نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هفتم، شماره چهاردهم، سال ۱۳۹۱، صفحه ۸۳ تا ۹۰
Vol. 7, No. 14, 2012, pp. 83-90

تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از داده‌های حاصل از ابزار دقیق

مهدی حسینی [*1]، احمد رضا افضل آقائی [2]

1- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین؛ meh_hosseini18@yahoo.com
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین؛ ahmadreza.afzal@yahoo.com

(دریافت12 اردیبهشت 1389، پذیرش 17 مهر 1390)

چکیده

برای طراحی و احداث حفریات زیرزمینی، تعیین تنش‌های برجا و خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ احاطه‌کننده فضای زیرزمینی ضروری است. بعضی از آزمایش‌ها برای تعیین این پارامترها انجام می‌شود. برای مثال می‌توان به آزمایش دیلاتومتری و آزمایش شکست هیدرولیکی اشاره کرد. این آزمایش‌ها معمولاً زمان‌بر و پرهزینه می باشند. همچنین در نتایج آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی پراکندگی محسوسی وجود دارد. این پراکندگی به علت ناهمگنی سنگ‌ها است. برای غلبه بر این مشکلات می‌توان از روش تحلیل برگشتی برای تعیین خصوصیات مکانیکی توده سنگ با استفاده از داده‌های رفتارسنجی استفاده کرد. تحلیل برگشتی به‌عنوان روشی که قابلیت کنترل پارامترهای سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن داشته باشد، بیان می‌شود. این روش به‌طور پیوسته در دهه اخیر استفاده شده است. در تحلیل برگشتی مسائل مکانیک سنگی، هدف اصلی تعیین تنش‌های اولیه، ثابت‌های مواد با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدانی است. تحلیل برگشتی ممکن است به دو صورت مستقیم و معکوس انجام گیرد. در این مقاله، روش مستقیم تحلیل برگشتی بر اساس الگوریتم جستجوی تک متغیره برای تعیین مدول الاستیسیته (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) در مغار نیروگاه سد سیاه بیشه استفاده شده است. تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقدار متوسط مدول الاستیسیته در قسمت لایه‌بندی و ملافیری به ترتیب 7/16 و 15 گیگا پاسکال و میانگین نسبت تنش افقی به قائم 1/325 است.

کلمات کلیدی

آنالیز برگشتی، الگوریتم جستجوی تک متغیره، FLAC3D.

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

شناخت تنش اولیه و خصوصیات مواد، نقش مهمی در شناخت رفتار و مدل‌سازی واقعی سازه‌های زیرزمینی ایفا دارد. تنش-های اولیه و ثابت‌های مواد می‌توانند با آزمایش‌های برجای متفاوتی تعیین شوند. هرچند مشخص است که نتایج این آزمایش‌ها به‌طور کلی به خاطر ناهمگنی توده‌سنگ‌های احاطه-کننده فضای زیرزمینی شامل داده‌های پراکنده‌ای است. این امر به این معنی است که مقادیر کسب شده از آزمایش‌های برجا نمی‌توانند به‌طور مستقیم به‌عنوان داده‌های ورودی در یک تحلیل استفاده شوند. برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از شیوه‌های رفتارنگاری، شیوه مناسبی خواهد بود. رفتارنگاری با کمک اندازه‌گیری جابجایی و به وسیله ابزارهایی مانند همگرایی‌سنج‌ها و کشیدگی‌سنج‌ها، به خاطر سهولت ابزاربندی و سادگی داده‌های کسب شده بسیار مناسب است[1].

در این تحقیق از الگوریتم جستجوی تک متغیره و نرم افزار FLAC3D برای تعیین مدول الاستیسیته (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) مغار نیروگاه سد سیاه بیشه استفاده شد.

2- تحلیل برگشتی

به‌طور معمول تحلیل برگشتی به‌عنوان روشی که قابلیت کنترل پارامترهای سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن داشته باشد، بیان می‌شود. این روش به طور پیوسته‌ای در دهه اخیر استفاده شده است [2].

در تحلیل برگشتی ابتدا مقادیر جابجایی‌ها، کرنش و در صورت لزوم تنش توسط ابزار مورد نظر محاسبه شده و سپس در یک مدل مکانیکی فرضی قرار داده می‌شود؛ در نهایت پارامترهای تنش اولیه، خواص مکانیکی و شرایط مرزی تعیین می‌شود. این روش، معکوس یک روش تحلیل معمولی است که درآن وضعیت نیروها و خواص مکانیکی به صورت داده‌های ورودی وارد می‌شوند تا این که جابجایی، تنش یا کرنش تعیین شود [3].

تحلیل برگشتی ممکن است به دو صورت مستقیم و معکوس انجام شود. در روش معکوس، فرمول‌سازی ریاضیاتی درست عکس تحلیل معمولی است. در این روش باید تعداد پارامترهای معلوم از مجهول بیشتر باشد به طوری که روش‌های بهینه‌سازی بتواند برای تعیین پارامترهای مجهول به کار رود. راه حل سریع محاسباتی از مزایای این روش است. روش مستقیم بر اساس تکرار و خطا و حداقل سازی تابع خطا انجام می‌شود. از مزایای این روش قابلیت کاربرد برای مسائل غیرخطی، بدون نیاز به پیش زمینه قوی ریاضیاتی است[1].

3- تحلیل برگشتی به شیوه مستقیم

روش تحلیل برگشتی به شیوه مستقیم براساس تکرار و حداقل نمودن تابع خطایی،تابع هدف، با رابطه 1 نشان داده شده است:

(1)

$$Error = \frac{\sum_{k=1}^{N}[u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^{N} u_k^*}$$

در این معادله u_k^* و u_k به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه k می‌باشند. N نیز تعداد نقاط اندازه‌گیری است. در این روش با انتخاب یک مقدار اولیه، (x_i)، تحلیل معمولی انجام می‌شود؛ سپس تابع هدف که با رابطه 1 تعریف شده است محاسبه می‌شود و همگرایی تابع هدف بررسی می‌شود. در صورت همگرایی، گام محاسباتی پایان می-یابد. در غیر این صورت مقدار جدید پارامتر مجهول با رابطه 2 تعریف می‌شود و دوباره تابع هدف و همگرایی آن بررسی می-شود. این کار تا همگرا شدن تابع هدف انجام می‌گیرد [1].

$$x_{i+1}=x_i+\lambda_i^* s_i \quad (2)$$

در این رابطه:

