

مقایسه روش‌های عددی مختلف در تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیر زمینی مسجد سلیمان

سیف الدین موسی زاده^۱، کامران گشتاسبی^{۲*}، عبدالهادی قزوینیان^۳

۱- مربی، گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت بهمن ۹۰، پذیرش اسفند ۹۲)

چکیده

هدف از این تحقیق کاربرد روش‌های عددی مختلف جهت بررسی رفتار مغار نیروگاه مسجد سلیمان است. برای نیل به این هدف از روش‌های عددی پیوسته مانند المان محدود (نرم افزار Phase2) و تفاضل محدود (نرم افزار FLAC) استفاده شد. همچنین از روش عددی المان مجزا (نرم افزار دو بعدی UDEC) جهت مدل سازی محیط به صورت ناپیوسته و مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده شد. در این تحقیق مغارهای نیروگاه با اعمال یک سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش‌های مختلف عددی مدل سازی شدند. در نهایت نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ساخته شده توسط نرم افزار UDEC در مقایسه با دو نرم افزار دیگر، به شرایط واقعی زمین نزدیک تر است. با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه مقدار جابجایی‌های رخ داده در اطراف فضای حفاری شده می‌توان گفت که این محیط دارای یک رفتار شبه پیوسته است. ولی وجود لایه‌های ضعیف (به خصوص لایه سیلتستون در سقف مغار اصلی) باعث به وجود آمدن درزه‌هایی با پارامترهای مقاومتی پایین شده است که این عامل باعث باز شدگی درزه‌ها و ناپایداری در این نواحی شده‌اند. مدل سازی با UDEC این موضوع را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی

روش‌های عددی، المان محدود، تفاضل محدود، المان مجزا، تحلیل پایداری، مسجد سلیمان، Phase2، FLAC و UDEC

۱- مقدمه

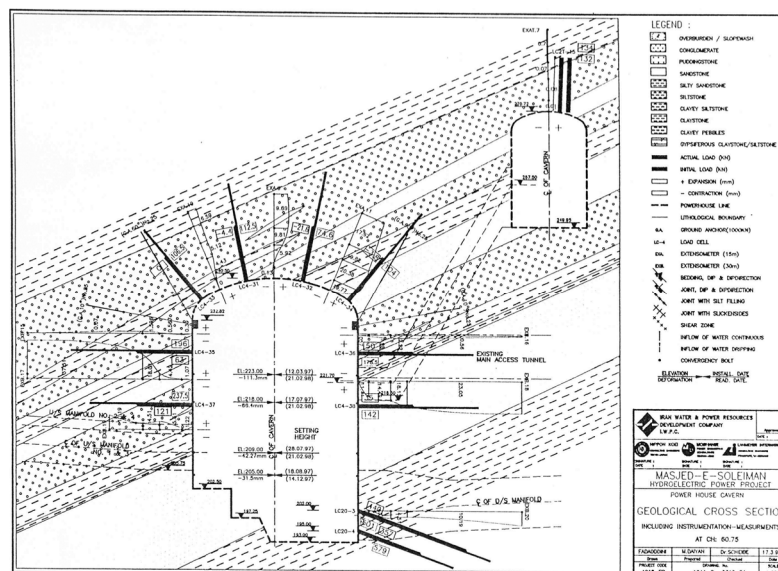
سنگ درزه‌دار در حالت نگهداری شده و یا بدون نگهداری و تعیین مقدار جابجایی‌های ایجاد شده در محل استفاده می‌شود. در این مقاله از روش‌های عددی المان محدود (Phase2)، تفاضل محدود (FLAC)، المان مجزا (UDEG) استفاده شده است و نتایج مدل‌سازی در مراحل مختلف حفاری با هم مقایسه می‌شوند.

۲- زمین‌شناسی منطقه

محل پروژه در ۴۰ کیلومتری شمال شرقی مسجد سلیمان بر روی رودخانه کارون است. ساختگاه سد و نیروگاه مذکور در بخش فوقانی سازند آغاجری و عمدتاً سازند بختیاری در پهنه زاگرس چین خورده واقع شده است. علیرغم ساختار تکنیکی ساده، لایه بندی‌های رسوبی بسیار متنوع و متعددی وجود دارد که ناشی از ویژگی حوضه رسوبی مناطق بسیار کم عمق (سیلابی-کولابی) است که منجر به تشکیل سری رسوبی از سنگ‌های آواری درشت دانه (کنگلومرا - ماسه سنگ) و ریز دانه (لای سنگ و رس) شده است. مغارهای زیر زمینی سد مسجد سلیمان در تکیه گاه راست سد واقع شده‌اند، امتداد آنها به موازات امتداد لایه بندی انتخاب شده است. ارتفاع سنگ‌های روباره از سقف مغار اصلی ۲۷۰ متر است [۱].

در اکثر سازه‌های زیرزمینی نیروگاه‌های برق آبی، مغار نیروگاه یکی از بزرگ‌ترین و حساس‌ترین سازه‌های حفر شده در مجموعه نیروگاه است. با توجه به اهمیت وسایل و تجهیزاتی که در مغارها جای می‌گیرد، موضوع پایداری و نگهداری این نوع سازه‌ها دارای اهمیت بسزایی است. امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتر و ظهور و گسترش روش‌های مبتنی بر محاسبات حجیم این امید به وجود آمده است که بتوان تا حدود زیادی بر پیچیدگی‌های رفتار محیط‌های سنگی غلبه کرد. در این میان تعیین داده‌های ورودی برای مدل‌های عددی از اهمیت زیادی برخوردار است. سیستم‌های تجربی طبقه بندی سنگ‌ها یک ابزار کارآمدی برای طراحی حفاری در سنگ و تعیین مقدار سیستم نگهداری مورد نیاز است. همچنین با استفاده از این روش‌ها خواص مکانیکی توده سنگ بدست آمده و به عنوان داده‌های ورودی در مدل‌سازی رفتار توده سنگ اطراف یک حفاری استفاده می‌شوند.

با دقیق شدن اطلاعات ورودی مدل می‌توان رفتار توده سنگ را با دقت مناسب شبیه سازی کرده و به نتایج قابل قبول‌تری دست یافت. از مدل‌های عددی برای محاسبه زون اغتشاش اطراف حفاریات، مشخص کردن رفتار یک توده



شکل ۱: وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی و سیستم رفتار نگاری نصب شده در مقطع ۶۰/۷۵ متری

۳- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ های منطقه

جهت تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ ها، تست های برجا و آزمایشگاهی شامل تست های اتساع سنجی، چک مسطح، تست های تک محوره و سه محوره آزمایشگاهی، تست های کششی، تست بار نقطه ای و غیره انجام شده است. با بررسی نتایج تمامی اکتشافات ژئوتکنیکی انجام شده در گذشته و لحاظ کردن آخرین اطلاعات بدست آمده از تونل اصلی دسترسی به مغار نیروگاه و مغارهای حفاری شده پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و توده سنگ های منطقه به صورت جداول (۱)، (۲) و (۳) حاصل شده است [۱-۲].

۳-۱- پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ

نتایج حاصل از تست های آزمایشگاهی انجام شده به صورت خلاصه در جدول (۱) بیان شده است.

۳-۲- پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ

مدول دگر شکل پذیری از آزمون اتساع سنجی و آزمون چک تخت و نسب پواسون از نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری انجام شده در کشور آلمان و آزمون سه محوری با قطر بزرگ (حدود ۶۰ سانتی متر) و انجام آنالیز برگشتی استنتاج شده است، که نتایج آن در جداول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۱: نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های آزمایشگاهی

نوع سنگ	کنگلوмера	ماسه سنگ	سیلت دیواره	سیلت سقف
مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۸۳/۵	۵۳/۵	۳۹	۲۵
مدول یانگ (GPa)	۲۸	۱۴	۹	۷
نسبت پواسون	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲۲
مقاومت کششی (MPa)	۴	۵	۲/۵	۲
چسبندگی (MPa)	۵/۱۰	۳	۳	۳
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۵۲	۴۰	۴۰	۴۰

جدول ۲: پارامترهای مقاومتی توده سنگ

نوع سنگ	مدول دگر شکل پذیری (GPa)	نسبت پواسون	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)
کنگلوмера	۱۵	۰/۲	۸/۳۳	۶/۲۵
ماسه سنگ	۷	۰/۲	۳/۸۸	۲/۹
سیلت سقف	۶	۰/۲۵	۴	۲/۴
سیلت دیواره	۶	۰/۲۵	۴	۲/۴

جدول ۳: زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی توده سنگ

نوع سنگ	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)	زاویه اتساع (درجه)
کنگلوмера	۴۳	۲/۸۷	۲۰
ماسه سنگ	۳۸	۱/۶۷	۱۷
سیلت سقف	۲۵	۰/۵	۱۰
سیلت دیواره	۳۰	۰/۷۳	۱۳

۴- خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی ها

شکستگی های منطقه حاصل چین خوردگی ناحیه ای می باشد که بسته به تنوع لیتولوژی آثار کمی و کیفی متفاوتی از خود بجای گذاشته است. به طور کلی تمامی لایه

بندی ها دارای میانگین شیب و امتداد شیب ۶۷/۲۸ درجه هستند که میان لایه هایی در بین این لایه ها مشاهده می شوند. کنگلوмера و ماسه سنگ دارای کمترین مقدار درزه داری هستند. در صورتی که سیلتستون و رس سنگ ها

دارای دامنه وسیعی از درزه داری هستند و خرد شدگی متوسط تا بالایی دارند و این موضوع به دلیل مقاومت پایین این نوع سنگ‌ها است. خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در جداول ۴ و ۵ آمده است [۲، ۱].

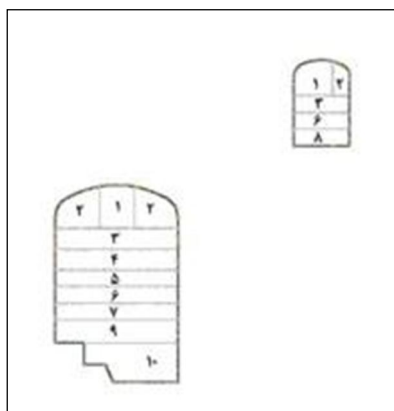
جدول ۴: خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در اطراف مجموعه نیروگاهی

ناپیوستگی	شیب/جهت شیب (درجه)	میانگین فاصله داری (متر)
سطوح لایه بندی	۰۶۷/۲۸	--
دسته درزه ۱	۲۳۷/۵۰	۴
دسته درزه ۲	۳۲۶/۸۲	۲
دسته درزه ۳	۱۲۶/۸۴	۲
دسته درزه ۴	۲۰۶/۶۱	۲

جدول ۵: مقادیر JRC° ، JCS° و باز شدگی درزه‌ها در سنگ‌های مختلف

نوع سنگ	JRC°	JCS° (MPa)	باز شدگی درزه‌ها (mm)	طول اثر (mm)
کنگولمر	۱۲	۵۷	۱	۲۰۰۰
ماسه سنگ	۱۰	۶۷	۱	۴۰۰۰
سیلت دیواره	۸	۴۰	۲	۵۰۰۰
سیلت سقف	۶	۲۵	۲	۵۰۰۰

- دو ردیف در دیواره پایین دست ترازهای ۲۲۸ و ۲۲۶ و در پایین دست از تراز کف مغار به تعداد ۷ ردیف



شکل ۲: مراحل حفاری مغارهای اصلی و ترانسفورمر

۶- مدل‌سازی عددی توده سنگ اطراف مغار نیروگاه

همان‌طور که گفته شد از سه روش عددی برای پیش‌بینی رفتار توده سنگ اطراف مغار استفاده شده است. داده‌های ورودی مورد استفاده در مدل‌سازی که شامل خصوصیات درزه داری و ژئومکانیکی سنگ‌های منطقه است در قسمت قبل بیان شده است. مدل‌سازی نهایی با اعمال

۵- روش حفاری و سیستم نگهداری مورد استفاده

مغار نیروگاه با استفاده از روش چالزنی و آتشیاری در ۱۰ مرحله حفاری شده است. مراحل حفاری مطابق شکل (۲) مدل‌سازی شده است. 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 می‌شود.

سیستم نگهداری اولیه مجموعه نیروگاهی که با استفاده از روش‌های تجربی (طبقه بندی Q و RMR) بدست آمده است، شامل بولت‌های کششی و تزریقی ۶ و ۱۰ متری به همراه دو لایه‌ی شاتکریت ۲۰ سانتیمتری هستند. علاوه بر این سیستم نگهداری با توجه به مشکلات ایجاد شده در هنگام اجرای پروژه از تاندون‌های ۲۰ متری با ظرفیت ۶۰ تنی در ترازهای مختلف به صورت زیر نیز استفاده شده است:

- پنج ردیف در سقف مغار اصلی قسمت پایین دست با آرایش ۲ در ۲ متر

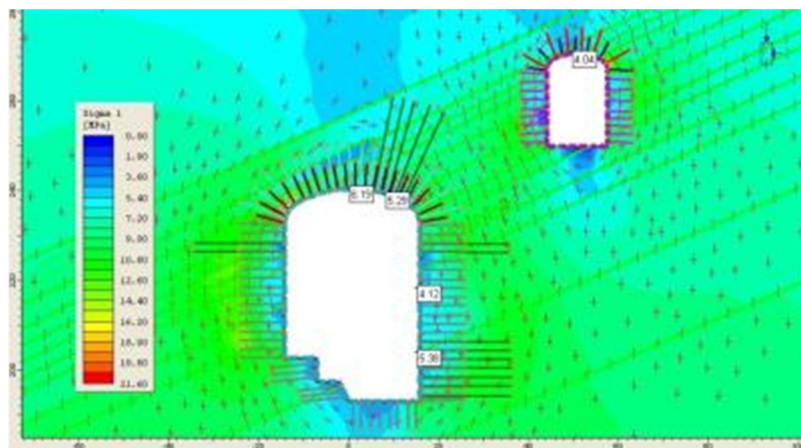
- دو ردیف در دیواره بالادست در ترازهای ۲۲۸ و ۲۲۶ با

آرایش ۲ در ۲ متر

در اطراف مغار استفاده شده است، لذا برای مقایسه نتایج حاصل از روش های عددی با آنها، این نقاط نیز در مدل های عددی به عنوان نقاط مورد بررسی در نظر گرفته شده اند.

۶-۱- مدل سازی عددی بر اساس روش المان محدود

نرم افزار المان محدود Phase2 که در پروژه های مختلف سازه های زیرزمینی با موفقیت امتحان شده است، برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. بلافاصله بعد از هر مرحله حفاری سیستم نگهداری نصب می شود. وضعیت تنش های اصلی در اطراف تونل پس از حفاری مرحله نهایی در شکل زیر آورده شده است [۴].



شکل ۳- وضعیت تنش های اصلی در آخرین مرحله حفاری (مدل پیوسته - المان محدود)

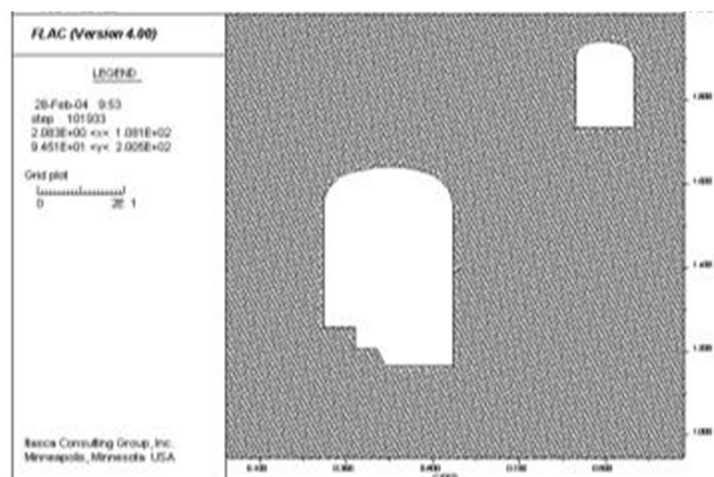
اصلی تأثیر زیادی در پایداری دارند، بنابراین سعی شد از یک نوع مش بندی استفاده شود که بتوان لایه های مختلف سنگ را مدل کرد. شکل ۴ موقعیت مغارها و مش بندی به کار رفته را نشان می دهد. بعد از تعادل اولیه، حفاری و نصب سیستم نگهداری در ده مرحله انجام شد و دوباره برای رسیدن به تعادل نهایی اجرا شد. شکل ۵ نشان دهنده وضعیت تنش های اصلی بعد از تعادل نهایی است [۵].

سیستم نگهداری اولیه و تاندون هایی پیشنهادی انجام شده است. تنش های برجای منطقه نیز از نوع ثقلی در نظر گرفته شده است. جهت تعیین وضعیت تنش های برجای در محل مغارها، از نتایج آزمون جک تخت استفاده شده و نتایج آزمون بیش مغزه گیری انجام شده، به دلیل نتایج مشکوک مورد استناد قرار نگرفته اند. بر اساس نتایج این دو آزمون تنش عمودی برابر فشار پوشان سنگ در محل، و تنش افقی نصف مقدار تنش قائم است.

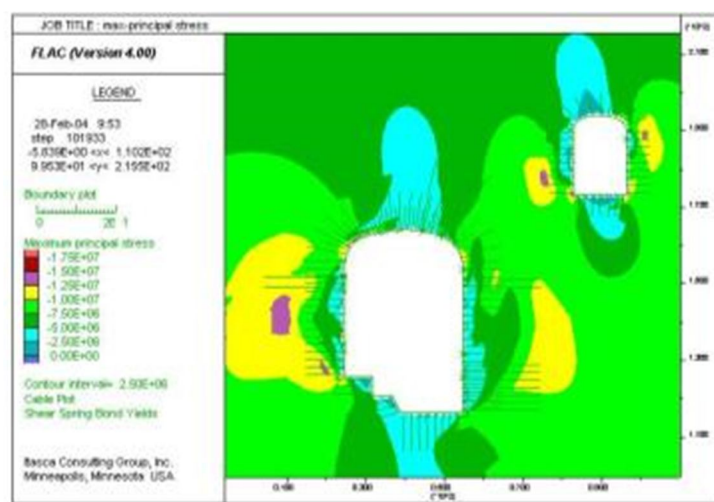
با توجه به اینکه در مقطع ۶۰/۷۵ مغار از یکسری اکستنسومترهای میله ای برای اندازه گیری مقدار جابجایی

۶-۲- مدل سازی عددی بر اساس روش تفاضل محدود

برای مدل سازی با روش تفاضل محدود از نرم افزار FLAC استفاده شده است. برای اینکه شرایط واقعی زمین در مدل سازی اعمال شود، بایستی ابعاد مدل انتخابی به نحوی باشد که شرایط مرزی اعمال شده در رفتار کلی مدل کم ترین تأثیر را داشته باشد. با توجه به اینکه سنگ های منطقه از لحاظ پارامترهای مقاومتی دارای تفاوت زیادی هستند و لایه های سیلتستون موجود در سقف و دیواره مغار



شکل ۴: موقعیت مغارها و مش‌بندی به کار رفته در مدل FLAC



شکل ۵: وضعیت تنش‌های اصلی در آخرین مرحله حفاری (مدل پیوسته – تفاضل محدود)

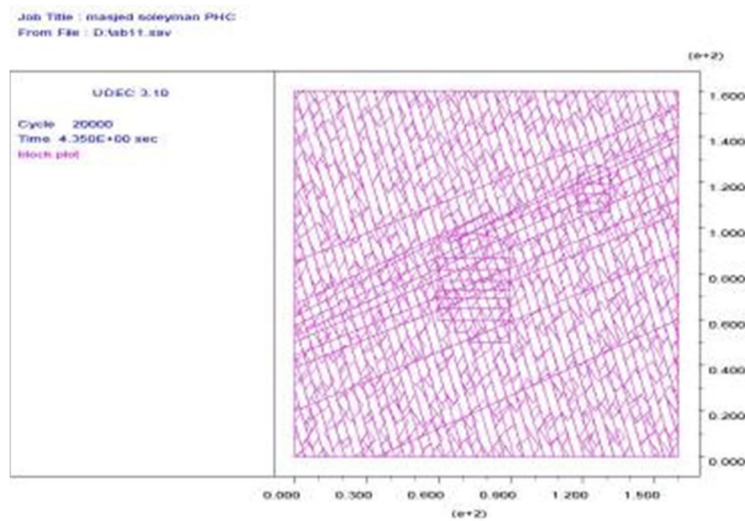
۳-۶- مدل‌سازی عددی بر اساس روش المان مجزا

یکی از معروف‌ترین نرم افزارهای المان مجزا برای تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی UDEC است که توانایی بالایی در مدل کردن درزه‌ها و محاسبه میزان جابجایی و رفتار توده سنگ اطراف فضاهای زیر زمینی دارد. مدل اولیه و وضعیت قرارگیری سیستم درزه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. توده‌سنگ اطراف مغار با استفاده از بلوک‌های تغییر شکل پذیر مدل شده است. مراحل مدل‌سازی به صورت زیر است: ابتدا برای رسیدن به تعادل اولیه، مدل ساخته شده بدون ایجاد حفاری تحت تنش‌های برجا قرار گرفته و برنامه اجرا گردید. سپس برای شبیه سازی شرایط

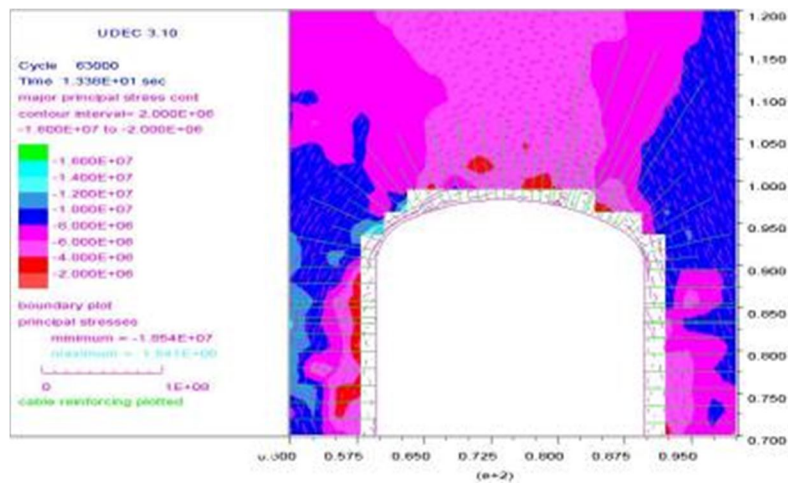
واقعی حفاری هر مرحله و نصب سیستم نگهداری آن، ابتدا برای هر کدام از مراحل حفاری، سیستم نگهداری اجرا شد و برنامه برای تعادل نهایی آن مرحله، اجرا گردید. وضعیت تنش‌های اصلی در شکل ۷ نشان داده شده است [۶].

۷- بحث در مورد نتایج به دست آمده از مدل‌های عددی

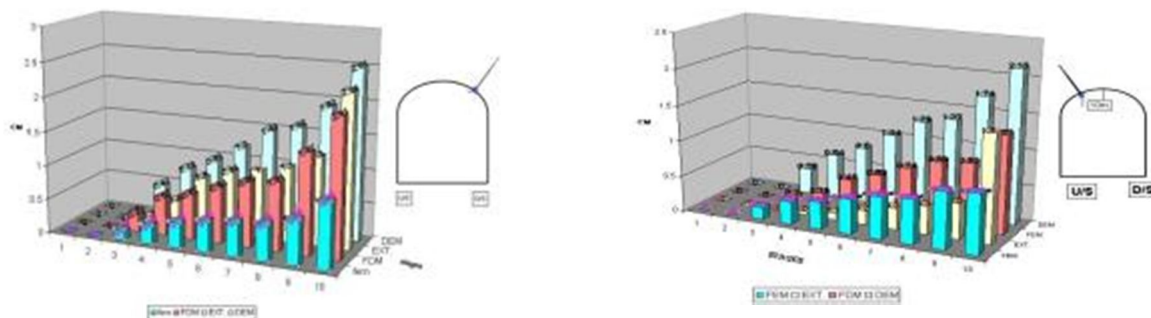
برای مقایسه نتایج حاصل از روش‌های عددی مختلف با داده‌های حاصل از سیستم رفتار نگاری مقدار جابجایی و نیروی وارد بر میل مهارها در نقاط کنترلی بدست آمده‌اند. مقادیر جابجایی بدست آمده از روش‌های مختلف مطابق شکل‌ها و نمودارهای (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) است.



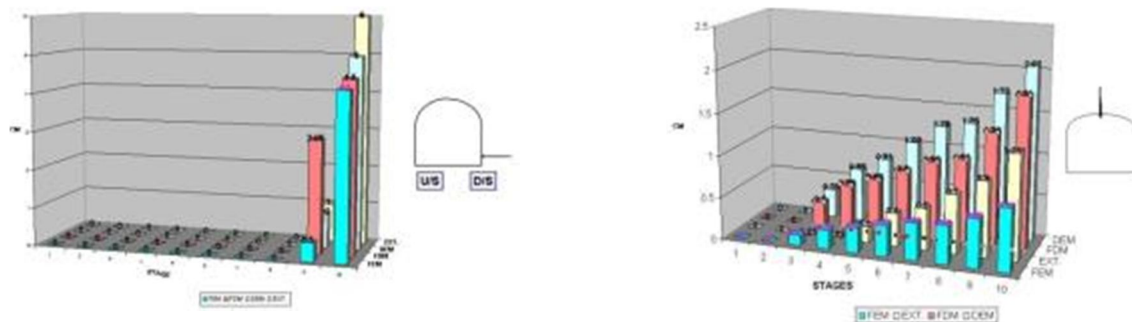
شکل ۶: سیستم درزه داری و وضعیت قرارگیری لایه ها در اطراف محل حفاری (مدل ناپیوسته – المان مجزا)



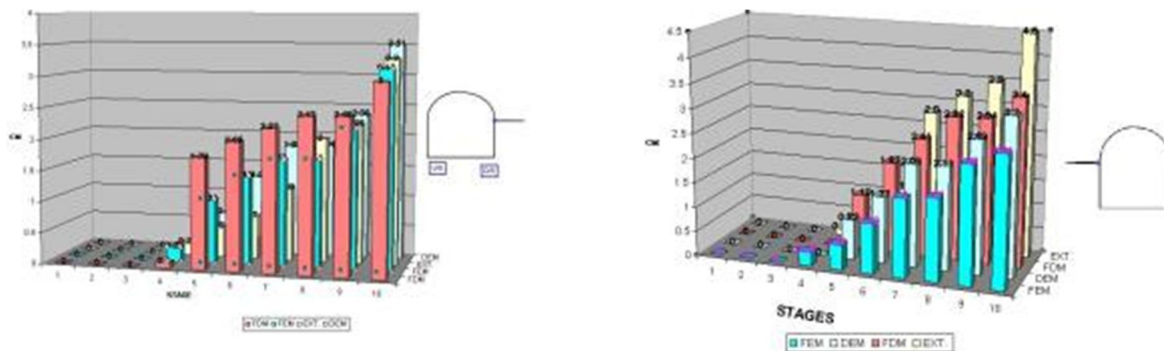
شکل ۷: وضعیت تنش های اصلی (مدل ناپیوسته – المان مجزا)



شکل ۸: مقدار جابجایی در انتهای حفاری هر مرحله (سقف مغار اصلی – دیواره پایین دست و بالا دست)



شکل ۹: مقدار جابجایی در انتهای حفاری هر مرحله (مرکز سقف مغار اصلی و دیواره پایین دست ارتفاع ۲۰۲ متری)



شکل ۱۰: مقدار جابجایی در انتهای حفاری هر مرحله (دیواره پایین دست و بالا دست ارتفاع ۲۲۲ متری)

بلوک‌های واقع در مرز حفاری به صورت غیر واقعی و زیاد است.

برای مقایسه مقدار نیروی وارده بر بولت‌ها در روش‌های مختلف با نتایج حاصل از ابزار دقیق تعدادی بار سنج در سقف مغار اصلی در نظر گرفته شده است. در جدول ۷ مقدار افزایش بار (بعد از کم کردن مقدار کشش اولیه) در میل مهارها برای روش‌های مختلف آمده است. با در نظر گرفتن چگونگی توزیع تنش در سقف مغار (اشکال ۳، ۵ و ۷) بیشترین تمرکز تنش در قسمت سقف - بالادست ایجاد شده است و در این قسمت نیز بیشترین نیروی وارد بر میل مهارها (سقف مغار اصلی ارتفاع ۲۳۶ متری، بالادست) را داریم. با توجه به جدول ۸ که اختلاف مقدار افزایش بار در بولت‌ها را از مقدار اندازه‌گیری شده توسط بار سنج‌ها نشان می‌دهد، این افزایش بار در روش المان مجزا بیشتر از روش‌های دیگر محاسبه شده است که به دلیل حرکت بلوک‌های رها شده است.

خلاصه نتایج حاصل از نمودارهای بالا که شامل اختلاف مقدار جابجایی حداکثر در نقاط کنترلی از مقدار اندازه‌گیری در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در روش المان مجزا مقدار جابجایی‌های رخ داده در سقف بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است که به علت حرکت بلوک‌های مدل شده است. با در نظر گرفتن این موضوع که کشیدگی سنج‌ها با تأخیر زمانی چند روزه نصب شده‌اند، مقدار جابجایی‌های به دست آمده از روش المان مجزا به واقعیت نزدیک‌تر است. ولی با توجه به اینکه مقدار جابجایی‌های بدست آمده از روش‌های مختلف اختلاف کمی با هم دارند و بلوک‌های سنگی تشکیل شده رفتار کلی محیط را کنترل نمی‌کنند، می‌توان گفت رفتار توده سنگ به صورت شبه پیوسته است. دلیل زیاد بودن مقدار جابجایی حاصل از روش المان مجزا نسبت به روش المان محدود به این دلیل است که نقاط ثبت جابجایی‌ها به مرز حفاری بسیار نزدیک در نظر گرفته شده‌اند که در این وضعیت به دلیل حرکت

