن (رده بسیار زیاد) در این نواحی، پارامتر RMR اصلاح شده برای این نواحی می توان تا ۱۰ واحد دیگر کاهش یابد و در رده سنگ های سست تر قرار بگیرد.

جانمایی بهینه مغارها با استفاده از روابط تحلیلی

در سال ۲۰۱۵ چن و همکاران برای سنگ های میزبان مواد رادیواکتیو و زباله های اتمی شاخصی جدید به نام Q_HLW را معرفی کردند. کودو و همکاران در سال ۱۹۹۹ مطالعاتی در زمینه طراحی سیستم نگهداری برای حفاری های زیرزمینی که شامل کرنش نرمی سنگ بودند انجام دادند. در

نظر گرفته شده‌اند) جهت تنش‌های برجا در محل مغاره‌ها، در مدلسازی وارد شده‌اند. شکل ۶ مدلسازی و وضعیت هندسی مغاره‌ها نسبت به هم را نشان می‌دهد.



شکل (۶): وضعیت و شکل هندسی مغار ترانسفورمر و نیروگاه

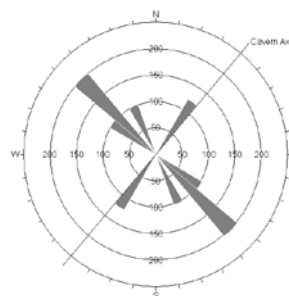
با توجه به اهمیت اندرکنش سازه‌های زیرزمینی و تعیین فاصله مناسب بین آنها به منظور جلوگیری از تداخل میدانهای تنش و زون‌های پلاستیک تشکیل شده در اطراف آنها تعیین فاصله بهینه بین مغار نیروگاه با مغار ترانسفورمر که مهمترین سازه موجود در کنار مغار نیروگاه می‌باشد بسیار حائز اهمیت است. برای تعیین فاصله مناسب بین این دو سازه با استفاده از آنالیزهای عددی باید توجه داشت که حفر هر کدام از سازه‌ها نمی‌بایست تغییرشکل‌های رخ داده در سازه مجاور را بیش از ۱۰٪ افزایش دهد و همچنین ضریب اطمینان (که ضریب اطمینان به صورت نسبت مقاومت فشاری محصور به تنش اصلی بزرگتر محاسبه می‌شود) در توده سنگ بین دو سازه از ۱/۵ کمتر نشود (ساکورایی ۱۹۹۷). لذا به منظور تعیین جانمایی بهینه و فاصله افقی بهینه میان مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر از دو روش المان مجزا و المان محدود استفاده شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مدلسازی به روش المان مجزا

برای انتخاب روش مدلسازی عددی در مسائل مهندسی سنگ ابتدا باید مشخص کرد که محیط مورد نظر پیوسته^۱، ناپیوسته^۲ یا شبه پیوسته^۳ است. مغار نیروگاه دارای رفتار ناپیوسته است. روش المان مجزایک روش عددی مدلسازی ناپیوسته است و قابلیت شبیه‌سازی رفتار محیط سنگی درزه‌دار، تحت شرایط شبه استاتیک یا دینامیک را دارا است (روچان^۴ ۲۰۱۴). با توجه به قابلیت بالای نرم افزار UDEC در مدل کردن درزه‌ها و محاسبه میزان جا به جایی و رفتار توده سنگ اطراف فضاهای زیرزمینی، مدلسازی‌ها

ساختاری در درون گالری‌های اکتشافی برای شناخت کامل توده سنگ و محیط دربرگیرنده مغار پیش بینی و اجرا شده است. در مرحله طراحی جانمایی محل مغار، تعیین محور مناسب متناسب با شرایط تنش‌های برجا، فاصله دارای آن از سازه‌های مجاور، تعیین شکل بهینه آن به خصوص در سقف و دیواره‌ها و در نهایت تعیین نگهداری مورد نیاز برای کنترل تغییر شکل‌ها و نگهداری زون پلاستیک از مراحل مختلف یک طراحی مناسب می‌باشند که سعی شده تمامی این مراحل و نکات بیان شده در طراحی مغار نیروگاه طرح آزاد لحاظ گردند. در معیار طراحی ارائه شده توسط هوک نیز کنترل‌های ساختاری به همراه تعیین زون‌های تحت کشش و برش در اطراف مغار که به شدت به وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ وابسته می‌باشند مورد تأکید قرار گرفته است. (هوک ۲۰۰۷)

