

تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه‌جایی مغار نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه با استفاده از روش اجزاء مجزا

مصطفی شریف زاده (استادیار)

مسعود قربانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رضا مسعودی (کارشناس)

بخش کنترل کیفیت پروژه‌ی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ی سیاه‌بیشه، شرکت ساختمانی تابه

محسن شریفی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

«تحلیل برگشتی» روش مفیدی است برای ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی سازه‌های زیرزمینی و سطحی با تکیه بر اندازه‌گیری‌های برجای متغیرهای کلیدی -- نظیر جابه‌جایی، تنش و کرنش -- که برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگه‌داری سازه‌ها بسیار ضروری‌اند. در این تحقیق با توجه به طبیعت ناپوسته‌ی توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه از نظر ابعاد بلوک‌ها و آرایش و فاصله‌داری درزه‌ها، به‌منظور تحلیل عددی سه‌بعدی از روش اجزاء مجزا استفاده شد. در ادامه تحلیل برگشتی مغار نیروگاه با استفاده از روش مستقیم مبتنی بر جابه‌جایی و براساس الگوریتم بهینه‌سازی تک‌متغیره انجام شد و پارامترهای ژئومکانیکی بهینه‌ی توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار به دست آمد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در محدوده‌ی مغار نیروگاه روند یکسانی را نشان داده و صحت مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از تحلیل برگشتی را تأیید می‌کند. سپس تحلیل معمولی مغار نیروگاه در شرایط طبیعی و با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل برگشتی انجام شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مغار نیروگاه در شرایط طبیعی پایدار است و سیستم نگه‌داری موجود کارایی خوبی در کنترل جابه‌جایی‌ها دارد. در نهایت، وضعیت پایداری بلندمدت مغار نیروگاه در شرایط اشباع بررسی شد. نتایج تحلیل‌ها در این شرایط نشان داد که پس از راه‌اندازی پروژه با توجه به نزدیکی مغار نیروگاه به دریاچه‌ی سد پایین‌دست، میزان فشار منفذی و فشار بلندکننده در سطوح درزه‌های محدوده‌ی مغار نیروگاه افزایش یافته و در نهایت موجب ریزش مغار نیروگاه در محدوده‌ی ایستگاه سوم ابزار دقیق می‌شود. به‌منظور تضمین پایداری بلندمدت مغار اجرای پرده‌ی آب‌بندی در اطراف مغار نیروگاه پیشنهاد شد.

sharifzadeh@aut.ac.ir
m.ghorbani@aut.ac.ir
rezamasoudi@yahoo.com
sharifi_m@aut.ac.ir

واژگان کلیدی: تحلیل برگشتی، مغار نیروگاه، روش اجزاء مجزا، کشیدگی سنج، سیاه‌بیشه.

۱. مقدمه

است از روش تحلیل تنش با استفاده از روش‌های عددی به‌منظور تعیین تنش، کرنش و توزیع جابه‌جایی برای مسئله‌ی مورد نظر؛ و بخش دوم شامل یک الگوریتم مناسب بهینه‌سازی است که اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی برجا و داده‌های به دست آمده از تحلیل تنش را کمینه می‌کند.^[۱] این اختلاف معمولاً در قالب یک «تابع خطا» بیان می‌شود.

در حوزه‌ی سازه‌های زیرزمینی، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده برای مسائل خاص معمولاً منطبق بر یکی از پارامترها و شامل: کرنش‌ها، جابه‌جایی‌های نسبی، جابه‌جایی‌های مطلق، تنش در توده‌سنگ‌ها و نگه‌دارنده، فشار نگه‌داری (قاب‌های

تحلیل برگشتی اطلاعات حاصل از ابزاربندی و رفتارسنجی تونل‌ها و مغارها در زمان حفر و بهره‌برداری، علاوه بر ارزیابی قریب به یقین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، وضعیت پایداری سازه را نیز مشخص می‌کند. به‌طورکلی تحلیل برگشتی روشی است که پارامترهای حاکم بر یک سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن سیستم پیش‌بینی می‌کند.

به‌طور عام، انجام یک تحلیل برگشتی مستلزم دو بخش است. بخش اول عبارت

فولادی و پیچ‌سنگ‌ها)، نیروهای موجود در انکرها (مونوبارها) و فشار آب زیرزمینی است.

بیشتر کارهای انجام شده در این زمینه معطوف به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها (نظیر اندازه‌گیری هم‌گرایی دیواره‌ها) بوده است. دلیل این امر آن است که از دیدگاه ریاضی، جابه‌جایی پارامتری است که پدیده‌های محلی تأثیر چندانی بر آن ندارند. در مقایسه، تنش‌ها و کرنش‌ها پارامترهای دیفرانسیلی بوده و مقادیر آنها از یک نقطه به نقطه دیگر متفاوت است. بنابراین، برای یافتن مقداری که بیانگر تنش و کرنش در توده‌سنگ باشد، باید اندازه‌گیری‌های کافی در نقاط مختلف انجام و از مقادیر میانگین آنها استفاده شود^[۱]. از طرف دیگر، جابه‌جایی‌های القاشده در توده‌سنگ بر اثر حفاری را می‌توان به‌سهولت و با دقت اندازه‌گیری کرد. روش‌های تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه‌جایی از سال ۱۹۷۰ تاکنون جزو موضوعات تحقیقی مهم بوده و مطالعات گسترده‌ی برای توسعه‌ی این روش‌ها انجام شده است^[۲-۷]. علاوه بر روش‌های تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه‌جایی، روش‌های تحلیل برگشتی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های صحرایی تنش و کرنش نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند^[۸،۹]. مدل‌های رفتاری مورد استفاده در روش‌های تحلیل برگشتی از کشسان خطی تا مدل‌های غیرخطی (مانند الاستوپلاستیک، ویسکوالاستیک^[۱۰] و مدل‌های ویسکوپلاستیک^[۱۱])، از مدل‌های دوبعدی تا سه‌بعدی^[۵،۱۲] و از مدل‌های قطعی تا مدل‌های غیر قطعی تغییر می‌کنند^[۱۳،۱۴].

به‌طور کلی سه الگوریتم مختلف برای تحلیل برگشتی مستقیم وجود دارد: روش تک‌متغیره^۱، روش چندمتغیره^۲ و روش تک‌متغیره‌ی متناوب^۳^[۱۶]. در روش تک‌متغیره، در هر مرحله فقط یک پارامتر را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها ثابت‌اند. پس از بهینه‌سازی یک پارامتر در مرحله‌ی بعد پارامتر دیگری را تغییر می‌دهیم و سایر پارامترها را ثابت نگه می‌داریم. این عمل را تا زمانی که مقادیر بهینه‌ی تمام پارامترها به دست آیند ادامه می‌دهیم. در روش چندمتغیره، برخلاف روش تک‌متغیره، بهینه‌سازی پارامترها به‌صورت همزمان انجام می‌گیرد. بدین ترتیب مدلی که کم‌ترین خطا را داشته باشد «مدل بهینه» و پارامترهای متناظر با آن را «پارامترهای بهینه» می‌نامیم. روش تک‌متغیره‌ی متناوب، شکل توسعه‌یافته‌ی روش تک‌متغیره است که آن را بهبود می‌بخشد. در این روش پس از یافتن مقادیر بهینه‌ی پارامترها طبق روش تک‌متغیره، در مرحله‌ی بعد تمامی پارامترها به‌صورت همزمان تغییر داده می‌شوند. تغییر همزمان پارامترها تا زمانی که تابع هدف به مقدار مورد نظر برسد ادامه می‌یابد. در بیشتر سازه‌های زیرزمینی نیروگاه‌های برق‌آبی، مغار نیروگاه یکی از بزرگ‌ترین و حساس‌ترین سازه‌های حفر شده در مجموعه‌ی نیروگاه است. با توجه به اهمیت وسایل و تجهیزاتی که در مغارها جای می‌گیرند، موضوع پایداری و نگه‌داری این نوع سازه‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. با توجه به این که طول مغار در مقایسه با ابعاد مقطعی آن بزرگ نیست و نیز به‌علت وجود حفاری‌های متقاطع در مغار نیروگاه، فرض کرنش صفحه‌ی صاف صادق نیست. در این نوع فضاها لازم است حفاری‌ها با فرض شرایط کرنش سه‌بعدی مورد تحلیل قرار گیرند.