جدول ۶: اختلاف مقدار جابجایی حداکثر در نقاط کنترلی نسبت به مقدار اندازه گیری شده (cm)

مدل	سقف			دیواره		
	مرکز	پایین دست	بالا دست	پایین درست ارتفاع ۲۲۲	پایین دست ارتفاع ۲۰۲	بالا دست ارتفاع ۲۲۲
FEM	-۰/۵۱	-۱/۳	-۰/۶۷	-۰/۱۳	-۱/۷	-۱/۸۹
FDM	+۰/۵۶	-۰/۲۵	-۰/۱۳	-۰/۳	-۱/۵	-۱/۱
DEM	+۰/۸۲	+۰/۳۵	+۰/۶۵	+۰/۲۱	-۱	-۱/۳

جدول ۷: مقدار افزایش بار در میل مهارهای موجود در سقف مغار اصلی برای روش های مختلف (KN)

نوع روش / موقعیت میل مهار	ارتفاع ۲۴۰ متری		ارتفاع ۲۳۶ متری	
	بالا دست	پایین دست	بالا دست	پایین دست
FEM	۹۰	۸۰	۱۵۱	۱۲۸
FDM	۱۱۴	۹۸	۱۴۶	۱۲۷
DEM	۱۴۷	۱۳۴	۱۵۵	۱۶۲
L.C.	۱۳۰	-	۱۳۷	۱۴۳

جدول ۸: اختلاف مقدار افزایش بار میل مهارهای موجود در سقف مغار اصلی نسبت به مقدار اندازه گیری شده

نوع روش / موقعیت میل مهار	ارتفاع ۲۴۰ متری، بالا دست		ارتفاع ۲۳۶ متری	
	بالا دست	پایین دست	بالا دست	پایین دست
FEM	-۴۰	+۱۴	-۱۵	
FDM	-۱۶	+۹	-۱۶	
DEM	+۱۷	+۱۸	+۱۹	

۸- 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 حفریات 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 مغار نیروگاه مسجد سلیمان 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

عبارت دیگر سیستم درزه موجود کنترل کننده رفتار کل توده سنگ نیست. این موضوع به دلیل فاصله داری کم درزه ها (۲ تا ۴ متری) در مقایسه با ابعاد بزرگ دهانه حفاری (۳۰ متر) است (نسبت عرض بلوک های بحرانی تشکیل شده به دهانه حفاری برابر ۰/۱۳۳ است).

با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی های عددی، مهم ترین عامل در ناپایداری مغار نیروگاه وجود لایه سیلتستون و حرکت بلوک های سنگی موجود در این محدوده است. لایه سیلتستون در سقف مغار اصلی باعث به وجود آمدن درزه هایی با پارامترهای مقاومتی پایین است 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. لازم به ذکر است که تنها مدل سازی با نرم افزار UDEC این ناپایداری را نشان

داده است و مدل‌های دیگر در این نواحی فقط مقدار جابجایی بالا را نشان می‌دهد.

۹- مراجع

- [۱] گزارش طراحی سیستم نگهداری مغار نیروگاه توسعه معاونت سد و نیروگاه‌های آبی - اسفند ماه ۱۳۷۹.
- [2] Moshanir & Lahmeyer Int. and Nippon Koei "Godar H.E.P.P , Rock , Support for Powerhouses and Transformer Caverns" , P.55,1994.
- [3] Iran Water & Power Resources Development Company. " Geology and Site Investigation Report, Godar --Landar Hydroelectric Power Project" , 1994.
- [4] Rocscience Inc, "Phases Model program Reference Manual", Version 5, 1998.
- [5] Itasca consulting Group. Inc., "FLAC , Fast Lagrangian Analysis of Continuo " , version 4, Users Manual.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc., "UDEC , Universal Distinct Element Code", Version 3/1, Users Manual.
- [7] M. Genis, H. Basarir, A. Ozarslan, E. Bilir, E. Balaban; 2007; "Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey"; Engineering Geology, Volume 92, Issues 1-2, Pages 14-26.
- [8] Xiao-ming SUN, Feng CAI, Jun YANG, Wu-fu CAO; 2009; "Numerical simulation of the effect of coupling support of bolt-mesh-anchor in deep tunnel"; Mining Science and Technology , Volume 19, Issue 3, Pages 352-357.
- [9] Y.H Hatzor, M Talesnick, M Tsesarsky; 2002; " Continuous and discontinuous stability analysis of the bell-shaped caverns "; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 39, Issue 7, Pages 867-886.