همان‌طور که گفته شد علاوه بر روش‌های تحلیلی و تجربی از روش عددی نیز برای پیش بینی رفتار توده سنگ اطراف مغار استفاده شده است. داده‌های ورودی مورد استفاده در مدل سازی که شامل خصوصیات درزه‌داری و ژئومکانیکی سنگ‌های منطقه است. شکل ۵ وضعیت ناپیوستگی‌های منطقه و محور مغار را نشان می‌دهد. بررسی برداشت‌های سطحی در محدوده مغار نیروگاه و برداشت‌های حین ساخت نشان می‌دهد که درزه‌ها دارای طولی شدگی زیاد بوده و عملاً درزه‌هایی که در سطح برداشت شده‌اند در محدوده مغار هم مشاهده شده‌اند لذا در مدلسازی درزه‌ها ممتد در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۵): وضعیت ناپیوستگی‌های محدوده مغار و محور آن

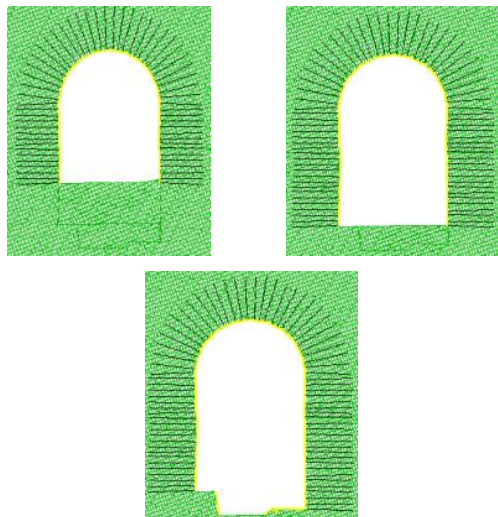
سایر اطلاعات نظیر اطلاعات ورودی و شرایط مرزی نظیر سیستم نگهداری اولیه، تنش‌های برجای منطقه (از نوع ثقیل در

³ Pseudo continuum

⁴ Ruixuan

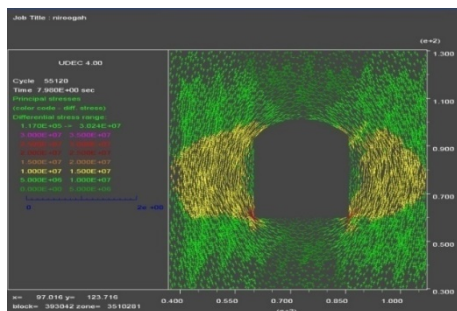
¹ Continuum

² Discontinue

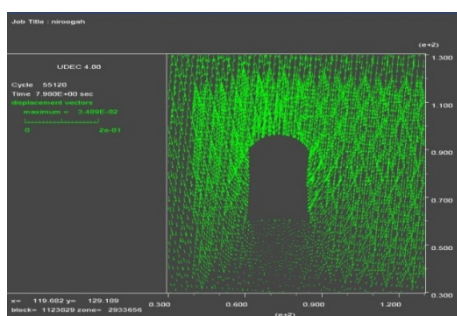


شکل ۸- مراحل مختلف حفاری به همراه نصب سیستم نگهداری

وضعیت تنش های اصلی و بردارهای جابجایی در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده اند.



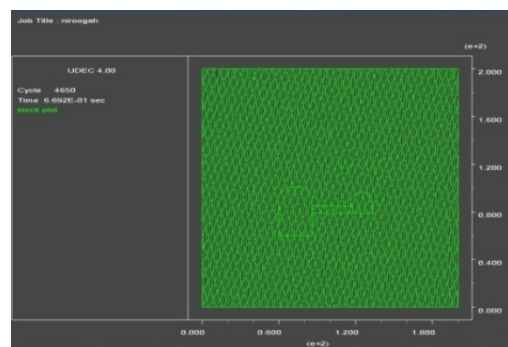
شکل (۹): وضعیت تنش های موجود پس از حفر اولین مغار (مغار نیروگاه)



شکل (۱۰): وضعیت بردارهای جا به جایی پس از حفر اولین مغار (مغار نیروگاه)

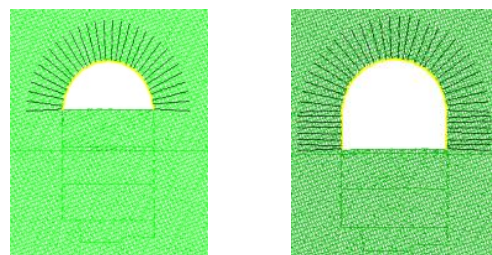
همانگونه که در اشکال مشاهده می شود بیشترین میزان جا به جایی تنها با حفر مغار نیروگاه در سقف برابر با ۳,۵ سانتیمتر می باشد. در مرحله بعد، تونل اتصال دومغار به طول ۳۰ متر و در انتها مغار ترانسفورمر حفاری و وضعیت تنش ها و بردارهای جا به جایی مورد تحلیل قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده، حداکثر میزان جا به جایی سقف و دیواره ها برابر با ۹ سانتی متر در تونل میانی محاسبه گردیده است.