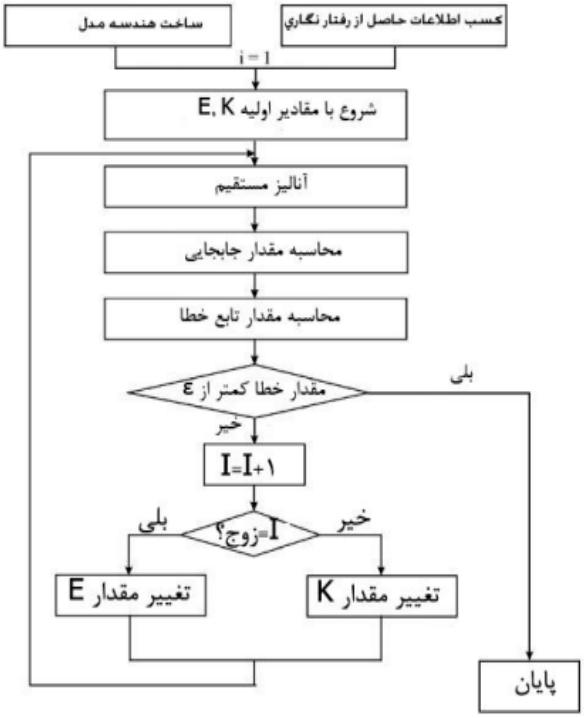
λ_i^*: طول گام محاسباتی

S_i: جهت جستجو

4- تکنیک بهینه‌سازی تک‌متغیره

برای همگرایی و جستجوی سریع تر، از تکنیک‌های بهینه‌سازی در روش جستجوی مستقیم استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها شامل روش تک‌متغیره، روش تک‌متغیره جایگزین و روش جستجوی الگویی است. روش تک متغیره و روش تک‌متغیره جایگزین مقدار پارامترهای مجهول را به‌طور موفقیت‌آمیزی جستجو می‌کند، در حالی که روش جستجویی الگویی در بعضی موارد با شکست مواجه می‌شود. در روش جستجوی تک‌متغیره تنها یک متغیر در یک زمان تغییر داده می‌شود و دیگر پارامترها ثابت می‌مانند. با شروع از نقطه x_i در گام تکرار iام و با ثابت در نظر گرفتن $n-1$ پارامتر باقیمانده مجهول، نقطه جدیدی برای پارامتر مجهول x، یعنی x_{i+1}، بدست می‌آید. سپس جستجو در جهت جدیدی انجام می‌شود. این جهت

جدید، با تغییر یکی از n -1 پارامتری که در مرحله قبل ثابت بود انجام می‌شود. جستجو با حرکت در هر یک از جهت‌ها انجام می‌شود. زمانی که جستجو در هر یک از n جهت انجام شد، اولین مرحله کلی جستجو پایان می‌یابد. این فرآیند کلی دوباره تکرار می‌شود. این عمل تا رسیدن تابع خطا به مقدار حدی ادامه می‌یابد. شکل 1 روش جستجوی تک متغیره را در صورتی که پارامترهای مجهول مدول الاستیسیته (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) باشد، نشان می‌دهد[1].



شکل1: روش جستجوی تک متغیره برای تعیین E و K [1]

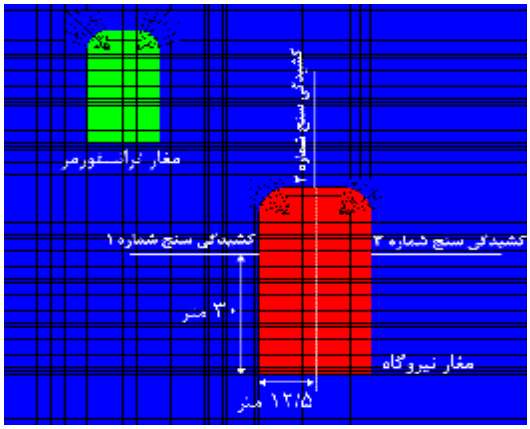
5- آنالیز برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

5- 1- مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر سد سیاه بیشه

مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با طول 130 متر، عرض 25 متر و ارتفاع 46/5 متر و مغار ترانسفورمر با طول 160 متر، عرض 16 متر و ارتفاع 26/5 جزء سازه‌های بزرگ زیرزمینی طرح سیاه-بیشه است. این دو مغار در عمق متوسط 250 متر زیر سطح زمین قرار دارند. محل قرارگیری دو مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر از لحاظ زمین‌شناسی، متعلق به دوره پرمین است و هر دو مغار در سازند درود قرار دارند. سازه‌های زیرزمینی سیاه بیشه در توده‌سنگ‌هایی که شامل تناوبی از شیل، ماسه سنگ کوارتزیتی و سنگ‌های آذرین است، قرار دارند[4].

5-2- مقاطع ابزار دقیق

ابزارهای دقیق در مغار نیروگاه سد سیاه بیشه در6 ایستگاه نصب شده است. یکی از این وسایل کشیدگی‌سنج‌های پنج نقطه‌ای می‌باشند. در این مقاله از نتایج قرائت کشیدگی‌سنج-های چهار ایستگاه استفاده شده است. ایستگاه ها در مقاطع 2، 3، 4 و 6 که به‌ترتیب در فاصله 48/7، 67/1، 86/7 و 120/5 متر از دهانه مغار نیروگاه قرار گرفته‌اند با آرایش نشان داده شده در شکل2 نصب شده‌اند [5].



شکل 2: محل نصب کشیدگی سنجهای استفاده شده در مغار نیروگاه نیروگاه برای تحلیل برگشتی در تمام مقاطع[5]

5-3- انتخاب روش عددی مناسب

می‌توان گفت که در بسیاری از موارد مدل‌سازی، اهمیت شناخت محیط‌های ناپیوسته و پیوسته تأثیر بسیار زیادی در فرآیند تحلیل مسأله خواهد گذاشت.

اگر تعداد ناپیوستگی‌های توده سنگ، 4 یا بیشتر باشد، رفتار آن از لحاظ مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری به صورت ایزوتروپیک خواهد بود و در این حالت می‌توان توده سنگ را معادل محیط پیوسته فرض کرد[6].

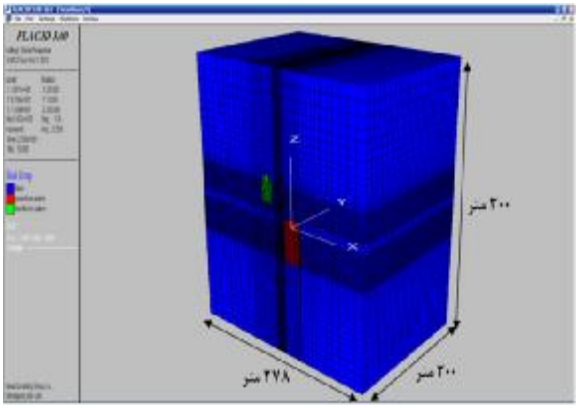
در چنین مواقعی روش تفاضل محدود و روش اجزا محدود مفید واقع خواهد شد. از آنجا که 6 ناپیوستگی در محیطی که مغار در آن حفر شده، وجود دارد، بنابراین باید از نرم افزاری که قادر به مدل‌سازی شرایط پیوسته باشد، استفاده کرد[7]. بدین منظور نرم افزار FLAC3D از مجموعه نرم افزارهای گروه ITASCA، انتخاب شد.

5-4- قسمت‌های مدل شده

در اکثر فضاهای زیرزمینی، فضای واقعی مغارها و اطراف آن اغلب شامل حفریات پیچیده‌ای است. به طوری که مدل‌سازی همه آن‌ها با در نظر گرفتن جزئیات، مشکل و در اغلب موارد نا-

ممکن است.

قسمت‌های مدل‌شده شامل مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر،4 شفت باس بار و 8 گالری اتصال‌دهنده شفت‌ها به مغارها است. در مدل‌سازی مغار نیروگاه تا حد امکان، سعی در مدل‌سازی دقیق مغارها شده است. قسمت باس بارها تا حدودی ساده-سازی شده است. برای این منظور مدلی با عرض 278 متر، ارتفاع 300 متر و طول 200 متر استفاده شد. همچنین مرکز مختصات در مرکز تاج مغار نیروگاه فرض شد. در شکل 3 نمای کلی مدل ساخته شده به همراه ابعاد مدل نشان داده شده است.



شکل 3: ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل

5-5- شرایط مرزی در مدل

در مرز بالایی مدل با توجه به ارتفاع پوشان‌سنگ، تنش q وارد گردید. مقدار q با رابطه 3 بیان می‌شود:

$$q=\rho\times g\times h_{upper} \qquad (3)$$

که در این فرمول، ρ جرم مخصوص متوسط روباره بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، g شتاب جاذبه و h_{upper} ارتفاع پوشان سنگ بر حسب متر می‌باشد. مرز پایین در جهت z و اطراف مدل نیز در جهت های x و y ثابت می‌شوند. عمق متوسطی که مغار نیروگاه در آن قرار دارد، برابر با 250 متر می‌باشد. متوسط چگالی سنگ های منطقه در حدود $2800kg/m^3$ می-باشد. از این رو مقدار تنش قائم برجا برابر با 7×10^6 -7 پاسکال، بر مدل اعمال می‌شود. میزان تنش های افقی نیز با توجه به رابطه 4 به مدل اعمال می‌شود. مقدار نسبت تنش افقی به قائم (k) در مراحل مختلف آنالیز برگشتی، تغییر داده می‌شود.

$$\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=k\sigma_{zz} \qquad (4)$$

5- 6- تعیین پارامترهای مجهول

برای اطمینان از یکتایی جواب آنالیز برگشتی و همچنین افزایش سرعت محاسبه، پارامترهای مجهول بر اساس قواعد زیر تعیین شدند:

- پارامترهایی انتخاب شده‌اند که بیشترین تأثیر را در جابجایی مواد تشکیل دهنده اطراف فضای زیرزمینی دارند.
- پارامترهایی انتخاب شوند که تعیین آنها به کمک روش‌های دیگر مشکل است.
- تا آنجا که ممکن است پارامترهای مجهول کمتری انتخاب شود[8].

5-7- مدل رفتاری

از آنجا که خصوصیات مواد در عمق متغیر است لازم است تا برای مقاطع مختلف، خصوصیات مختلفی در نظر گرفته شود. به جز در 30 متر انتهایی مغار نیروگاه که در سنگ‌های آذرین قرار دارد، در سایر قسمت ها توده سنگ اطراف مغار از لایه-هایی از مواد گوناگون تشکیل شده است. عمده این مواد شامل ماسه سنگ کوارتزیتی و شیل سرخ است. برای این قسمت‌ها از مدل موهر-کولمب استفاده شد. 30 متر انتهایی مغار نیروگاه شامل سنگ‌های آذرین بوده و با مدل الاستیک، مدل شد.

5-8- خصوصیات لایه ها

لایه‌های احاطه کننده مغار ها و باس بارها در قسمت لایه بندی شامل تناوب زیادی از شیل و ماسه سنگ می‌باشد. با اندکی ساده سازی، قسمت لایه بندی در اطراف مغار نیروگاه به صورت 7 لایه متناوب از ماسه سنگ و شیل مدل شد. در جدول 1 خصوصیات مواد تشکیل دهنده محیط اطراف مغارها و باس بارها آمده است.

جدول 1: خصوصیت لایه‌های مختلف در برگیرنده مغارها و باس بارها [7]

نوع سنگ / خصوصیات	ماسه سنگ کوارتزیتی	شیل قرمز	سنگ آذرین
چگالی (kg/m^3)	2810	2630	2900
مدول حجمی (GPa)	3/9	1/35	8/5
مدول برشی(GPa)	2/9	1/01	5/7
مقاومت فشاری(MPa)	100	60	100

ادامه جدول 1

چسبندگی (MPa)	18	12	18
زاویه اصطکاک داخلی(°)	50	40	50
مدول الاستیسیته (GPa)	14	2/43	7

5-9- انتخاب مقطع و نوع ابزار دقیق مناسب برای آنالیز برگشتی

با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج ابزار دقیق در 6 مقطع رفتار سنجی، می‌توان گفت که داده‌های ابزار دقیق نصب‌شده در اکثر مقاطع، برای استفاده در تحلیل برگشتی شرایط مناسبی را دارند. ولی از آنجا که حدود 30 متر انتهایی مغار نیروگاه در سنگ‌های آذرین (ملافیر) و بقیه در سنگ‌های لایه‌بندی (که تناوبی از شیل قرمز و ماسه سنگ کوارتزیتی می‌باشد) قرار دارند، بنابراین برای به‌دست آوردن مقادیر مدول الاستیسیته (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) مربوط به هر قسمت از مقاطع ابزار دقیق موجود در همان قسمت‌ها استفاده شد. بدین صورت که از مقاطع 2، 3 و 4 برای تعیین مدول الاستیسیته (E) مربوط به قسمت لایه‌بندی و از مقطع 6 برای تعیین مدول الاستیسیته (E) مربوط به قسمت آذرین استفاده گردید. همچنین از آنجا که داده‌های مربوط به همگرایی سنج‌ها به دلایلی از قبیل عدم دسترسی به همگرایی سنج، بتن ریزی و نصب پین همگرایی در نقطه دیگری به جای نقطه اولیه پیوستگی کاملی را نداشتند، بنابراین از جابجایی‌های نسبی کشیدگی‌سنج‌های نصب شده در دیواره ها و سقف مغار نیروگاه، نسبت به نقطه گیرداری 30 متری استفاده شد.

5- 10- انجام تحلیل برگشتی

نرم افزارهای متعدّدی در زمینه تحلیل عددی تنش-کرنش در اطراف حفریات زیرزمینی وجود دارند. بعضی از این نرم افزارها قادر به تحلیل دو بعدی و بعضی سه بعدی می‌باشند. در طرح سیاه‌بیشه از نرم‌افزارهای دو بعدی زیادی برای تحلیل عددی استفاده شده است. با این وجود تحلیل‌های سه بعدی با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات، کمتر انجام شده است. بنابراین نیاز به انجام تحلیلی سه بعدی احساس شد. در این تحقیق برای تحلیل برگشتی از روش جستجوی مستقیم و تکنیک بهینه-سازی تک متغیره برای تعیین مدول الاستیسیته و نسبت تنش افقی به قائم استفاده شد. روش تک‌متغیره در مواردی که تعداد پارامترهای مجهول کم و داده‌های مناسبی در اختیار باشند، بسیار مناسب است. همچنین روش تک‌متغیره مقدار بهینه پارامترهای مجهول را صرف نظر از مقدار اولیه محاسبه می‌کند. برای انجام تحلیل برگشتی، بلوک کلی، مغارها و باس بارها ساخته می‌شود. سپس شرایط مرزی بر مدل اعمال می‌شود. در حل اولین مدل از میانگین مدول الاستیسیته 7 لایه مدل‌شده در قسمت لایه‌بندی (که شامل تناوبی از ماسه سنگ کوارتزیتی و شیل قرمز است) و از متوسط مدول الاستیسیته‌ای که از نتایج آزمایش های برجا برای قسمت ملافیری اندازه‌گیری شده بود، به عنوان مقادیر اولیه استفاده شد. در نتیجه از مقدار 5 و 14 مگا پاسکال به ترتیب به عنوان مقادیر اولیه در تحلیل برگشتی برای قسمت لایه‌بندی و آذرین استفاده شد. مقدار اولیه نسبت تنش افقی به قائم نیز برابر 1/1 انتخاب شد. این مقدار نیز توسط مشاوران طرح با استفاده از آزمایش‌های برجا تعیین شده است.

سپس مدل قبل از حفاری حل می‌شود تا نیروهای نامتعادل‌کننده در مدل به تعادل برسد. برای تحلیل پایداری از معیار ساکورایی استفاده شده است و با تعیین کرنش بحرانی از رابطه ارائه شده توسط ساکورایی برای تراز هشدار2، ناپایداری سیستم محرز شده است(رابطه 5).

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 1.22 \qquad (5)$$

در این رابطه ε_{cr} کرنش بحرانی بر حسب درصد و E مدول الاستیسیته بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع است.

پس از آن سیستم نگهداری مدل می‌شود. سیستم نگهداری نصب شده شامل میل مهار، شاتکریت و تاندون‌ها می باشد که توسط مشاوران پروژه، طراحی و اجرا شده است. مشخصات شاتکریت، میل مهار و تاندون های مدل شده در نرم افزار به ترتیب در جداول 2، 3 و 4 ارائه شده است.

جدول2: خصوصیات شاتکریت به کار رفته در مغارها و اس بارها [9]

محل کاربرد / خصوصیات	مغار نیروگاه	مغار ترانسفورمر	باس بار
چگالی (Kg/m³)	2300	2300	2300
مدول الاستیسیته (GPa)	21	20	21
نسبت پواسون	0/2	0/2	0/2
مقاومت فشاری (MPa)	40	45	45

ادامه جدول 2

سختی برشی (GPa/m)	10	10	15
سختی نرمال (GPa/m)	10	10	15
ضخامت (m)	0/1	0/1	0/2

جدول3: خصوصیات میل مهار استفاده شده در مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر و باس بارها [9]

محل / کاربرد / خصوصیات	مغار نیروگاه	مغار ترانسفورمر	باس بار
طول (m)	5	5	6
مدول الاستیسیته (GPa)	200	200	200
قطر (mm)	25	25	25
مقاومت کششی حد تسلیم (MPa)	0/245	0/245	0/245
چسبندگی ملات (Pa)	$2/5\times10^9$	$3/7\times10^9$	$2/5\times10^9$
سختی ملات (N/m)	$2/7\times10^9$	2×10^9	$2/4\times10^9$
آرایش پیچ سنگ (m)	2×2	2×3	2×2

جدول 4: خصوصیات تاندون های استفاده شده در مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر و باس بارها [9]

محل کاربرد / خصوصیات	مغار نیروگاه		مغار ترانسفورمر
	دیواره ها	سقف	دیواره پایین دست
طول (متر)	20	15	15
قطر (میلیمتر)	47	47	26/5
مدول الاستیسیته (GPa)	200	200	200
ظرفیت کشش نهایی (KN)	890	890	300
سختی باند تزریق (GN/m/m)	6/03	6/03	6/41
مقاومت چسبندگی تزریق (MN/m)	3/77	3/77	2/01
آرایش (m)	4/2×3/5	3/5×3/5	2×2/4

در این مرحله قبل از حل مدل، دستور hist برای کنترل و ذخیره میزان جابجایی در نقاط کنترلی (نقاط ابتدا و انتهایی کشیدگی سنج ها) بکار گرفته می‌شود. بدین ترتیب بعد از حل مدل می‌توان میزان جابجایی نسبی میان نقاط کنترلی را تعیین نمود. بعد از این مرحله، مدل حل می‌شود. سپس در هر مقطع، جابجایی نسبی اندازه‌گیری شده بین نقاط کنترلی با میزان جابجایی نسبی حاصل از کشیدگی‌سنج‌ها مقایسه و میزان تابع خطا در هر مقطع اندازه‌گیری می‌شود. در صورت عدم رسیدن مقدار خطا به مقدار حدی، مرحله جدیدی از جستجو آغاز می-شود. روند جستجو همانند مراحل نشان داده شده در شکل 1 است. مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کشیدگی سنج ها در عمق 30 متر در جدول 5 و نتایج تحلیل برگشتی در مقطع 2 در جداول 6 آورده شده است. اعداد قرائت شده از کشیدگی‌سنج‌ها مربوط به بعد از نصب سیستم نگهداری در مغار نیروگاه است و مربوط به زمانی است که جابجایی ها با گذشت زمان تقریباً ثابت هستند. در فاصله ماه می 2008 تا ماه می 2009 این تغییرات ثابت است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد مقدار مدول الاستیسیته برای مقاطع 2، 3، 4 و 6 به ترتیب برابر با 7، 6/5، 8 و 15 گیگاپاسکال محاسبه گردید. مقدار نسبت تنش افقی به قائم نیز در همان مقاطع به ترتیب برابر با 1/3، 1/4، 1/3 و 1/3 محاسبه شد. از این رو می توان با متوسط‌گیری ریاضی مقدار مدول الاستیسیته را برای قسمت لایه‌بندی به‌دست آورد. این مقدار برابر با 7/16 گیگا پاسکال خواهد شد. مقدار مدول الاستیسیته محاسبه شده در مقطع 6 را (از آنجا که این مقطع به‌طور کامل در سنگ‌های آذرین قرار دارد) می‌توان به مدول الاستیسیته قسمت ملافیری (آذرین) در مغار نسبت داد. بنابراین این مقدار برابر با 15 گیگا پاسکال خواهد بود. مقدار نسبت تنش افقی به قائم را نیز می‌توان با محاسبه میانگین در همه مقاطع اندازه گیری نمود. این مقدار برابر با 1/325 خواهد بود. در مرحله بعد با استفاده از رابطه ساکورایی با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته بدست آمده از تحلیل برگشتی، کرنش بحرانی تعیین شد مقدار کرنش بحرانی برای قسمت لایه بندی 0/368 و برای قسمت ملافیری 0/306 درصد محاسبه می‌شود. در صورتی که کرنش شعاعی از روی نتایج قرائت شده از کشیدگی‌سنج‌ها و از رابطه 6 برای مقاطع 2، 3، 4 و 6 محاسبه شود می‌توان گفت که به دلیل آنکه کرنش شعاعی در تمام مقاطع و در تمام عمق‌ها کمتر از کرنش بحرانی است بنابراین

جدول 5: میزان جابجایی های نسبی اندازه گیری شده توسط کشیدگی سنج ها در مغار نیروگاه

		مقطع ابزار دقیق			
		2	3	4	6
جابجایی (میلیمتر)	کشیدگی سنج شماره 1	4	6	4	3
	کشیدگی سنج شماره 2	3	5	5	2
	کشیدگی سنج شماره 3	5	6	4	6

جدول 6: نتایج حاصل از تحلیل برگشتی در مقطع دوّم

	مقادیر مجهول		مقادیر اندازه گیری شده جابجایی در مدل (میلیمتر)			
مرتبه اجرا	E(GPa)	K	کشیدگی سنج شماره	کشیدگی سنج شماره 2	کشیدگی سنج شماره 3	مقدار خطا میلیمتر
1	5	1/1	6/5	5/2	7/1	0/95
2	6	1/1	6	4	6/5	0/60
3	6	1/2	5/7	4/5	6/2	0/54
4	6/5	1/2	5	3/7	6	0/20
5	6/5	1/3	4/5	4	5/5	0/125
6	7	1/3	4/3	3/5	5/2	0/03

مغار با سیستم نگهداری نصب‌شده پایداری مناسبی دارد.

$$\varepsilon_r=(U_2-U_1).100/\ L_{12} \qquad (6)$$

در رابطه 6، ε_r کرنش شعاعی، U_1 و U_2 مقادیر اندازه‌گیری شده جابجایی توسط کشیدگی‌سنج ها در نقاط اندازه گیری 1 و 2 و L_{12} فاصله میان این دو نقطه است.

6- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که:

الف) مقدار مدول الاستیسیته برای قسمت لایه‌بندی و قسمت ملافیری به ترتیب برابر با 7/16 و 15 گیگا پاسکال و نسبت تنش افقی به قائم 1/325 می باشد. این پارامترها به کمک آنالیز برگشتی مستقیم و تکنیک جستجوی تک متغیره با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار FLAC3D به دست آمده است.

ب) تحلیل پایداری به کمک نتایج قرائت شده از کشیدگی سنج‌ها و تکنیک کنترل مستقیم کرنش (با استفاده از رابطه ساکورایی) نشان می‌دهد که بر اساس سیستم نگهداری نصب شده، دیواره ها و سقف مغار پایداری مناسبی دارد.

همچنین پیشنهاد می‌شود تحلیل دینامیکی مغارها تحت بارگذاری زلزله برای اطمینان از پایداری آنها نیز انجام شود.

منابع

[1] Sakurai, s., Takeuchi, K.; 1983; "*Back analysis of measured displacements of tunnels*"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Engineering; pp. 173-180.

[2] Jeon, Y.S., Yang, H.S.; 2004; "*Development of a back analysis algorithm using Flac*"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Science; Vol 41, No. 3.

[3] طاهری، سعید؛ فاروق حسینی، محمد؛ (1382)؛ "**تحلیل برگشتی در سازه‌های زیرزمینی (مطالعه موردی لوارک)**"، ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

[4] Lahmeyer international and Moshanir Co.; 1986; *Reoprt of engineering geology and geotechnical investigation*; Phase II, Program No. 3,

volume I.

[5] گروه ژئوتکنیک شرکت مشانیر، (1387)؛ **گزارشات روزانه رفتارسنجی مغار نیروگاه سیاه بیشه**.

[6] Hoek, E., Brown E.T.; 1982; *Underground Excavation in Rock*, Published for Mining and metallurgy by E & FN Spon, an imprint of Champman & Hall.

[7] Lahmeyer International Co.; 2005; *Basic design criteria report of Siah Bisheh pumped storage*.

[8] Zhang, L.Q., Yue Z.Q., Yang, Z.F., Qi, J.X., Liu, F.c.; 2005; "*A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling- illustrated with a case study*", Tunneling and Underground Space Technology, pp. 636-649.

[9] گروه ژئوتکنیک شرکت مشانیر؛ (1385)؛ **گزارشات نگهداری و نقشه های نهایی اجرایی طرح سیاه بیشه**.