

بیست و سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران

۲۰ و ۲۱ آبانماه ۱۳۹۹

The 23rd Symposium of Geological Society of Iran

10-11November, 2020



ارزیابی پایداری مغار نیروگاه و ترانسفورمر زیرزمینی سد مسجد سلیمان از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی

آرام میرزایی* دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس
غلامرضا شعاعی استادیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

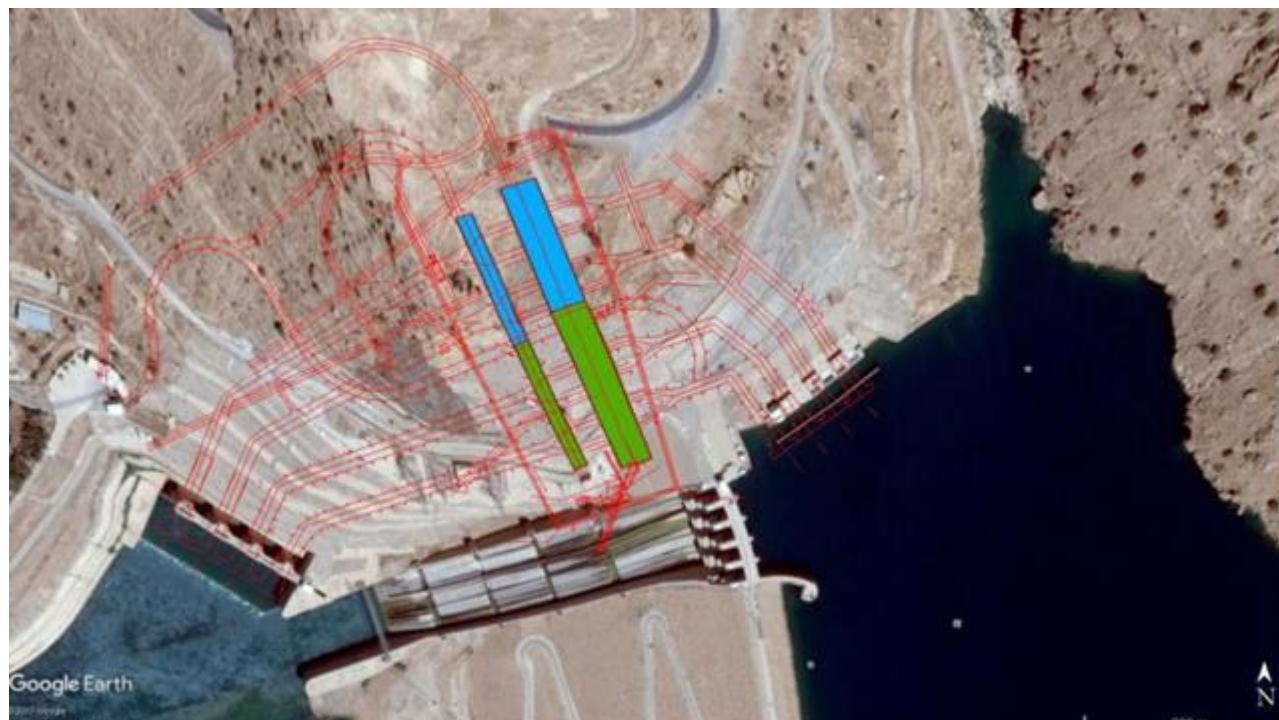
چکیده

امروزه اهمیت نگهداری و بهره برداری از سدها به صورت دقیق و برنامه ریزی شده امری ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد. اگر چه طراحی و ساخت سازه‌های عظیمی همچون سدها کاری بسیار زمان بر و دشوار است، اما مهم‌تر از آن کنترل و پایش منظم رفتار بدنه سد و سازه‌های مجاور آن می‌باشد، مشاهده شدن آثار ناپایداری چون درزه‌های باز شده، چرخش و لغزش بلوک‌ها در بخش‌هایی از جناح راست سد، نشان از ناپایداری در این بخش از سد را می‌رساند، در این مطالعه، ارائه راهکار برای پایدارسازی جناح راست ساختمان سد مسجد سلیمان تحت وجود جریان آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های عددی مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که شرایط هیدروژئولوژی ساختمان باعث تشکیل سرفه‌های آب معلق نموده، در نتیجه به مرور زمان با افزایش فشار منفذی و در نهایت کاهش مقاومت برشی لایه‌ها است، این امر خصوصاً در مجاورت لایه‌های دارای رس، باعث تورم و افزایش فشار و نهایتاً موجب ناپایداری آن می‌شود، بنابراین نبود زهکشی یا طرح هندسی مناسب یا عملکرد نامناسب زهکشی‌های نصب شده متناسب با وضعیت هیدروژئولوژی سازند پیرامونی آن و مسدود شدن سریع و زود هنگام آن‌ها به علت عدم بکارگیری المان‌های مورد نیاز نظیر ژئوتکتایل و ... ، عامل اصلی ناپایداری تلقی می‌گردد و در ادامه راهکارهایی برای پایدارسازی آن پیشنهاد شد.

مقدمه