انجام شد. یکی از معروفترین نرم افزارهای المان مجزا برای تحلیل پایداری سازه های زیرزمینی UDEC است که توانایی بالایی در مدل کردن درزه ها و محاسبه میزان جابجایی و رفتار توده سنگ اطراف فضاهای زیر زمینی دارد. مدل اولیه و وضعیت قرارگیری سیستم درزه ها در شکل ۷ نشان داده شده است. توده سنگ اطراف مغار با استفاده از بلوک های تغییر شکل پذیر مدل شده است. مراحل مدل سازی به صورت زیر است: ابتدا برای رسیدن به تعادل اولیه، مدل ساخته شده بدون ایجاد حفاری تحت تنش های برجا قرار گرفته و برنامه اجرا گردید. سپس برای شبیه سازی شرایط واقعی حفاری هر مرحله و نصب سیستم نگهداری آن، ابتدا برای هر کدام از مراحل حفاری، سیستم نگهداری اجرا شد و برنامه برای تعادل نهایی آن مرحله، اجرا گردید. مراحل حفاری در شکل ۸ نشان داده شده است



شکل (۷): سیستم درزه ها و وضعیت قرارگیری سیستم درزه ها نسبت به مغار نیروگاه و مغار رانسفورمر

حداکثر روباره برابر با ۴۰۰ متر بوده که ۱۰۰ متر آن مدل سازی و مازاد آن به صورت تنش های عمودی در بالای مدل وارد شده است. نسبت تنش های افقی به قائم جهت مدل سازی بااستناد به انجام آزمایش های شکست هیدرولیکی و آزمایش های برجا در ساختگاه برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری توده سنگ الاستیک و درزه ها موهر-کلمب فرض شده است.

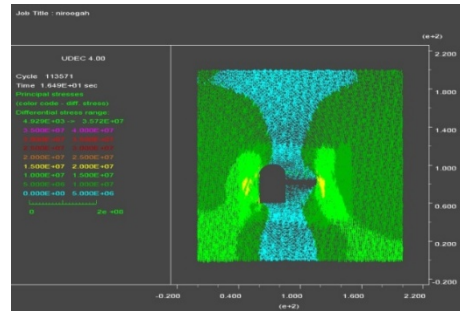


عبارت دیگر عبارت دیگر سیستم درزه موجود کنترل کننده رفتار کل توده سنگ نیست.

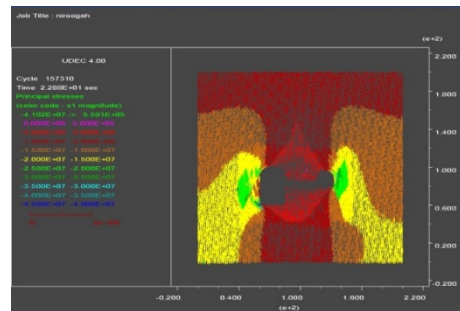
باتوجه به ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی و همچنین ابعاد نسبتاً بالای این سازه ها، چگونگی قرارگیری این واحدها نسبت به یکدیگر به گونه ای که پایداری یکدیگر را تحت الشعاع قرار ندهند بسیار حائز اهمیت است فاصله دو مغار(نیروگاه و ترانسفورمر) بنا بر ملاحظات اقتصادی مثل کاهش طول و هزینه رباط های چند رشته ای که ژنراتورها را به ترانسفورمرها متصل می سازند و نیز تمرکز و مدیریت مناسب تر بر روی منابع، تا حد امکان باید به یکدیگر نزدیک باشند. از سوی دیگر با توجه به اهمیت اندرکنش سازه های زیرزمینی و تعیین فاصله مناسب بین آنها به منظور جلوگیری از تداخل میدانهای تنش و زون های پلاستیک تشکیل شده در اطراف آنها تعیین فاصله بهینه بین مغار نیروگاه با مغار ترانسفورمر که مهمترین سازه موجود در کنار مغار نیروگاه می باشد بسیار حائز اهمیت است. برای تعیین فاصله مناسب بین این دو سازه با استفاده از آنالیزهای عددی باید توجه داشت که حفر هر کدام از سازه ها نمی بایست تغییرشکل های رخ داده در سازه مجاور را بیش از ۱۰٪ افزایش دهد و همچنین ضریب اطمینان (که ضریب اطمینان به صورت نسبت مقاومت فشاری محصور به تنش اصلی بزرگتر محاسبه می شود) در توده سنگ بین دو سازه از ۱/۵ کمتر نشود

از سوی دیگر با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی های عددی، مهمترین عامل در ناپایداری مغار نیروگاه وجود لایه اسلیت و فیلیت و حرکت بلوکهای سنگی موجود در این محدوده است. لایه اسلیتی در برخی نقاط در سقف مغار اصلی باعث به وجود آمدن درزه هایی با پارامترهای مقاومتی پایین است که موجب لغزش بلوک ها و در نتیجه ناپایداری در این نواحی شده است. بنابراین لازم است برای کنترل پایداری از یک سیستم نگهداری اضافی استفاده شود. که این جابجایی در مدلسازی با UDEC نشان داده شده است. براین اساس با توجه به مدلسازی های انجام شده فاصله افقی بهینه میان مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر معادل ۴۰ متر در نظر گرفته شده است.