در حال حاضر تمایل بیشتری برای تحلیل دوبعدی فضا‌های زیرزمینی وجود دارد. طراحان فقط به‌هنگام مواجهه با هندسه‌های پیچیده، توزیع سه‌بعدی تنش، و عدم برقراری شرایط کرنش صفحه‌ی صاف، تحلیل‌های سه‌بعدی را انجام می‌دهند. تحلیل‌های سه‌بعدی، تحلیل‌هایی وقت‌گیر، هزینه‌بر و مشکل‌اند اما نتایج آنها به واقعیت نزدیک‌تر است و نتایج آنالیزهای دوبعدی را نیز دربر می‌گیرند.

تاکنون تحقیقات متعدد دوبعدی فراوانی به‌منظور تحلیل پایداری مجموعه نیروگاه سیاه‌بیشه و با استفاده از روش‌های اجزاء مجزا (DEM)^[۱۷]، اجزاء محدود (FEM)^[۱۸] و نیز سه‌بعدی با استفاده از روش تفاضل محدود (FDM)^[۱۹] انجام

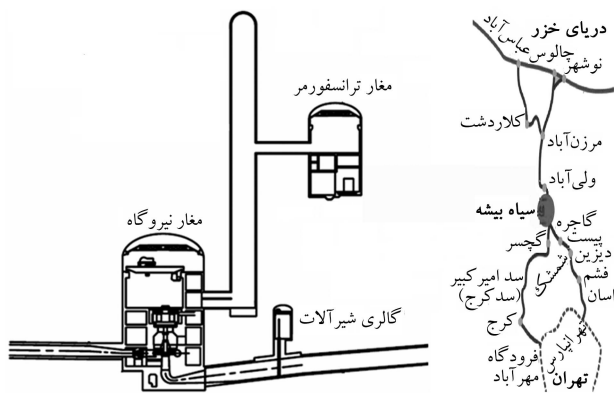
شده است. روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود برای مدل‌سازی محیط‌های پیوسته به کار می‌روند اما ناپیوستگی‌ها را نمی‌توان به‌راحتی در آنها مدل‌سازی کرد. در این تحقیق با توجه به طبیعت ناپیوسته‌ی توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار نیروگاه از نظر ابعاد بلوک‌ها و آرایش و فاصله‌داری درزه‌ها و نیز عدم برقراری شرایط کرنش صفحه‌ی صاف از تحلیل سه‌بعدی ناپیوسته با روش اجزاء مجزا استفاده شده است. از مزایای این روش می‌توان به دقت، سرعت و امکان بررسی شرایط متغیر و پیچیده، و انطباق بیشتر مدل ارائه‌شده با شرایط طبیعی به‌دلیل واردشدن بیشتر خصوصیات توده‌سنگ اشاره کرد.

آب یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر طراحی و کارایی سیستم نگه‌داری سازه‌های زیرزمینی است. این مسئله در مورد سازه‌های حفاری شده در محدوده‌ی تأثیر مخازن سدها به‌دلیل ارتفاع زیاد آب پشت مخزن سد و نیز بالا بودن فشار منفذی و نیروی بلندکننده^۴ در سطوح درزه‌ها از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. پس از راه‌اندازی طرح سیاه‌بیشه، با توجه به نزدیکی مغار نیروگاه به مخزن سد پایین دست، تاج مغار نیروگاه در حدود ۳۰ متر پایین‌تر از تراز دریاچه‌ی سد پایین دست قرار گرفته و به‌همین دلیل در شرایط اشباع کامل قرار خواهد گرفت. لذا انجام ارزیابی پایداری بلندمدت مغار نیروگاه در این شرایط ضرورت می‌یابد.

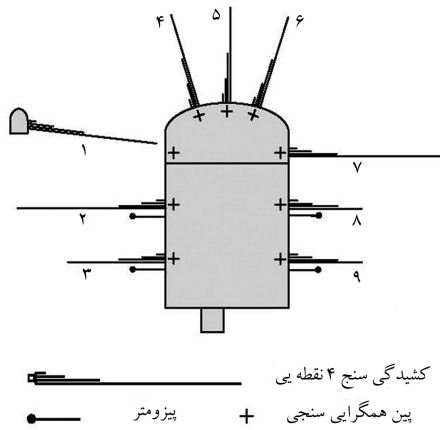
در این تحقیق برای اولین بار تحلیل برگشتی مستقیم مغار نیروگاه سیاه‌بیشه با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی اجزاء مجزا و بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی تک‌متغیره انجام شد. در ادامه، پس از یافتن پارامترهای ژئومکانیکی بهینه‌ی توده‌سنگ محدوده‌ی مغار، تحلیل معمولی مغار نیروگاه در شرایط طبیعی با استفاده از این پارامترها انجام شد و وضعیت پایداری مغار، مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، وضعیت پایداری بلندمدت فضا در شرایط اشباع و عملکرد سیستم نگه‌داری مغار نیروگاه در این شرایط مورد بررسی قرار گرفت و راهکار مناسب به‌منظور پایداری‌سازی مغار ارائه شد.

۲. معرفی طرح سد و نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه

ساخت‌گاه سد و نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه در ۱۲۵ کیلومتری شمال تهران در نزدیکی دهکده‌ی سیاه‌بیشه و به‌فاصله‌ی حدود ۱۰ کیلومتری شمال تونل کندوان در مجاورت جاده‌ی چالوس واقع شده است (شکل ۱ الف). این طرح شامل دو سد در تراز بالا و پایین بر روی رودخانه‌ی چالوس، و یک نیروگاه زیرزمینی است. سدهای بالادست و پایین دست از نوع سنگ‌ریزه‌ی با رویه‌ی بتنی (CFRD) است و ارتفاع آنها به ترتیب ۸۵ و ۱۰۴ متر خواهد بود. دو تونل آب‌رسان با طول تقریبی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی طرح و جانمایی فضا‌های زیرزمینی.



شکل ۲. آرایش کشیدگی سنج‌ها، فشارسنج‌ها و پین‌های همگرایی سنجی در ایستگاه سوم ابزاربندی مغار نیروگاه.

سقف، دیواره‌های بالادست و پایین دست مغار از کشیدگی سنج‌های ۴ نقطه‌یی استفاده شده است. با توجه به تأخیرات موجود در نصب کشیدگی سنج‌ها، مقداری از جابه‌جایی‌های اولیه‌ی مهم از دست رفته و دستگاه‌ها موفق به ثبت آنها نشده‌اند. به‌منظور اندازه‌گیری بار وارده به مونوبارها نیز تعدادی نیروسنج روی مونوبارهای مشخص در سقف و دیواره‌ها نصب شده‌اند. به‌منظور اندازه‌گیری فشار آب زیرزمینی نیز در دیواره‌های بالادست و پایین دست مغار تعدادی فشارسنج با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع نصب شده است. قابل ذکر است که علاوه بر ابزارهای یادشده، تعدادی پین همگرایی سنجی در سقف و دیواره‌ها تعبیه شده بودند که متأسفانه به دلیل مشکلات به وجود آمده در نصب و نگهداری این ابزار، هم‌اکنون قرائت‌های همگرایی سنجی صورت نمی‌گیرد. همچنین قرار است تعدادی سلول فشارسنج قرائت از راه دور با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع در دیواره‌های چپ و راست مغار نیروگاه در ترازهای ۱۸۴۵، ۱۸۵۵ و ۱۸۳۹ نصب شود [۲۱، ۲۲].

۵. مدل‌سازی عددی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه با استفاده از

روش اجزاء مجزا

به‌منظور تحلیل عددی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه و تطابق هرچه بیشتر مدل با طبیعت سنگ‌های درزه‌دار منطقه از نرم‌افزار ۳DEC از سری نرم‌افزارهای شرکت ITASCA استفاده شده است. نرم‌افزار ۳DEC یک نرم‌افزار عددی و سه بعدی است که بر مبنای روش اجزاء مجزا و مدل‌سازی ناپیوسته برای آنالیزهای استاتیکی، دینامیکی، هیدرولیکی و هیدرومکانیکی به کار می‌رود. این نرم‌افزار توده‌سنگ را به صورت مجموعه‌یی سه بعدی از بلوک‌های صلب یا تغییر شکل پذیر و ناپیوستگی‌ها مدل می‌کند. نرم‌افزار ۳DEC از الگوریتم حل صریح زمانی که امکان مدل‌سازی جابه‌جایی‌های زیاد و چرخش بلوک‌ها را فراهم می‌آورد، استفاده می‌کند [۲۳].

مراحل مختلف تحلیل عددی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه در شکل ۳ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، به‌منظور مدل‌سازی عددی مجموعه نیروگاه، بلوکی به ابعاد $270 \times 220 \times 210$ متر شامل مغار نیروگاه (PHC)، مغار ترانسفورمر (TC) و گالری دریچه‌ها (GGC) ساخته شد (شکل الف و ب). این بلوک با در نظر گرفتن محدوده‌ی تأثیر تنش‌های القایی در مرز مدل انتخاب شد. مدل ساخته شده شامل سه نوع سنگ (ماسه‌سنگ کوارتزیتی، شیل قرمز و سنگ آذرین)

۲۰۰ متر و قطر ۵٫۷ متر آب را از پشت سد بالادست به شفت‌های آب‌بر با طول ۵۰۰ متر و قطر ۵ متر انتقال خواهند داد. آب پس از عبور از شفت‌های آب‌بر وارد پایه‌ی لوله‌زانی ۵ می‌شود که آب را به چهار واحد توربین-پمپ انتقال می‌دهند. مغار نیروگاه سیاه‌بیشه با طول ۱۳۲ متر، عرض ۲۵ متر و ارتفاع ۲۶٫۵ متر و مغار ترانسفورمر با طول ۱۶۱ متر، عرض ۱۶ متر و ارتفاع ۲۸ متر، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین سازه‌های زیرزمینی طرح هستند (شکل ب). هدف طرح، ایجاد تعادل در شبکه‌ی برق مصرفی کشور در ساعات پربار و کم‌بار است. بیشینه‌ی ظرفیت تولیدی طرح برابر با ۱۰۰۰ مگاوات خواهد بود.

۳. زمین‌شناسی محدوده‌ی نیروگاه سیاه‌بیشه

محدوده‌ی ساخت‌گاه طرح، در تقسیمات زمین‌شناسی ایران در بلوک ساختمانی البرز که در فاز کوه‌زایی آلپی تشکیل شده است، قرار دارد. محل قرارگیری دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر از لحاظ زمین‌شناسی متعلق به دوره‌ی پرمین است. ساخت‌گاه نیروگاه زیرزمینی سیاه‌بیشه متعلق به سازند درود است که لایه‌های آن عمدتاً از سنگ‌های رسوبی شامل ماسه‌سنگ کوارتزیتی، لای سنگ شیلی و سنگ آهک تشکیل شده‌اند. سنگ آذرینی که در ناحیه‌ی طرح مورد بررسی دیده می‌شود، شامل بازالت اسپلیتی با نام چینه‌شناسی ملافیر است. وضعیت صفحات لایه‌بندی در محدوده‌ی مغار از لحاظ شیب و امتداد شیب تفاوت قابل ملاحظه‌یی نداشته و در حالت کلی می‌توان یک لایه‌بندی واحد با شیب و امتداد شیب ۵۵/۱۹۵ برای کل مغار در نظر گرفت. ضخامت لایه‌ها از ۲ سانتی‌متر تا ۳٫۵ متر متغیر است. متوسط ضخامت در بیشتر لایه‌ها در حدود ۳۲ سانتی‌متر است. طی حفاری تونل پیشاهنگ در تاج مغار نیروگاه، در کیلومترهای ۰+۰۴۰، ۰+۰۸۱ و ۰+۰۸۹ دیواره‌ی راست، سه ناحیه‌ی برشی به موازات صفحات لایه‌بندی مشاهده شد. برای عدم تداخل با گسل‌های موجود در منطقه، امتداد مغار $N15^{\circ}E$ در نظر گرفته شده است. براساس مطالعات انجام شده در طول تونل پیشاهنگ در محدوده‌ی مغار نیروگاه، علاوه بر لایه‌بندی دو دسته‌درزه‌ی اصلی و سه دسته درزه‌ی فرعی مشاهده می‌شود که مقادیر مربوط به شیب و جهت شیب آنها در جدول ۱ ارائه شده است [۲۰].

۴. رفتارنگاری مغار نیروگاه سیاه‌بیشه

ابزار دقیق مغار نیروگاه در ۶ آرایه و در کیلومترهای ۰+۰۲۶، ۰+۰۴۹، ۰+۰۶۷، ۰+۰۸۷، ۰+۱۰۵ و ۰+۱۲۱ نصب شده است. در شکل ۲ ابزارهای نصب شده در ایستگاه سوم ابزاربندی نشان داده شده است. به‌منظور اندازه‌گیری و کنترل حرکات

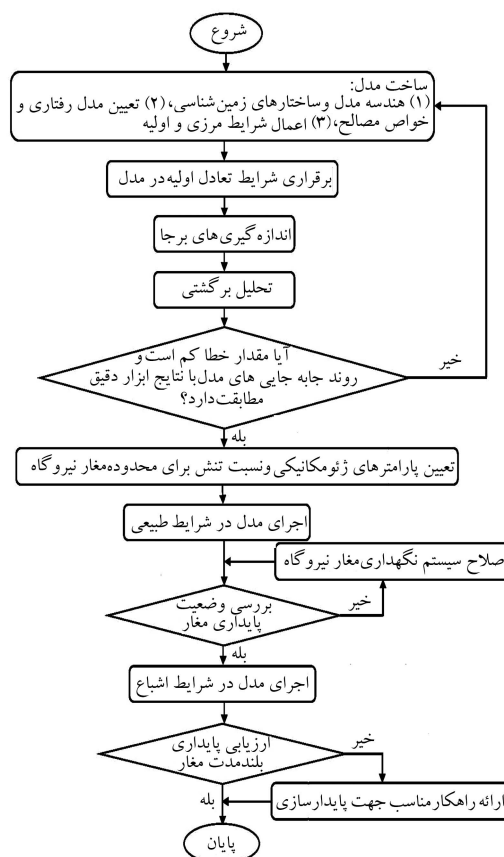
جدول ۱. جهت‌یابی ناپیوستگی‌های موجود در محدوده‌ی مغار [۲۰].

نوع ناپیوستگی	امتداد شیب	شیب
لایه‌بندی	۱۹۵	۵۵
دسته درزه اول	۳۰	۵۶
J_{1-1}	۱۸	۸۱
J_{1-2}	۹	۶۶
J_{1-3}	۳۰۵	۸۰
دسته درزه دوم	۷۸	۸۲

جدول ۲. مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های محدوده‌ی مغار نیروگاه [۱۸].

پارامتر/نوع سنگ	ماسه‌سنگ کوارتزیتی	شیل قرمز/لای سنگ	ملاخیر
چگالی خشک (kg/m^3)	۲۸۱۰	۲۶۳۰	۲۹۰۰
چگالی اشباع (kg/m^3)	۲۹۷۰	۲۷۵۰	۲۹۲۰
مدول بالک (GPa)	۸٫۳۳	۵	۱۶٫۶۷
مدول برشی (GPa)	۶٫۲۵	۳	۱۲٫۵
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۱۰۰	۵۰	۱۰۰
چسبندگی (MPa)	۱۸	۱۲	۱۸
مقاومت کششی (MPa)	۶	۳	۶
زاویه اصطکاک (درجه)	۵۰	۴۰	۵۰
GSI	۵۳	۴۸	۵۵
mi	۲۰	۹	۲۵

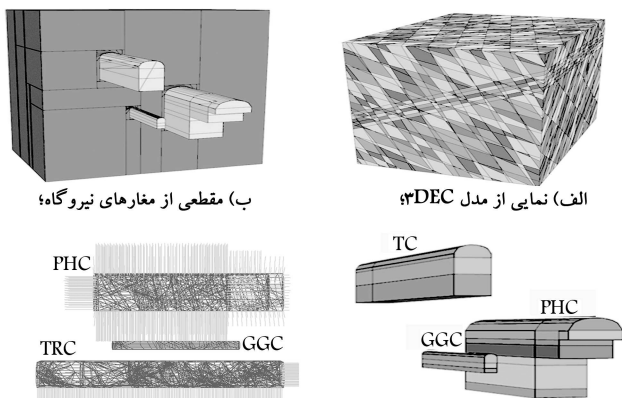
و ژئومکانیکی آنها در جدول ۳ ارائه شده است [۱۸]. درزه‌های بحرانی مغار نیروگاه براساس مشاهدات و نیز بررسی نتایج کشیدگی سنج‌های محدوده‌ی مغار نیروگاه، انتخاب و به‌طور پیوسته در مدل اعمال شده‌اند. از آنجا که سطح آب زیرزمینی نیز در مدل اعمال شده، خواص مواد موجود در زیر این سطح به‌صورت خواص اشباع اعمال شده است. مراحل حفاری مغارهای نیروگاه و نیز سیستم نگه‌داری آنها شامل شاتکریت، پیچ‌سنگ و مونوبار به‌ترتیب مراحل اجرایی مدل‌سازی شده است (شکل ۴ ج و د). از مدل رفتاری موهر-کولمب به‌عنوان مدل رفتاری مصالح سنگی استفاده شد. خصوصیات مورد نیاز برای مدل موهر-کولمب شامل مدول بالک، مدول برشی، زاویه‌ی اصطکاک، زاویه‌ی اتساع، چسبندگی و مقاومت کششی هستند. شرایط مرزی مدل با در نظر گرفتن عمق بلوک به مدل اعمال شده است. بدین‌منظور اطراف و پایین مدل از نظر جابه‌جایی ثابت شده و در مرز بالای مدل با در نظر گرفتن ارتفاع روباره‌های معادل ۱۶۲ متر، تنش‌ی معادل ۴٫۵۴ مگاپاسکال با استفاده از شرایط مرزی تنش اعمال شده است. تنش قائم و افقی برجا با توجه به تابع متغیر در محیط مدل اعمال شد. شرایط مدل به‌گونه‌ی است که در کف مدل ارتفاع روباره معادل ۳۸۲ متر است که با فرض چگالی متوسط ۲٫۸ تن برمتر مکعب، بیشترین تنش قائم در پایین مدل برابر ۱۰٫۷ مگاپاسکال به دست آمد. این مقدار با گرادانی معادل ۰٫۲۸ مگا پاسکال بر متر به سمت بالا کم می‌شود. از طرفی براساس مطالعات برجای انجام شده در محل، نسبت تنش افقی به قائم برابر



شکل ۳. الگوریتم تحلیل برگشتی و بررسی پایداری بلندمدت فضا.

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی درزه‌ها [۱۸].

زبری	چسبندگی (MPa)	سختی برشی (GPa/m)	سختی نرمال (GPa/m)	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)
۰٫۱	۰٫۵	۷٫۶۹	۲۰	۳۰



شکل ۴. نمایش سه‌بعدی هندسه مدل. (ج) مراحل حفاری مغارهای نیروگاه در DEC ۳ (د) مونوبارهای اجرا شده در مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر در DEC ۳

شکل ۴. نمایش سه‌بعدی هندسه مدل.

است که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است [۱۸]. سطوح ناپیوستگی اعمال شده در مدل، شامل درزه‌های بحرانی و نیز سطوح لایه‌بندی است که خصوصیات فیزیکی

قراوت یا عملکرد نادرست ابزار حذف شوند. بدین منظور، و پس از بررسی نتایج حاصل از کشیدگی سنج‌ها، در نهایت ۱۵۰ نقطه از میان ۲۰۸ نقطه‌یی که نتایج جابه‌جایی در آنها ثبت شده بود برای انجام عملیات تحلیل برگشتی انتخاب شدند.

۱.۶. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی توده‌سنگ آذرین

تحلیل برگشتی در مدل سه‌بعدی به‌منظور به دست آوردن پارامترهای مکانیکی ملافیر شامل مدول کشسانی (E)، ضریب چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) انجام شد. در مرحله‌ی اول مدهایی از ترکیب‌های مختلف مدول کشسانی ساخته و اجرا شدند. چنان‌که پیش‌تر نیز یادآوری شد، در اینجا از روش تحلیل برگشتی مستقیم تک‌متغیره استفاده کردیم. بدین‌منظور فقط مقدار مدول کشسان در مدل‌ها تغییر می‌کرد و مقدار سایر پارامترهای ژئومکانیکی در طی تحلیل‌ها ثابت بودند. برای یافتن مقدار مدول کشسان ملافیر، ۴ مدل مختلف و با مقادیر مدول کشسان ۱۸، ۲۲، ۲۶ و ۳۰ گیگاپاسکال ساخته و اجرا شدند؛ سایر پارامترهای مکانیکی مطابق جدول ۴ ثابت ماندند. مقادیر انتخابی برای مدول کشسان ملافیر (بازالت) براساس نتایج اندازه‌گیری‌های برجا و نیز مقادیر پایه‌ی این پارامتر انتخاب شدند. پس از انجام تحلیل برگشتی و به دست آوردن مقادیر خطا برای هر مدل، در نهایت مقدار تابع خطا در مدول کشسانی ۲۶ GPa کمینه شد و این مقدار به‌عنوان مقدار مدول کشسانی ملافیر که کم‌ترین خطا، و به بیان دیگر بیشترین انطباق را با واقعیت دارد انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی مدول کشسانی ملافیر در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ملافیر نیز به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. مناسب‌ترین روش برای ارائه‌ی نتایج نهایی، ارائه‌ی متغیرها به‌صورت متوسط عددی و دامنه‌ی آنهاست. در جدول ۷ نتایج نهایی حاصل از تحلیل برگشتی ملافیر ارائه شده است.

جدول ۴. مدل‌های ساخته‌شده برای پیدا کردن مدول کشسان ملافیر.

پارامترها	$C = 7 \text{ MPa}, \varphi = 43^\circ, v = 0.22, K = 1/1, \beta = 0^\circ$			
$E \text{ (GPa)}$	۳۰	۲۶	۲۲	۱۸
درصد خطا	۱/۹۹۶۴	۱/۶۵۷۱	۲/۱۲۸۹	۲/۴۴۱۰

جدول ۵. مدل‌های ساخته‌شده برای پیدا کردن چسبندگی ملافیر.

پارامترها	$E = 26 \text{ GPa}, \varphi = 43^\circ, v = 0.22, K = 1/1, \beta = 0^\circ$			
$C \text{ (MPa)}$	۸	۷	۶	۵
درصد خطا	۱/۷۵۸۳	۱/۶۵۷۱	۱/۴۷۳۷	۱/۶۸۵۲

جدول ۶. مدل‌های ساخته‌شده به‌منظور یافتن زاویه‌ی اصطکاک داخلی ملافیر.

پارامترها	$E = 26 \text{ GPa}, C = 6 \text{ MPa}, v = 0.2, K = 1/1, \beta = 0^\circ$			
$\varphi \text{ (درجه)}$	۴۳	۴۲	۴۱	۴۰
درصد خطا	۱/۴۷۳۷	۱/۴۰۲۳	۱/۳۲۶۱	۱/۳۸۷۴

جدول ۷. نتایج نهایی حاصل از تحلیل برگشتی ملافیر.

$E = 26 \pm 1 \text{ GPa}$	$C = 6 \pm 0.5 \text{ MPa}$	$\varphi = 41^\circ \pm 0.5$
----------------------------	-----------------------------	------------------------------

۱/۸ تعیین شد که در این صورت تنش افقی در کف مدل برابر ۱۱/۷۷ مگاپاسکال به دست می‌آید. این مقدار نیز با گرادیان ۰/۳۰۸ مگاپاسکال بر متر به سمت بالا کم می‌شود^[۱۸]. پس از ساخت مدل عددی و برقراری شرایط تعادل اولیه، در ادامه تحلیل برگشتی مستقیم مغار نیروگاه سیاه‌بیشه با استفاده از نتایج کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در سقف و دیواره‌های مغار انجام شد و پارامترهای ژئومکانیکی بهینه‌ی توده‌سنگ محدوده‌ی مغار به دست آمد. سپس با استفاده از این پارامترهای بهینه، تحلیل معمولی مغار در شرایط طبیعی و اشباع انجام شد و وضعیت پایداری فضا مورد ارزیابی قرار گرفت و راه‌کارهای مناسب به‌منظور پایداری آن پیشنهاد شد.

۶. تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه

به‌منظور تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه و یافتن پارامترهای بهینه‌ی مواد، از روش تحلیل برگشتی مستقیم مبتنی بر جابه‌جایی استفاده شد که دلیل آن، در دسترس بودن مقادیر جابه‌جایی اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در سقف و دیواره‌ها و عدم تأثیر زیاد پارامترهای محلی بر آن بود. این روش براساس بهینه‌سازی پارامترهای مکانیکی مواد به‌کمک روش سعی و خطا پایه‌گذاری شده است. برای این منظور تابع خطا (رابطه‌ی ۱) به زبان برنامه‌نویسی FISH و به‌منظور کمینه‌سازی اختلاف میان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی کشیدگی سنج‌ها و جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده از طریق مدل‌سازی عددی نوشته شد.

$$\epsilon(p) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i^m(p) - u_i}{u_i} \right)^2} \quad (1)$$

که در آن n تعداد نقاط اندازه‌گیری، $i = 1, 2, \dots, n$ و u_i و $u_i^m(P)$ به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی جابه‌جایی از طریق تحلیل عددی در نقاط متناظرند. مقدار $u_i(P)$ به پارامترهای مجهول مدل که در بردار P جمع شده‌اند بستگی دارد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، تابع خطایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته یک تابع خطای به‌هنگار است. به‌هنگار کردن تابع خطا سبب کاهش تأثیر خطاهای موجود در مقادیر اندازه‌گیری شده -- از قبیل خطاهای نصب، قراوت و ثبت ابزار -- و نیز خطاهای ناشی از نویز^۶، و در نتیجه ممانعت از جواب‌های گمراه‌کننده می‌شود.

حدود ۴۰ تا ۵۰ متر انتهایی مغار به‌طور کامل از توده‌سنگ آذرین از جنس ملافیر تشکیل شده است. ۸۰ تا ۹۰ متر ابتدایی مغار نیز عمدتاً از توالی ماسه‌سنگ کوارتزیتی، شیل قرمز و ملافیر تشکیل شده است. به‌منظور یافتن پارامترهای ژئومکانیکی بهینه‌ی این دو منطقه، دو تابع خطای مختلف مطابق فرمول ۱، براساس نتایج کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در هر محدوده به‌کمک زبان برنامه‌نویسی FISH نوشته شد. بدین‌منظور و برای انجام تحلیل برگشتی بخش انتهایی مغار (ملافیر) از نتایج کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در این محدوده استفاده شد. کشیدگی سنج‌های ایستگاه‌های پنجم و ششم ابزاربندی، کشیدگی سنج‌های ایستگاه چهارم ابزاربندی در دیواره‌ی بالادست مغار، و نیز کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در دیواره‌ی جنوبی مغار بدین‌منظور مورد استفاده قرار گرفتند. برای انجام تحلیل برگشتی در قسمت ابتدایی مغار (منطقه‌ی لایه‌بندی) و یافتن پارامترهای بهینه‌ی معادل این محدوده نیز از کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در این محدوده شامل کشیدگی سنج‌های ایستگاه‌های اول، دوم، سوم، و کشیدگی سنج‌های ایستگاه چهارم در دیواره‌ی پایین دست مغار و نیز کشیدگی سنج‌های نصب‌شده در دیواره‌ی شمالی مغار استفاده شد. قبل از انجام عملیات تحلیل برگشتی بهتر است نتایج حاصل از ابزار دقیق برداش شود، و جابه‌جایی‌های اشتباه ناشی از خطای

جدول ۱۲. نتایج نهایی حاصل از تحلیل برگشتی بخش لایه بندی مغار نیروگاه.

$E = 17 \pm 1 \text{ GPa}$	$v = 0.24$	$C = 4.5 \pm 0.5 \text{ MPa}$	$\varphi = 38^\circ \pm 0.5$
----------------------------	------------	-------------------------------	------------------------------

جدول ۱۳. مدل های ساخته شده به منظور پیدا کردن نسبت تنش در مغار نیروگاه.

ملا فیر		
$E = 26 \text{ GPa}, v = 0.22, C = 6 \text{ MPa}, \varphi = 41^\circ, \beta = 0^\circ$		
شیل قرمز، ماسه سنگ کوارتزی و ملا فیر		
$E = 17 \text{ GPa}, v = 0.24, C = 4.5 \text{ MPa}, \varphi = 38^\circ, \beta = 0^\circ$		
نسبت تنش (K)	۱/۲	۱/۱۵
درصد خطا	۴,۳۴۸۶	۳,۷۹۹۳

ضریب k (نسبت تنش های افقی به قائم توده سنگ) در شرایط طبیعی و بکر جزو یکی از پارامترهای توده سنگ است که امکان تعیین آن از طریق مطالعات مقدماتی بسیار مشکل است و با اتکاء به نتایج تحلیل برگشتی تعیین می شود. بدین منظور پس از یافتن مقادیر بهینه ی پارامترهای ژئومکانیکی برای دو بخش مختلف مغار و با استفاده از این پارامترها، در نهایت عملیات تحلیل برگشتی برای یافتن مقدار بهینه ی ضریب k انجام شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۱۳ ارائه شده است. چنان که ملاحظه می شود مقدار تابع خطا در نسبت تنش ۱/۱ کمینه می شود.

۷. نتایج حاصل از تحلیل عددی مغار نیروگاه در شرایط طبیعی

پس از اجرای تحلیل برگشتی مغار نیروگاه و یافتن پارامترهای ژئومکانیکی بهینه ی محدوده ی مغار نیروگاه، تحلیل مستقیم مغار نیروگاه در شرایط طبیعی و با تراز آب فعلی با استفاده از این پارامترهای بهینه انجام شد.

نتایج کلی حاصل از این مرحله تحلیل و نتایج ابزار بندی در رینگ سوم مغار نیروگاه به منظور مقایسه در جدول ۱۴ ارائه شده است. دلیل انتخاب آرایه ی سوم ابزار دقیق، وجود ناحیه های برشی متعدد در محدوده ی این ایستگاه بود. ابزار دقیق نصب شده در این ایستگاه نشانگر جابه جایی های بزرگ و افزایش بار در نیرو سنج ها است. چنان که در این جدول ملاحظه می شود، نتایج مدل عددی و ابزار بندی تطابق نسبتاً خوبی با همدیگر دارند و تفاوت های موجود را می توان به تأخیر در نصب و قرائت ابزار نسبت داد. مقادیر بزرگ جابه جایی های اندازه گیری شده در تراز ۱۸۵۸ دیواره های بالادست و پایین دست مغار به دلیل وجود ناحیه های برشی متعدد در این منطقه است که تأثیر آنها به صورت کاهش پارامترهای مقاومتی در محدوده ی مغار نیروگاه اعمال شده است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب بردارهای جابه جایی را در حالت طبیعی در مقاطع عرضی و طولی مغار نیروگاه نشان می دهد. بر این اساس، مغار نیروگاه در این شرایط پایدار است و سیستم نگه داری آن عملکرد مناسبی دارد.

بررسی نتایج حاصل از مدل سازی عددی نشانگر ریزش های جزئی در محدوده ی رینگ سوم ابزار دقیق است، اما این ریزش ها در حدی نیستند که تهدیدگر جدی پایداری مغار باشند. در مدل حاضر اثر سیستم زهکش مغار نیروگاه شامل تونل ها و چال های زهکش در نظر گرفته نشده است، اگرچه در نظر گرفتن آنها تضمینی بر پایداری فضا در شرایط طبیعی خواهد بود. مغار ترانسفورمر و گالری شیرالات نیز در این شرایط از وضعیت پایداری خوبی برخوردارند.

۲.۶. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی برای بخش لایه بندی

تحلیل برگشتی در مدل سه بعدی به منظور به دست آوردن پارامترهای مکانیکی معادل بخش لایه بندی (ماسه سنگ کوارتزی، شیل قرمز و ملا فیر) شامل مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν)، ضریب چسبندگی (C) و زاویه ی اصطکاک داخلی (φ) انجام شد.

در مرحله ی اول مدل هایی از ترکیب های مختلف مدول کشسانی ساخته و اجرا شدند. بدین منظور فقط مقدار مدول کشسانی در مدل ها تغییر می کرد و سایر پارامترهای ژئومکانیکی در طی تحلیل ها ثابت بودند. برای یافتن مقدار مدول کشسانی بخش لایه بندی، ۵ مدل مختلف و با مقادیر ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ گیگاپاسکال ساخته و اجرا شدند؛ سایر پارامترهای مکانیکی مطابق جدول ۸ ثابت ماندند.

شایان ذکر است که مقادیر مدول کشسانی معادل بخش لایه بندی براساس نتایج اندازه گیری های برجا و نیز مقادیر پایه ی این پارامتر برای سه نوع سنگ مختلف، شامل ماسه سنگ کوارتزی، ملا فیر و شیل قرمز انتخاب شدند. پس از انجام تحلیل برگشتی و به دست آوردن مقادیر خطا برای هر مدل، در نهایت مقدار تابع خطا در مدول کشسان ۱۷ GPa کمینه شد. این مقدار به عنوان مقدار مدول کشسانی معادل بخش لایه بندی که بیشترین انطباق و کمترین خطا را با واقعیت دارد انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی برای این پارامتر در جدول ۸ ارائه شده است. در ادامه، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی مقادیر چسبندگی، زاویه ی اصطکاک داخلی و ضریب پواسون بخش لایه بندی در جدول های ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. در جدول ۱۲ نیز نتایج نهایی حاصل از تحلیل برگشتی بخش لایه بندی مغار نیروگاه ارائه شده است.

جدول ۸. مدل های ساخته شده برای یافتن مدول کشسان بخش لایه بندی.

پارامترها	$C = 5 \text{ MPa}, \varphi = 40^\circ, v = 0.25, K = 1/1, \beta = 0^\circ$				
$(GPa)E$	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱۱
درصد خطا	۴,۴۷۴	۳,۹۶۶	۴,۳۶۸	۴,۸۰۶	۵,۵۱۱

جدول ۹. مدل های ساخته شده برای یافتن چسبندگی بخش لایه بندی.

پارامترها	$E = 17 \text{ GPa}, \varphi = 40^\circ, v = 0.25, K = 1/1, \beta = 0^\circ$				
$(MPa)C$	۵.۵	۵	۴.۵	۴	۳.۵
درصد خطا	۴,۲۰۷	۳,۹۶۶	۳,۶۵۳	۳,۸۹۱	۴,۲۱۵

جدول ۱۰. مدل های ساخته شده به منظور یافتن زاویه ی اصطکاک داخلی بخش لایه بندی.

پارامترها	$E = 17 \text{ GPa}, C = 4.5 \text{ MPa}, v = 0.25, K = 1/1, \beta = 0^\circ$				
φ (درجه)	۴۰	۳۹	۳۸	۳۷	۳۶
درصد خطا	۳,۶۵۳۲	۳,۴۸۱۶	۳,۲۲۳۸	۳,۴۲۷۷	۳,۶۲۲۸

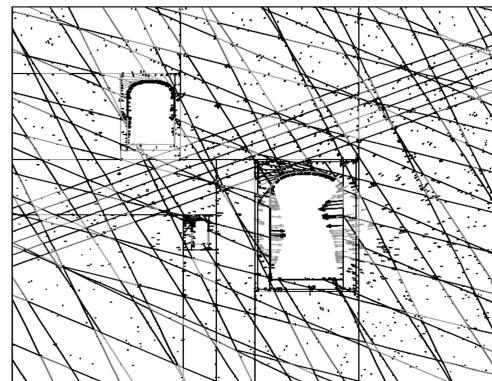
جدول ۱۱. مدل های ساخته شده به منظور یافتن ضریب پواسون بخش لایه بندی.

پارامترها	$E = 17 \text{ GPa}, C = 4.5 \text{ MPa}, \varphi = 38^\circ, K = 1/1, \beta = 0^\circ$		
نسبت پواسون	۰.۲۵	۰.۲۴	۰.۲۳
درصد خطا	۳,۲۲۳۸	۳,۱۹۰۷	۳,۲۳۵۱

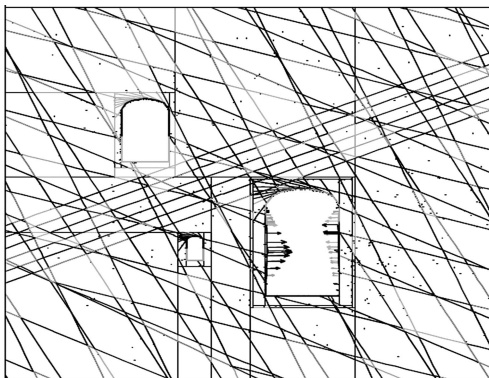
جدول ۱۴. نتایج مربوط به کشیدگی سنج‌ها در ایستگاه سوم ابزار دقیق و نتایج تحلیل در حالت طبیعی (میلی‌متر).

نتایج کشیدگی سنج‌ها	نتایج تحلیل در شرایط طبیعی		
۱۸	۲۱٫۲	نصب شده از گالری اکتشافی (EXT _۱)	دیواره‌ی بالادست
۵۹٫۰۶	۶۳	تراز ۱۸۵۸ (EXT _۲)	
۲۴٫۵	۲۳٫۱۷	تراز ۱۸۴۷ (EXT _۳)	
۱۱٫۷۳	۱۸٫۲۳	بالادست (EXT _۴)	سقف
۱۷٫۲۲	۱۷٫۴	مرکز (EXT _۵)	
۴٫۷	۱۵٫۶۸	پایین دست (EXT _۶)	
۱۱٫۳	۲۱٫۱۸	تراز ۱۸۶۶ (EXT _۷)	دیواره‌ی پایین دست
۴۵٫۶	۴۸٫۱	تراز ۱۸۵۸ (EXT _۸)	
۱۶٫۹۸	۲۳٫۲۶	تراز ۱۸۴۷ (EXT _۹)	

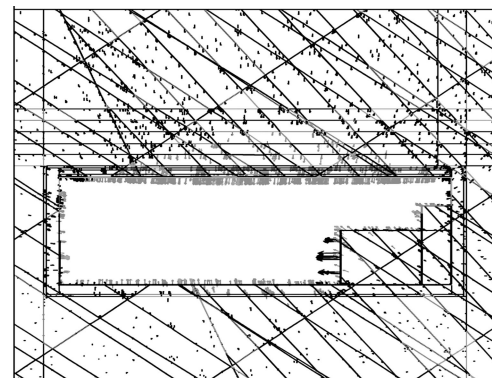
به منظور پیش‌بینی نرخ جابه‌جایی‌ها و کارایی سیستم نگه‌داری مورد استفاده قرار گرفت. به منظور محاسبه‌ی میزان فشار بلندکننده در سطوح درزه‌های محدوده‌ی اطراف کشیدگی سنج‌های آرایه‌ی سوم ابزار دقیق، یک برنامه‌ی فرعی (FISH Function) توسعه داده شد. این برنامه نزدیک‌ترین ناحیه‌ی محاسباتی به سطح درزه را با توجه به محدوده‌ی معرفی شده که منطبق بر نقاط نصب ابزار دقیق است انتخاب، و سپس نمودار فشار بلندکننده را براساس گام‌های محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل ترسیم می‌کند. شکل ۷ و ۸ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی را در حالت اشباع در مقاطع عرضی و طولی مغار نیروگاه نشان می‌دهد.



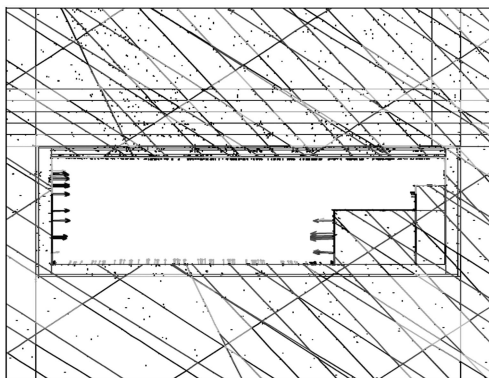
شکل ۵. بردارهای جابه‌جایی در حالت طبیعی، مقطع عرضی (تراز آب زیرزمینی ۱۸۸۰).



شکل ۷. بردارهای جابه‌جایی در حالت اشباع، مقطع عرضی (تراز آب زیرزمینی ۱۹۰۵).



شکل ۶. بردارهای جابه‌جایی در حالت طبیعی، مقطع طولی (تراز آب زیرزمینی ۱۸۸۰).



شکل ۸. بردارهای جابه‌جایی در حالت اشباع، مقطع طولی (تراز آب زیرزمینی ۱۹۰۵).

۸. نتایج حاصل از تحلیل عددی مغار نیروگاه در شرایط

اشباع

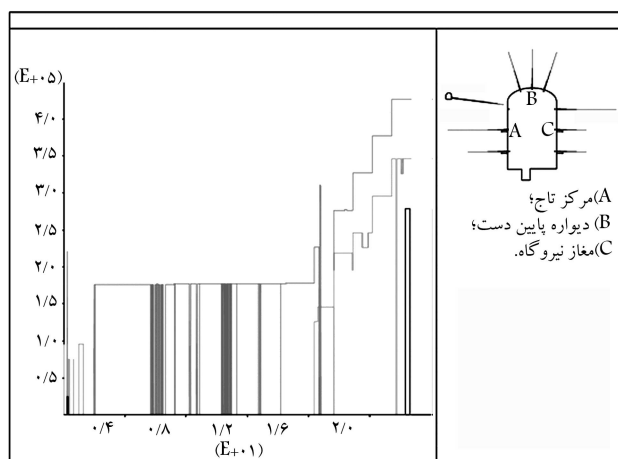
پس از آنگیری مخزن سد پایین دست، و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، به تدریج فشار بلندکننده در سطوح درزه‌ها افزایش می‌یابد. در این حالت تراز آب زیرزمینی حدود ۳۰ متر بالاتر از تاج مغار نیروگاه قرار خواهد گرفت. در این مرحله، مدل عددی طی چند مرحله با افزایش تراز آب در مدل، تا رسیدن به تراز نهایی اجرا شد و نتایج افزایش فشار و جابه‌جایی در هر مرحله ثبت شد. نتایج به دست آمده در حالت اشباع کامل

سیستم نگه‌داری مغار در شرایط اشباع، اجرای یک پرده‌ی آب‌بند در اطراف مغار نیروگاه به‌منظور تضمین پایداری بلندمدت آن پیشنهاد می‌شود.

۹. نتیجه‌گیری

تحلیل برگشتی روشی بسیار توانمند برای تفسیر نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های برجاست. در این تحقیق پس از مدل‌سازی عددی مغارهای نیروگاه سیاه‌بیشه با استفاده از نرم افزار اجزاء مجزا (3DEC)، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ محدوده‌ی مغار نیروگاه با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم مبتنی بر جابه‌جایی براساس الگوریتم تک‌متغیره بهینه‌سازی شد. در نهایت پس از مدل‌سازی معمولی مغارهای نیروگاه براساس نتایج حاصل از تحلیل برگشتی، عملکرد سیستم نگه‌داری مغار نیروگاه در شرایط طبیعی و نیز در درازمدت و در شرایط اشباع مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ی نتایج جابه‌جایی‌های پیش‌بینی‌شده به‌وسیله‌ی مدل عددی در هر دو شرایط طبیعی و اشباع با جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله‌ی کشیدگی‌سنج‌های نصب‌شده در سقف و دیواره‌های مغار نیروگاه روند یکسانی را نشان می‌دهد. این امر مؤید صحت مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از تحلیل برگشتی است.

نتایج حاصل از تحلیل مغار در حالت طبیعی نشان داد که مغار نیروگاه در این شرایط پایدار است، اگرچه جابه‌جایی‌های مضاعف در محدوده‌ی رینگ سوم مغار نیروگاه به وقوع می‌پیوندد. علت این امر وجود ناحیه‌های برشی متعدد در محدوده‌ی این ایستگاه است. بیشترین مقدار جابه‌جایی در حالت طبیعی در مقطع عرضی ۶/۵۱ سانتی‌متر در دیواره‌ی بالادست و در مقطع طولی ۲/۷۱ سانتی‌متر در پله‌ی پایینی دیواره‌ی شمالی مغار نیروگاه رخ می‌دهد. بررسی وضعیت پایداری بلندمدت مغار در شرایط اشباع نشان داد که در این شرایط میزان فشار منفذی و نیز فشار بلندکننده در سطوح درزه‌ها افزایش می‌یابد و در نهایت موجب ریزش مغار نیروگاه در محدوده‌ی رینگ سوم ابزاربندی می‌شود. بیشترین مقدار جابه‌جایی در حالت اشباع در مقطع عرضی ۶۹ سانتی‌متر در دیواره‌ی پایین دست و در مقطع طولی ۱۰ سانتی‌متر در پله‌ی پایینی دیواره‌ی شمالی مغار نیروگاه رخ می‌دهد. این امر حاکی از آن است که سیستم نگه‌داری مغار در این شرایط عملکرد مناسبی ندارد. بدین‌منظور پیشنهاد می‌شود به‌منظور تضمین پایداری بلندمدت فضا، پرده‌ی آب‌بندی به‌ضخامت حدود ۱ متر در اطراف مغار نیروگاه اجرا شود. از طرف دیگر می‌توان با احداث تونل‌های زهکش در دیواره‌ی پایین دست مغار در محدوده‌ی بین مغار نیروگاه و دریاچه‌ی سد پایین، محدوده‌ی اطراف مغار نیروگاه را به‌طور مؤثر زهکشی کرد. مغار ترانسفورمر و گالری شیرآلات نیز در هر دو شرایط طبیعی و اشباع از پایداری بسیار خوبی برخوردارند.



شکل ۹. تاریخچه‌های فشار بلندکننده در سطوح درزه‌ها در دیواره‌ی بالادست.

در شکل ۹ تاریخچه‌های فشار بلندکننده در سطوح درزه‌ها در دیواره‌ی بالادست، پایین دست و تاج مغار نیروگاه محدوده‌ی اطراف کشیدگی‌سنج‌های ۲ و ۵ و ۸ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش تراز آب از ۱۸۸۰ (تراز آب فعلی) تا ۱۹۰۵ (تراز آب در حالت اشباع کامل) به تدریج فشار بلندکننده در سطوح تماس بلوک‌ها افزایش می‌یابد، که این امر ناشی از افزایش فشار هیدرولیکی حاصل از بالا رفتن تراز آب در مخزن سد پایین دست است. این امر در نهایت منجر به وقوع پدیده‌ی ریزش در دیواره‌های بالادست و پایین دست مغار نیروگاه در محدوده‌ی رینگ‌های دوم، سوم و چهارم ابزاربندی می‌شود. فشار وارده به سطوح درزه که از آن به‌عنوان فشار بلندکننده یاد می‌شود را می‌توان از رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد.

$$U = \gamma_w \cdot Z \cdot B \quad (2)$$

که در آن U فشار بالا برنده، γ_w وزن واحد حجم آب، Z ارتفاع ستون آب در خارج از فضای حفاری نسبت به درزه، و B پهنای درزه در محل تقاطع دو سطح است. طبق شکل ۹، با توجه به بالا بودن تراز آب زیرزمینی در دیواره‌ی بالادست مغار نیروگاه، میزان فشار بلندکننده در این بخش از مغار نسبت به دیواره‌ی پایین دست و نیز سقف مغار بیشتر است. با افزایش فشار بلندکننده در سطوح درزه‌ها افزایش فشار روی سیستم نگه‌داری اتفاق می‌افتد که این امر منجر به افزایش همگرایی در دیواره‌ها و افزایش در میزان جابه‌جایی بلوک‌ها می‌شود. لذا لازم است با اتخاذ تدابیر کنترلی قبل از وقوع ریزش آن را کنترل کرد. بدین‌منظور و با توجه به عدم کارایی

پانویس

1. univariate method.
2. multivariate method.
3. alternative univariate method.
4. uplift pressure.
5. penstock.
6. noise.

منابع

1. Cividini, A.; Jurina, L., and Gioda, G. "Some aspects of characterization problems in geomechanics", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **18**, pp. 487-503 (1981).
2. Oreste, P. "Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground con-

- structions”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**(1), pp. 7-21 (2005).
3. Sakurai, S., and Takeuchi, K. “Back-analysis of measured displacements of tunnels”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **16**(3), pp. 173-180 (1983).
 4. Giorda, G., and Locatelli, L. “Back-analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand”, *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **23**, pp. 1407-1425. (1999).
 5. Swoboda, G.; Ichikawa, Y.; Dong, Q.X., and Zaki, M. “Back-analysis of large geotechnical models”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **23**, pp. 1455-1472. (1999).
 6. Feng, X.T.; Zhao, H., and Li, S. “A new displacement back analysis to identify mechanical geomaterial parameters based on hybrid intelligent methodology”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **28**, pp. 1141-1165. (2004).
 7. Zhang, L.Q.; Yue, Z.Q.; Yang, Z.F.; Qi, J.X., and Liu, F.C. “A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling- Illustrated with a case study”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**(6), pp.639-649. (2006).
 8. Kaiser, P.K.; Zou, D. and Lang, P.A. “Stress determination by back analysis of excavation-induced stress changes: A case study”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **23**(3), pp. 185-200. (1990).
 9. Zou D, Kaiser PK. Determination of in situ stresses from excavation-induced stress changes. *Rock Mechanics and Rock Engineering* , **23** (3): 167-184. (1990).
 10. Ohkami T, and Swoboda G. Parameter identification of viscoelastic materials. *Journal of Computers and Geotechnics* ; **24** (4): 279-295. (1999).
 11. Mahnken R, Stein E. Parameter identification for viscoplastic models based on analytical derivatives of a least squares functional and stability investigations. *International Journal of Plasticity* ; **12**(4): 451- 479. (1995).
 12. Hisatake M, and Hieda Y. Three-dimensional back-analysis method for the mechanical parameters of the new ground ahead of a tunnel face. *Tunnling and Underground Space Technology* 2007. Article in press.
 13. Shang YJ, Cai JG, Hao WD, Wu XY, and Li SH. Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling. *Tunneling Underground Space Technology* ; **17** (4): 381-389. (2002).
 14. Pichler B, Lackner H, Mang HA. Back analysis of model parameters in geotechnical engineering by means of soft computing. *International journal for numerical methods in engineering* 2003; **57**. (1943-1978).
 15. Ledesma A, Gens A, and Alonso EE. Estimation of Parameters in Geotechnical Backanalysis- I. Maximum Likelihood Approach. *Computers and Geotechnics*. **18**, (1), p. 1-27. (1996).
 16. Jeon YS, Yang HS. Development of a back analysis algorithm using FLAC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, SINOROCK2004 Symposium ; **41** (3), 441-447. (2004).
 17. Tahmasebi E. Stability analysis and design of support system for Siah Bisheh pumped storage powerhouse cavern using numerical methods. MSc. Thesis, Tehran University, (1382).
 18. Rock support design caverns. Document number: SBP -400 -0000-06-GT-RT-001-B1. Lahmeyer- Iran Water and Power Resources Co. (2005).
 19. Fattahpour V. Stability analysis of Siah Bisheh pumped storage powerhouse cavern. MSc. Thesis, Tehran University. (1385).
 20. Engineering Report, Engineering Geology and Geotechnical Investigations- Phase II, Program (3), I, Lameyer and Moshanir. (1986).
 21. Basic civil design report. Document number: SBP -400 -0000-GE-CV-RP-001-BB. Lahmeyer- Iran Water and Power Resources Co. (2004).
 22. Sharifzade, M; Ghorbani, M; Nateghi, R, and Masoudi, R; Long term stability assessment of Siah Bisheh pumped storage powerhouse cavern under saturated condition. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, July 6 to 15. pp: 497-500. (2007).
 23. Itasca Consulting Group Inc. (2003). 3DEC (3 Dimensional Distinct Element code). Version 2.0. Minneapolis: ICG. (2003).