مجموعه نیروگاه زیرزمینی مسجد سلیمان که دارای دو مغار بزرگ زیرزمینی به نام مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر می‌باشد که موقعیت جغرافیایی آن در جنوب غربی ایران واقع در استان خوزستان و در ۲۵/۵ کیلومتری شمال شرق شهر مسجد سلیمان قرار دارد. احداث مجموعه نیروگاه زیرزمینی مسجد سلیمان در طی دو فاز حفاری و اجرا گردیده است نیروگاه مسجد سلیمان از زمان اجرا تا کنون مشکلاتی را از نظر پایداری تجربه کرده است، امروزه این مشکلات بیشتر در قسمت پایین‌دست سقف مغار نیروگاه در فاز ۲ متمرکز می‌باشد، اخیراً تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای نیز در برخی قسمت‌های دیوار مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمرها دیده شده است، مشکلات مربوط به پایداری اغلب بصورت ایچال و گسترش ترک‌ها، افزایش تنش در برخی از انگرها و مونوپارها و همچنین جداشدگی بلوک‌های سنگی نمایان می‌شوند، شکل ۱ موقعیت سازه نیروگاه مسجد سلیمان را به صورت شماتیک نشان می‌دهند.



شکل ۱. شکل نمای نیروگاه مسجد سلیمان برگرفته از سایت گوگل ارث، قسمت سبزی: فاز ۱ مغار نیروگاه (راست) و مغار ترانسفورمر (چپ) قسمت آبی: فاز ۲ مغار نیروگاه (راست) و مغار ترانسفورمر (چپ).

بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی طرح و توسعه سد و نیروگاه مسجد سلیمان، بخش مغار زیرزمینی مورد مطالعه در سازند بختیاری حفاری شده است، سازند بختیاری مربوط به دوره پلیستوسن تا کواترنری است، این سازند از تنوالی نامنظم لایه‌های رس‌سنگ، لای سنگ، ماسه‌سنگ و کنگلومرا بوجود آمده است، سازند بختیاری به ۱۴ واحد به ترتیب از قدیم به جدید (از واحد ۱ تا واحد XIV) سنگ شناسی کوچک‌تر با نسبت‌های متفاوتی از کنگلومرا، ماسه‌سنگ، لای‌سنگ و گل‌سنگ (رس‌سنگ) تقسیم‌بندی گردیده است، واحدهای پایین‌تر دارای مقادیر زیادتری از لایه‌های گلسنگی و واحدهای بالاتر دارای کنگلومرای بیشتری هستند، لازم به ذکر است که هر دو مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر سد مسجد سلیمان در زیر برم‌های جناح راست سد عمدتاً در واحدهای ۷ و IV (واحدهای ۴ و ۵) سازند بختیاری حفاری شده‌اند. که در جناح راست سد مسجد سلیمان ۱۰ واحد ابتدایی این سازند را تشکیل داده است، مشخصات کلی هر یک از این ۱۰ تا واحدها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱. واحدهای تشکیل دهنده سازند بختیاری به همراه سنگ‌شناسی و ضخامت لایه‌ها

واحد	سنگ‌شناسی	ضخامت
واحد I	ماسه‌سنگ‌های ریز دانه تا متوسط دانه، در بخش تختانی کنگلومرای متراکم با زمینه ماسه‌ای	۸ متر
واحد II	گل‌سنگ حجیم، اندکی لای‌دار، تناوب لای سنگ و ماسه‌سنگ ریز دانه تا متوسط دانه و ماسه‌سنگ حجیم رس‌دار	۴۲ متر
واحد III	کنگلومرای حجیم با مقداری رس و میان لایه‌های نازک ماسه‌سنگ یا دانه‌های ریز تا درشت	۳۵ متر
واحد IV	بخش بالایی شامل گل‌سنگ لای‌دار، لای‌سنگ رس‌دار یا دانه‌بندی بسیار ریز تا متوسط، بخش میانی شامل ماسه‌سنگ ورقه‌ای و بخش پایانی ماسه سنگ دانه ریز با میان لایه‌ای از گل‌سنگ، لای‌سنگ	۵۵ متر
واحد V	کنگلومرای حجیم با اندکی ماسه‌سنگ ریزدانه تا درشت دانه و میان لایه‌ای از لای‌سنگ دارای زمینه ماسه‌ای نسبتاً مختلط با ارس بسیار نرم	۵۰ متر
واحد VI	گل‌سنگ/ گل‌سنگ لای‌دار، لای‌سنگ رس‌دار و بخش میانی شامل ماسه‌سنگ بسیار دانه‌ریز (لای‌سنگ ماسه‌دار)	۳۶ متر
واحد VII	کنگلومرای حجیم با زمینه ماسه آهنکی یا قلوه‌های رسی بسیار نرم و تا حدودی نیز از ماسه‌سنگ ریزدانه تا متوسط دانه یا میان لایه‌ای از لای‌سنگ و گل‌سنگ	۲۹ متر
واحد VIII	کنگلومرای حجیم و تا حدودی از ماسه‌سنگ ریز دانه تا متوسط دانه یا میان لایه نازکی از لای‌سنگ به اضافه قلوه‌های رسی در بخش بالایی لای‌سنگ تا حدودی ماسه‌دار و آینه گسل‌دار (۷-۱۱ متر)	۴۲ متر
واحد IX	کنگلومرای حجیم با زمینه ماسه‌ای، حاوی برخی دانه‌ها / قلوه‌های رسی با سیمان آهنکی و برخی عدسی‌های دانه‌ریز تا دانه متوسط ماسه‌سنگی در بخش بالایی لای‌سنگ، تا حدودی ماسه‌دار یا رس‌دار (۸-۷ متر)	۵۰ متر
واحد X	کنگلومرای حجیم با زمینه ماسه‌ای و رسی، حاوی دانه‌های رس‌دار، وجود عدسی‌های سنگ بودنگ و/ یا ماسه‌سنگ، بخش بالایی لای‌سنگ با میان لایه ماسه‌سنگی و لای‌سنگ رس‌دار (۱۰ متر)	۶۴ متر

مواد و روش کار

امروزه روش‌های متنوعی برای تحلیل پایداری وجود دارد، با توجه به پیچیدگی‌های هندسی مغار، استفاده از مدل‌سازی عددی مناسب‌تر است، پایداری مغار با مدل‌سازی عددی توده‌سنگ، تحت اثر رفتار هیدرومکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری مغار مورد مطالعه نیازمند شناخت و اطلاعات کامل در مورد ناپیوستگی‌ها و خصوصیات سنگ‌هاست به همین منظور مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در ساختمان صورت گرفت.

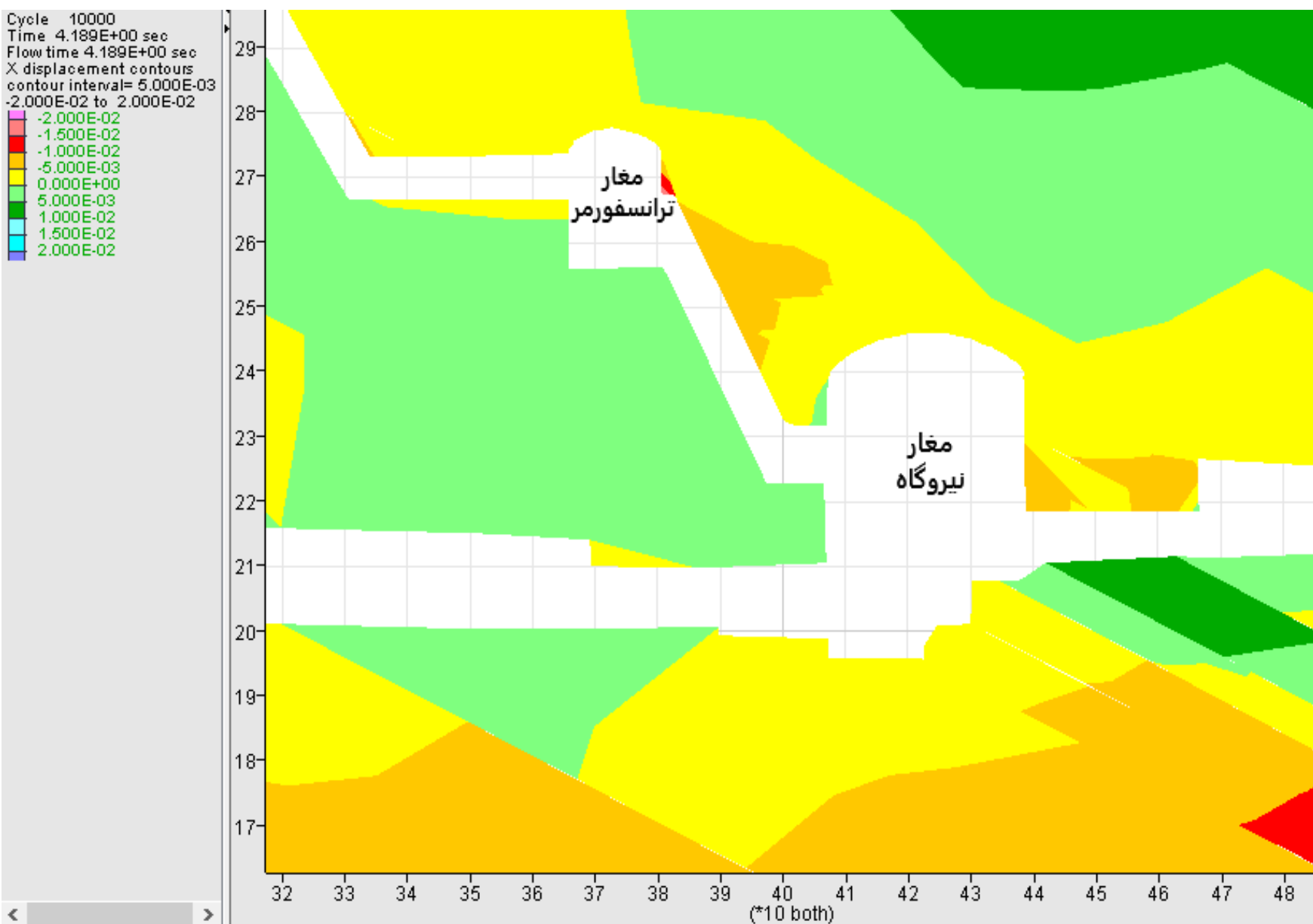
جدول ۲. برداشت ناپیوستگی‌ها در ساختمانگاه

ناپیوستگی	شیب	امتداد	طول اثر (متر)	میانگین فاصله‌داری(متر)	بازشدگی (میلی متر)
لایه‌بندی	۳۰	۰۵۴	۲۰ <	۲ <	۵ <
J1	۵۶	۲۲۹	۳-۲۰	۲	۱-۵
J2	۸۲	۳۱۶	۳-۱۰	۲	۱-۵

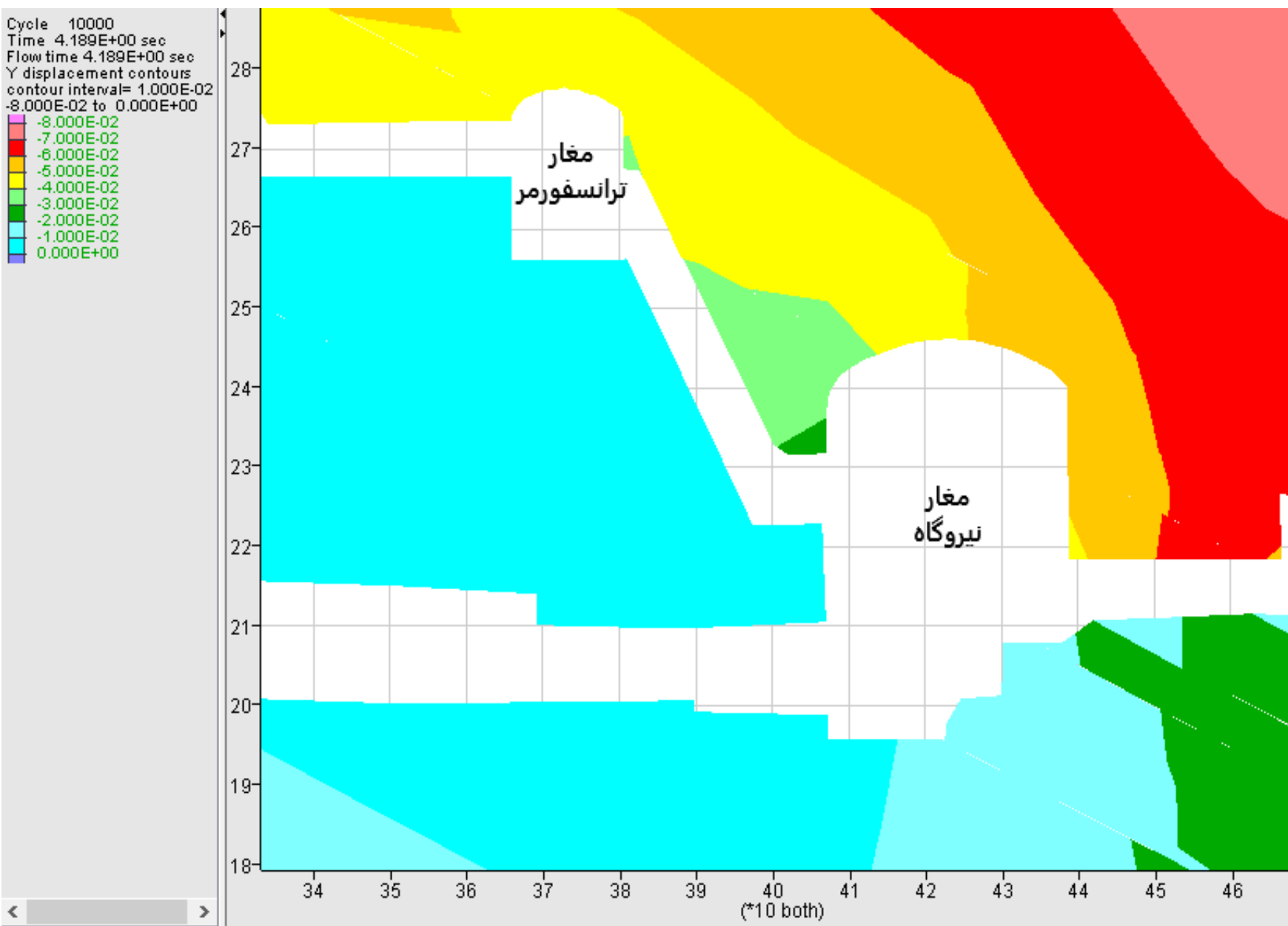
جدول ۳. پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های ساختمانگاه[۳]

نوع سنگ	دانسیته (گرم بر متر مکعب)	مدول تغییر شکل‌پذیری (گیگاپاسکال)	نسبت پوانسون	زاویه اصطکاک	چسبندگی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	زاویه اتساع
کنگلومرا	۲۵۳۰	۱۵	۰/۲۰	۴۳	۲/۸۷	۲	۲۰
ماسه‌سنگ	۲۴۱۰	۷	۰/۲۰	۳۸	۱/۶۷	۲	۱۷
لای‌سنگ	۲۳۰۰	۶	۰/۲۵	۳۰	۰/۷	۱	۱۳
رس‌سنگ	۲۳۰۰	۶	۰/۲۵	۲۴	۰/۵	۱/۵	۱۳

از جمله نرم‌افزارهای موجود در مدل‌سازی محیط ناپیوسته نرم‌افزار UDEC می‌باشد و از کاربردهای این نرم‌افزار، تحلیل پایداری، محاسبه میزان جابه‌جایی‌ها و سایر پارامترهای کلیدی مطرح در طراحی و اجرای محیط‌های ناپیوسته است، پس از دست‌نویسی مغار در محیط برنامه UDEC تحلیل‌های مربوط به پایداری آن انجام شد و میزان جابه‌جایی‌های در راستای محور X (شکل ۲) و راستای محور Y (شکل ۳)، در محیط نرم‌افزار بدست آمد.



شکل ۲. جابه‌جایی در راستای محور X (بر حسب متر)



شکل ۳. جابه‌جایی در راستای محور Y (بر حسب متر)

بحث

پس از حفاری تونل‌ها، مغارها و آبنگبری مخزن، وضعیت آب زیرزمینی به کلی تغییر یافته و امروزه الگوی پیچیده‌تری از توزیع هد آب وجود دارد، با توجه به نشت بسیار کم آب در درون مغارها چنین به نظر می‌رسد که این فضا‌های زیرزمینی عمدتاً در منطقه غیراشباع قرار دارند، چنین انتظار می‌رود که سطح ایستابی در طول سال به علت تغییرات آب و هوایی فصلی، به میزان قابل توجهی تغییر کنند. در طی فصل خشک، سرفه آب زیرزمینی تقریباً بطور کامل به تراز کف مغار نیروگاه پایین می‌رود و توده‌سنگ‌های بالای مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر غیراشباع باشند، در طی فصل تر، نفوذ آب از سطح زمین می‌تواند گستره ناحیه غیراشباع در بالای مغارهای نیروگاه و مغار ترانسفورمر را به میزان قابل توجهی کاهش داده و نوعی سرفه آب زیرزمینی معلق و محلی را باعث شود. البته در این دوره‌های تر، نواحی از مغارهای نیروگاه و مغار ترانسفورماتورها که وضعیت اشباع شدگی در آنها غالب می‌شود، بیشتر خواهد بود. شرایط اشباع شدگی و هد هیدرولیکی در اطراف مغار نیروگاه احتمالاً ناشی از تغییرات مستمر بین دو وضعیت فوق‌الذکر می‌باشد که می‌توان آن‌ها را به عنوان دو حد نهایی در نظر گرفت، یادآور می‌شود که در وضعیت نخست، احتمالاً وجود جریان آب به طور مستقیم از مخزن و رود شور به سوی تونل‌ها فضا‌های زیرزمینی طرح متداول تر است و در وضعیت دوم، تأمین آب بیشتر ناشی از نفوذ آب سطحی می‌باشد.

براساس نتایج بدست آمده از مدل عددی بیشترین مقدار جابه‌جایی بدست آمده در ناحیه راست سقف مغار نیروگاه و دیواره راست آن متمرکز می‌باشد(جدول ۴) که این موضوع وضعیت ناپایداری در این محدوده را می‌رساند، به نظر می‌رسد که پدیده خزش در لایه‌های گل‌سنگی عامل تغییر شکل‌های غیرمعمول در مغار نیروگاه باشد.

یکی از مسائل مورد مطالعه نقش آب زیرزمینی در رفتار چرخه- اینوسانی تغییر شکل‌های مشاهده شده در رخداد‌های متفاوت می‌باشد، همچنان که قبلاً گفته شد، تغییرات فصلی آب زیرزمینی (خشک شدن و تر شدن توده‌سنگ مورد مطالعه) به عنوان دلیل انقباض/انبساط لایه‌های گل‌سنگ (شناخته شده است، با توجه به این امر آشکار است که تجزیه و تحلیل پاسخ‌های تغییر شکل در برابر زمان مغارها نیاز به توجه به نقش آب های زیرزمینی در ارتباط با رفتار تورمی است.

همچنین در سقف مغار ترانسفورمر جابه‌جایی قابل ملاحظه‌ای ثبت شده است که ارتباط این موضوع را می‌توان در رابطه مقابله با تأثیر آب‌های زیرزمینی و تورم لایه‌های ماسه‌سنگی دانست که در زمان طراحی نیروگاه مسجد سلیمان کاملاً درک نشده بودند، پس از مدت چندی پدیده تورم قابل انتظار بود؛ زیرا تست های تورم و آنالیز های کانی شناسی شواهد روشنی از این رفتار نشان می‌دادند. به طور خاص تست تورم انجام شده توسط آزمایشگاه دانشگاه کارلسروهه آلمان در سال ۲۰۰۶ انجام شد که نشان داد اکثر ماسه‌سنگ‌ها از متوسط تا زیاد پتانسیل تورم دارند [۲] این موضوع به درصد رس موجود در ماسه‌سنگ‌ها در ارتباط است در واقع هر چه درصد رس در ماسه‌سنگ‌ها بیشتر باشد پتانسیل تورم پذیری آن بیشتر و در نتیجه باعث تغییر شکل بیشتر و بروز ناپایداری می‌شوند [۶].

جدول ۴. مقدار جابه‌جایی بدست آمده مربوط به هر یک از مغارها (بر حسب میلی‌متر)

ناحیه	مغار نیروگاه		مغار ترانسفورمر	
	جابه‌جایی در راستای محور X	محور Y	جابه‌جایی در راستای محور X	جابه‌جایی در راستای محور Y
دیوار راست	-۷/۴	-۴۷	-۱۸/۲	-۳۳/۲
سمت راست سقف	-۴	-۵۴/۴	-۲/۳	-۴۴
سمت چپ سقف	-۰/۲۳	-۳۶	-۰/۱۶۲	-۴۵
دیوار چپ	+۰/۱۳	-۰/۱۶۷	-۰/۳۵	-۴/۶

نتیجه گیری

بر اساس نتایج مدل عددی در سقف مغار نیروگاه، ادامه روند افزایش جابه‌جایی در پایین دست را نشان می‌دهد. افزایش جابه‌جایی‌ها در دیواره پایین دست مغار نیروگاه به علت وجود لایه‌های رسی در این ناحیه است. تغییر شکل‌های حاصله را به حضور لایه‌های لای‌سنگ و گل‌سنگ‌های با رفتارهای خزشی ارتباط داده می‌شود. به علاوه بر پدیده خزش، بخشی از تغییر شکل‌ها به حضور آب، که در آن زمان بصورت قطره‌ای در تمامی سازه‌های زیرزمینی وجود داشت، ارتباط داده می‌شود، در این رابطه باید بخاطر داشت که وجود احتمالی چرخه‌های تری و خستگی که منجر به انقباض و انقباض لایه‌های رس‌دار و بروز تورم‌زایی می‌شود، خود به عنوان عامل دوم در بروز ناپایداری‌ها محسوب می‌شود.

منابع

- [۱] آقاباتی، س. ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور می ۴۹-۴۱۰.
- [۲] آخسروی، س. (۱۳۹۰) " تعیین پارامترهای رفتار وابسته به زمان توده سنگ و تحلیل پایداری به روش کرنش مستقیم مطالعه موردی مغار نیروگاه مسجد سلیمان " نهمین همایش ملی تونل.
- [۳] گروه ژئوتکنیک شرکت مشاورین؛ ۱۳۸۰؛ تحلیل برکنشی مغار طرح توسعه.
- [۴] ملامونت سد و نیروگاه‌های برق آبی؛ ۱۳۷۹؛ گزارش طراحی سیستم نگهداری و ابزار بندی سد و مغارهای طرح توسعه.
- [5] Sakurai, S. (2016). Back analysis in rock engineering. CRC Press, 4 Ed.
- [6] Soralump, S., Isaroran, R., Yongsampho, S. (2019). Weak Plane Failure of Phyllitic Sandstone: Back Analysis for Slope Stabilization and the Use of Probabilistic Approach for Design Optimization. Geotech Geol En. 37, 2315-2324.