مراجع



شکل(۱۱): وضعیت تنش های موجود پس از حفر سازه میانی



شکل(۱۲): وضعیت تنش های موجود پس از حفر نهایی

در مدل سازی مغار نیروگاه تلمبه – ذخیره ای سد آزاد، با توجه به نتایج به دست آمده از مقایسه مقدار جابجایی های رخ داده در اطراف فضاهای حفاری شده، حداکثر میزان جابجایی سقیف و دیواره ها برابر با ۹ سانتیمتر در تونل میانی محاسبه و طول بهینه تونل متصل کننده ۲ مغار برابر با ۳۰ متر انتخاب گردید.

نتیجه گیری

باید به این نکته اشاره کرد که هدف از انجام این تحقیق، بیان معتبر بودن یا نبودن روش های مدل سازی پیوسته و یا ناپیوسته برای بررسی رفتار توده سنگ اطراف حفاریات زیرزمینی نیست، بلکه اعتقاد بر آن است که با آگاهی کافی از خصوصیات مکانیکی و زمین شناسی منطقه می توان از همه این روش های عددی به نحو مطلوبی استفاده کرده و به نتایج قابل قبولی دست یافت.

در مدل سازی مغارهای نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه مقدار جابجایی های رخ داده در اطراف فضای حفاری شده و با توجه به اینکه بلوک خاصی در اطراف مغار حرکت نکرده است (مدل المان مجزا) می توان گفت که این محیط دارای یک رفتار شبه پیوسته است به

using BEM, *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 1(2), 29-37.

14- Sakurai, S. (1997). Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling. *Tunnelling and Underground space Technology*, 12(4), 453-460. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00004-2).

15- Terzaghi, K. and Richart, F.E. 1952. Stresses in rock about cavities. *Geotechnique* 3, 57-90.

16- Tesuka., Loset, F., 2003. Results of Q-and RMR logging and tilt testing of cores from bore holes KA2511A, KAS02 and KA2598A at Äspö HRL. SKB Report IPR-01-35. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm.

17- Ruixuan Tang, Echuan Yan, Jingsen cai.(2014)" excavation sequence optimization of underground water sealed caverns" faculty of engineering, China, university of geosciences, vol.19

18- UDEC Users Manual, (Ver. 1. 8) ,(1992), Vol. I , Itasca Consulting Group Inc

19- Vijai Saran, Einar Broch.(2014)" Three dimensional numerical analysis of underground works at xiaolangdi multipurpose project in china"WTC .India

20- w.A.Peck, D.P Sainsbury, M.F.Lee.(2013) "The important of geology and roof shape on the stability of shallow caverns" *Australian Geomechanics* Vol 48 September 2013.

۱- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.(۱۳۹۲)" گزارش زمین شناسی مهندسی مطالعات مرحله دوم، طرح تلمبه ذخیره‌ای آزاد".ایران

2- Brown, E.T. (1987)." Introduction. Analytical and computational methods in engineering rock mechanics", (ed. E.T. Brown), 1-31. London: Allen and Unwin.

3- Chen, , J. Wang, Z.H. Zong, (2015)," A new rock mass classification system QHLW for high-level radioactive waste disposal" *Engineering Geology*, Volume 190, 14 May 2015, Pages 33–51

4- Chikahisa.H, Ohta.R, (1999), "Image Analysis system for areal measurements to preserve historic masonry wall, Japan, Harmonising Rock Engineering and the Environment

5- Hoek, E. 1983. Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine. Lecture. *Géotechnique* 33(3), 187-223.

6- Hoek, E. (1965). Rock fracture under static stress conditions. Ph.D. thesis, University of Cape Town.

7- Hoek. E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavation in Hard Rock*. London: Taylor & Francis. ISBN: 9054101865

8- Hoek, E. & Moy, D. (1993) " Design of Large Powerhouse Caverns in Weak Rock *Comprehensive Rock Engineering*, Vol.5, ch.4, Pergamon Press, pp.85-109

9- Hoshino, 1993. KBS-3H complementary studies, 1990–1993. SKB Report TR-12-01. Swedish

10- Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm.

11- Kirsch, G., 1998. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Veit. Deit. Ing.* 42 (28), 797-807.

12- Panji. M, Ansari. B, (2016)," Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM" *Computers and Geotechnics* 81 (2017) 360–367

13- Panji, M., Asgari Marnani, J., & Tavousi Tafreshi, S., 2011. Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability