

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف معدن

**تحلیل پایداری شیب مخزن بالادستی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به کمک روش**

**عددی (مطالعه موردی سد آزاد)**

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

هوشنگ گلباغی

اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده

دکتر محمد اسماعیل نیا عمران

استاد مشاور:

مهندس محمدرضا شاهرودیلو

زمستان ۹۲

تقدیم به

پدر و مادرم که صبر و مهرشان بی‌موردن راه را برایم آسان می‌نماید

و

برادر و خواهرم که عشق به آن‌ها امید بخش راهم می‌باشد.

## تقدیر و تشکر

حمد و سپاس بی‌پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد الطاف بی‌کران الهی، مقطعی از دوران تحصیل به پایان می‌رسد بر خود لازم می‌دانم از تمامی کسانی که مرا در این امر یاری دادند تشکر و قدردانی نمایم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر علی مرادزاده و جناب آقای دکتر محمد اسماعیل نیا عمران و همچنین استاد مشاور جناب آقای مهندس محمد رضا شاهرودیلو کمال تشکر و امتنان را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب هوشنگ گلباغی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: تحلیل پایداری شیب مخزن بالادستی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به کمک روش عددی (مطالعه موردی سد آزاد) تحت راهنمایی آقایان دکتر علی مرادزاده و دکتر محمد اسماعیل نیا عمران

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

برای تحلیل، طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده‌سنگ‌ها ساخته می‌شوند، نیازمند درک صحیح ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ از قبیل مقاومت، تغییرشکل‌پذیری، چسپندگی و زاویه اصطکاک داخلی هستیم.

در این تحقیق ابتدا با توجه به وجود دسته درزه‌های متعدد در ساختگاه مخزن بالادست نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای سد آزاد و همچنین هندسه شیب نواحی مختلف شیروانی، انواع شکست‌های احتمالی در مخزن تشخیص داده شده است. سپس داده‌های ابزار دقیق موجود در ناحیه شمال شرق مخزن (ناحیه گسله با طولی در حدود ۴۰۰ متر) مورد بررسی قرار گرفته و نیز با بهره‌گیری از تکنیک تحلیل برگشتی و با استفاده از نرم افزار FLAC 2D، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ از قبیل مدول تغییرشکل، چسپندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین گردید که به ترتیب مقادیر حاصل از آن‌ها ۱ گیگاپاسکال، ۱۲۷ کیلوپاسکال و ۳۵ درجه تعیین گردید. از پارامترهای مقاومتی که با انجام تحلیل برگشتی بدست آمده‌اند، می‌توان به عنوان پارامترهای ورودی جهت تحلیل پایداری، طراحی بهینه سیستم نگهداری، تعیین ایمنی سیستم نگهداری و غیره استفاده کرد. در مرحله بعد، از روش تحلیلی جهت ارزیابی خطر لرزه خیزی منطقه استفاده شده است که با توجه به تحلیل صورت گرفته گسل گرگینه با بزرگی ۷/۳ در مقیاس ریشتر به عنوان خطرناک‌ترین گسل موجود در محدوده مورد مطالعه شناخته شد. در نهایت با تحلیل دینامیکی مخزن مذکور، جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در

نقاط مختلف شیروانی در اثر وقوع زلزله محتمل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد که در قسمت شمال شرقی مخزن بالادست (زون گسله، که بحرانی ترین زون در محدوده مخزن می‌باشد) جابجایی افقی در راستای عمود بر سینه کار شیروانی در نقاط بحرانی از جمله پله دوم به ۲۰ سانتی‌متر و جابجایی در راستای قائم به ۵ سانتی‌متر می‌رسد و نیز با بررسی نمودار حاصل از کرنش برشی در برخی نقاط از جمله پله دوم، مقدار کرنش ۰/۰۶ را داریم، که با توجه به این نتایج در برخی از نقاط مخزن، ناپایداری خواهیم داشت.

**واژگان کلیدی:** پایداری شیب، روش عددی، تحلیل برگشتی، تحلیل دینامیکی، مخزن بالادست

سد آزاد

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- " تحلیل پایداری مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد با استفاده از تصاویر استریوگرافیک"، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، آبان ۱۳۹۲.
- ۲- " بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و طبقه‌بندی توده‌سنگ مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد"، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، دانشگاه ساری، بهمن ۱۳۹۲.
- ۳- " ارزیابی خطر لرزه‌خیزی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای سد آزاد"، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، دانشگاه تبریز، بهمن ۱۳۹۲.



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات .....
۲	۱-۱- مقدمه .....
۳	۲-۱- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق .....
۷	۳-۱- بیان مساله و سوالهای اصلی تحقیق .....
۸	۴-۱- اهداف تحقیق و روش انجام کار .....
۹	۵-۱- ساختار پایان نامه .....
۱۱	۲- فصل دوم: معرفی ساختگاه و شرایط زمین شناسی مهندسی مخزن .....
۱۲	۱-۲- مقدمه .....
۱۲	۲-۲- موقعیت سد و نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد .....
۱۳	۳-۲- معرفی طرح .....
۱۴	۴-۲- زمین شناسی .....
۱۵	۲-۴-۱- زمین شناسی مهندسی .....

- ۱۸ ..... ۲-۴-۲- بلوک بندی مخزن بالادست
- ۱۹ ..... ۳-۴-۲- آزمایشات مکانیک سنگی
- ۲۰ ..... ۴-۴-۲- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ
- ۲۱ ..... ۵-۲- طبقه بندی مهندسی توده سنگ
- ۲۵ ..... ۳- فصل سوم: تحلیل پایداری سینماتیکی بلوک‌های سنگی اطراف مخزن
- ۲۶ ..... ۱-۳- مقدمه
- ۲۶ ..... ۲-۳- تشخیص نوع شکست با استفاده از تصاویر استریوگرافیک
- ۲۸ ..... ۱-۲-۳- بررسی پتانسیل گسیختگی های صفحه‌ای
- ۲۹ ..... ۲-۲-۳- بررسی پتانسیل گسیختگی های گوه‌ای
- ۲۹ ..... ۳-۲-۳- بررسی پتانسیل گسیختگی های واژگونی
- ۳۰ ..... ۳-۳- تحلیل سینماتیکی دیواره مخزن
- ۳۱ ..... ۱-۳-۳- تحلیل سینماتیکی بلوک ۴
- ۳۲ ..... ۲-۳-۳- تحلیل سینماتیکی بلوک ۶
- ۳۵ ..... ۴- فصل چهارم: رفتارنگاری داده‌های ابزار دقیق و تحلیل برگشتی
- ۳۶ ..... ۱-۴- مقدمه
- ۳۷ ..... ۲-۴- تحلیل برگشتی و تحلیل عادی
- ۳۹ ..... ۳-۴- روش های بهینه سازی
- ۴۰ ..... ۱-۳-۴- الگوریتم بهینه سازی دقیق
- ۴۱ ..... ۲-۳-۴- روش الگوریتم جستجوی تک متغیره مستقیم

- ۴-۴- مدلسازی عددی در حل مسائل ژئومکانیک ..... ۴۲
- ۴-۴-۱- معرفی نرم افزار FLAC ..... ۴۵
- ۴-۴-۵- پارامترهای مورد سنجش در رفتارنگاری ..... ۴۶
- ۴-۴-۱- ابزارهای نصب شده در مخزن ..... ۴۷
- ۴-۴-۲- تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از کشیدگی سنجها ..... ۴۹
- ۴-۴-۶- مدلسازی مخزن بالادست ..... ۵۱
- ۴-۴-۱- تعیین ابعاد مدل و ترسیم هندسه آن ..... ۵۱
- ۴-۴-۲- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری ..... ۵۴
- ۴-۴-۳- مقایسه نتایج ابزاردقیق با مدلسازی عددی ..... ۶۱
- ۴-۴-۴- انتخاب پارامترهای معلوم و مجهول برای انجام تحلیل برگشتی ..... ۶۱
- ۴-۴-۷- روش کار ..... ۶۲
- ۴-۴-۱- تحلیل برگشتی دو بعدی با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره ..... ۶۵
- ۴-۴-۲- نمودار خطای همگرایی پارامترها ..... ۶۵
- ۴-۴-۸- نتیجه گیری ..... ۶۹
- ۵- فصل پنجم: تحلیل دینامیکی مخزن بالادست سد آزاد ..... ۷۱
- ۵-۱- مقدمه ..... ۷۲
- ۵-۲- مشخصات لرزه ای ساختگاه مخزن بالادست ..... ۷۲
- ۵-۲-۱- گسل های مهم مولد زلزله در گستره طرح ..... ۷۴
- ۵-۳- ارزیابی خطر لرزه خیزی با استفاده از روش تحلیلی ..... ۷۴

- ۷۵ ..... ۱-۳-۵- رابطه بین بزرگی زمین لرزه و طول گسل
- ۷۶ ..... ۲-۳-۵- برآورد بیشینه شتاب در اثر جنبش گسل‌ها
- ۷۷ ..... ۴-۵- برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین
- ۷۸ ..... ۵-۵- تعیین طیف پاسخ طرح و انتخاب شتاب نگاشت‌ها
- ۸۰ ..... ۶-۵- تحلیل دینامیکی ساختگاه مخزن با استفاده از روش عددی
- ۸۰ ..... ۱-۶-۵- تدوین تاریخچه زمانی زلزله‌های سطوح طراحی
- ۸۰ ..... ۲-۶-۵- اصلاح شتاب‌نگاشت‌های سطوح طراحی لرزه‌ای
- ۸۲ ..... ۳-۶-۵- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی
- ۸۴ ..... ۴-۶-۵- میرایی
- ۸۵ ..... ۵-۶-۵- پاسخ دینامیکی مخزن به زلزله سطح طراحی MCL
- ۹۰ ..... ۷-۵- نتیجه‌گیری
- ۹۱ ..... ۶- فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات
- ۹۲ ..... ۱-۶- نتیجه‌گیری
- ۹۳ ..... ۲-۶- پیشنهادات
- ۹۵ ..... منابع
- ۱۰۰ ..... پیوست الف
- ۱۰۶ ..... پیوست ب

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۲	شکل ۱-۲- موقعیت جغرافیایی سد آزاد و راه‌های دسترسی به آن
۱۳	شکل ۲-۲: موقعیت قرارگیری مخزن بالا دست و پایین دست
۱۴	شکل ۳-۲: تصویری از مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد
۱۶	شکل ۴-۲: نمایی از محدوده گسل F2
۱۸	شکل ۵-۲: تصویر استریوگرافیک سطوح ناپیوستگی در محدوده مخزن
۱۹	شکل ۶-۲: بلوک بندی مخزن بالادست
۲۲	شکل ۷-۲: انتخاب GSI در نرم افزار Roclab
۲۸	شکل ۱-۳: محدوده گسیختگی صفحه‌ای
۲۹	شکل ۲-۳: ناحیه زرد رنگ محدوده گسیختگی گوه‌ای
۳۰	شکل ۳-۳: محدوده گسیختگی واژگونی
۳۱	شکل ۴-۳: تحلیل شکست صفحه‌ای بلوک ۴
۳۱	شکل ۵-۳: تحلیل شکست گوه‌ای بلوک ۴
۳۲	شکل ۶-۳: تحلیل شکست واژگونی بلوک ۴

- شکل ۳-۷: تحلیل شکست صفحه‌ای بلوک ۶..... ۳۲
- شکل ۳-۸: تحلیل شکست گوه‌ای بلوک ۶..... ۳۳
- شکل ۳-۹: تحلیل شکست واژگونی بلوک ۶..... ۳۳
- شکل ۴-۱: مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی ..... ۳۹
- شکل ۴-۲: مطابقت روش‌های عددی مختلف برای یک حفاری در توده سنگ: ..... ۴۳
- شکل ۴-۳: ابزار دقیق‌های نصب شده در مخزن بالادست..... ۴۸
- شکل ۴-۴: جابجایی‌های ثابت شده توسط کشیدگی سنج شماره ۱ ..... ۵۰
- شکل ۴-۵: جابجایی‌های ثابت شده توسط کشیدگی سنج شماره ۲..... ۵۱
- شکل ۴-۶: مدل دوبعدی مخزن بالادست قبل از حفاری در امتداد پروفیل AA شکل ..... ۵۳
- شکل ۴-۷: نمودار نیروهای نامتعادل در پایداری اولیه مدل ..... ۵۴
- شکل ۴-۸: مدل دوبعدی حفر ۳ متر اول مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت ..... ۵۶
- شکل ۴-۹: مدل دوبعدی حفر ۶ متر اول مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: نمودار نیروهای نامتعادل کننده در دو گام اول حفاری (۶ متری) ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۱: مدل دوبعدی مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۲: نمایی از بلوک ۴ (قسمت شمال شرقی مخزن)..... ۶۰
- شکل ۴-۱۳: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۱ متری اکستنسومتر ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۴: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۳ متری اکستنسومتر ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۵: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۷ متری اکستنسومتر ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۶: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۱۲ متری اکستنسومتر ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۷: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف مدول الاستیسیته ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۸: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۹: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف چسبندگی ..... ۶۸

- شکل ۵-۱: نقشه شدت خطرات زلزله غرب و شمال غرب ایران همراه با محدوده مورد مطالعه: ۷۳
- شکل ۵-۲: شتاب نگاشت سازگار با شرایط ساختگاه مخزن ..... ۷۹
- شکل ۵-۳: تاریخچه زمانی سرعت ناشی از شتاب نگاشت حاصل از تحلیل ساختگاه ..... ۸۱
- شکل ۵-۴: شتاب نگاشت اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه‌ای MCL ..... ۸۱
- شکل ۵-۵: تاریخچه زمانی سرعت اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه‌ای MCL ..... ۸۲
- شکل ۵-۶: تاریخچه زمانی جابجایی اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه‌ای MCL ..... ۸۲
- شکل ۵-۷: شبیه سازی ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های سطحی همراه با مرزهای آزاد ..... ۸۳
- شکل ۵-۸: مدل مورد نظر مخزن جهت انجام تحلیل دینامیکی ..... ۸۶
- شکل ۵-۹: جابجایی افقی مخزن تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۰: جابجایی قائم مخزن تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله ..... ۸۸
- شکل ۵-۱۱: کرنش برشی ایجاد شده در مدل تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله ..... ۸۹

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۷.....	جدول ۱-۲ ناپیوستگی‌های موجود در مخزن بالادست .....
۲۰.....	جدول ۲-۲- مقاومت فشاری در بلوک‌های مختلف مخزن:.....
۲۱.....	جدول ۳-۲- تعیین $m_i$ و GSI توده سنگ در نواحی مختلف مخزن.....
۲۳.....	جدول ۴-۲- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ:.....
۲۷.....	جدول ۱-۳- تعیین نوع شکست با استفاده از مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها و دیواره.....
۲۷.....	جدول ۲-۳- شیب دیواره در نواحی مختلف مخزن.....
۳۴.....	جدول ۳-۳- بررسی انواع شکست در بلوک‌های مختلف مخزن.....
۴۹.....	جدول ۱-۴- مشخصات بارسنج‌های نصب شده در مخزن.....
۴۹.....	جدول ۲-۴- مشخصات کشیدگی سنج‌های نصب شده در مخزن.....
۵۲.....	جدول ۳-۴- پارامترهای مورد نیاز جهت مدل‌سازی.....
۵۵.....	جدول ۴-۴- خصوصیات شاکریت در بلوک‌های ۴ و ۶.....
۵۵.....	جدول ۵-۴- خصوصیات بولت در بلوک‌های ۴ و ۶.....
۶۲.....	جدول ۶-۴- محدوده پارامترهای مجهول توده سنگ مخزن.....
۶۳.....	جدول ۷-۴- پارامترهای ژئومکانیکی در نظر گرفته شده برای یکی از تحلیل‌ها.....
۶۶.....	جدول ۸-۴- خطای ناشی از مدل‌سازی در مدول الاستیسیته‌های مختلف.....
۶۷.....	جدول ۹-۴- خطای ناشی از مدل‌سازی در زاویه اصطکاک‌های مختلف.....



- جدول ۴-۱۰- خطای ناشی از مدل‌سازی در چسبندگی‌های مختلف..... ۶۸
- جدول ۴-۱۱- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ حاصل از تحلیل برگشتی و طبقه بندی GSI بلوک..... ۶۹
- جدول ۵-۱- مشخصات گسل‌های اصلی..... ۷۳
- جدول ۵-۲- مشخصات گسل‌های فرعی..... ۷۳
- جدول ۵-۳- رابطه بین بزرگی (Ms) زمین لرزه و طول گسل (L)..... ۷۴
- جدول ۵-۴- مقادیر بزرگی زمین لرزه احتمالی با استفاده از روابط تجربی..... ۷۵
- جدول ۵-۵- مقادیر بزرگی شتاب با استفاده از روابط تجربی..... ۷۶
- جدول ۵-۶- بیشینه مقادیر شتاب زمین (PGA) برای سطوح طراحی لرزه‌ای مختلف..... ۷۷
- جدول ۵-۷- شتابنگاشت‌های انتخاب شده برای سطوح مختلف در طراحی لرزه‌ای مخزن..... ۷۸
- جدول ۵-۸- مشخصات حرکات نیرومند زمین در شتابنگاشت حاصل از تحلیل آبرفت ساختگاه..... ۷۹
- جدول ۵-۹- پارامترهای مورد نیاز جهت اعمال تنش برشی ناشی از نیروی زلزله به مدل..... ۸۴

# فصل اول

کلیات

مصرف انرژی برق از سوی مردم در ساعات مختلف شبانه روز میزان ثابت و یکسانی ندارد معمولاً این میزان در ساعات نخست شب در حالت حداکثر می‌باشد. احداث نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تنظیم بار شبکه‌ی سراسری برق به‌شمار می‌آید. این نیروگاه‌ها در عین تولید برق، توانایی متعادل کردن میزان مصرف در زمان پربار و کم‌بار را دارند. به‌طوریکه قادرند مقداری از انرژی اضافه را که توسط سایر نیروگاه‌ها در زمان کم مصرف تولید شده به زمان‌های اوج مصرف منتقل کنند، به این ترتیب این نیروگاه‌ها به گونه‌ای خاص انرژی برق را ذخیره می‌کنند.

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دست کم از دو مخزن در دو تراز ارتفاعی مختلف برخوردارند که یکی در تراز بالاتر و دیگری در تراز پایین‌تر قرار دارند. روش کار آنها به گونه‌ای است که در زمان کم مصرف از انرژی اضافه‌ی موجود در شبکه برای پمپاژ آب ذخیره شده از مخزن پایین به سمت مخزن بالا بهره می‌گیرند، تا انرژی آب به صورت پتانسیل برای زمان‌های پرمصرف در مخزن بالاذخیره شود. زمانی که میزان مصرف بیشتر از توان تولیدی نیروگاه‌های شبکه سراسری باشد توربین‌های این نیروگاه‌ها با رهاسازی آب ذخیره شده از دریاچه‌ی بالا فعال می‌شوند تا پتانسیل ذخیره شده آب تبدیل به انرژی الکتریکی شود.

مخزن بالا دست نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد با طول پیرامونی ۲۱۰۰ متر و دو ترانشه ۱۲/۵ متری در توده سنگ از جنس ماسه سنگ (متاسندستون<sup>۱</sup>) قرار دارد. این مخزن با حجم حدود ۲/۷ میلیون متر مکعب در تراز ۱۸۷۵ تا ۱۹۰۰ قرار دارد و در نوع خود اولین تجربه مخزن درون توده سنگ در ایران است (مهاب قدس، ۱۳۹۰). قرار گرفتن بخشی از مخزن در زون های گسله با طولی حدود ۴۰۰ متر و ویژگی‌های هندسی این مخزن و همچنین بدلیل این که در زمان عملیاتی شدن، این مخزن بطور روزانه یکبار با آب پر و خالی می شود ضرورت تحقیق و توجه دقیق به ارزیابی و تحلیل پایداری

<sup>۱</sup> Meta Sandstone

این سازه مهم را روشن می نماید. همچنین مشرف بودن مخزن بر روستای واقع در بخش جنوبی آن، بر حساسیت ارزیابی و تحلیل پایداری این سازه سنگی منحصر به فرد می افزاید. ابزار دقیق های نصب شده در بخش های سست تر این مخزن شامل کشیدگی سنج و بار سنج می باشد، شیب ترانشه در غالب قسمت ها ۳ به ۱ و در بخش محدودی در سنگ های سست ۲ به ۱ اجرا شده است. تحکیمات موقت اجرا شده در این مرحله شامل شاتکریت (بتن پاشی) و راک بولت تمام تزریق می باشد.

## ۲-۱- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق

برای مطالعه پایداری شیب در شیروانی ها روش های مختلفی ارائه شده است که از جمله آنها می توان به تئوری بلوکی، استفاده از تصاویر استریوگرافیک، روش تعادل حدی، مدل سازی فیزیکی و مدل سازی عددی اشاره نمود (امامی میبیدی، ۱۳۸۶). تمامی این روش ها با در نظر گرفتن هندسه شیب و ساختارهای موجود در آن و پارامترهای اختصاصی دیگر سعی در تحلیل شیروانی مورد مطالعه دارند. از جمله روش هایی که در صورت تعریف دقیق پارامترهای رفتاری توده سنگ و مدل سازی مناسب، می تواند تحلیلی درست از شیروانی در اختیار قرار دهد، مدل سازی عددی می باشد. اما ابتدا باید با استفاده از روش های ساده تر دیگر دیدی اولیه نسبت به منطقه پیدا کرد و با توجه به پیوستگی یا ناپیوستگی محیط شیروانی، نسبت به انتخاب روش عددی مناسب جهت تحلیل شیروانی ها تصمیم گیری نمود. از نظر تئوری، انجام آزمایشات متعدد صحرایی بر روی بلوک هایی از توده سنگ درزه دار با اندازه های متفاوت امکان پذیر است. اما در عمل این مهم نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار است به همین دلیل در این راستا می توان جهت تخمین پارامترهای توده سنگ از نتایج آزمایشگاهی که از مغزه ها به دست آمده و روش های طبقه بندی توده سنگ از قبیل شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)<sup>۱</sup>، به منظور تخمین پارامترهای توده سنگ از قبیل مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک استفاده کرد (Marinos and Hoek, 2000). در بسیاری از موارد مدل سازی، اهمیت

---

<sup>۱</sup>. Geological Strength Index

شناخت محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تأثیر بسیار زیادی در فرآیند حل مسأله خواهد گذاشت، اگر تعداد ناپیوستگی‌های توده سنگ ۴ 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 (Hoek and Brown, 1982).

شرایط گوناگون زمین‌شناسی و طبیعت پیچیده توده‌سنگ‌ها، پیش‌بینی مدل‌سازی رفتار توده‌سنگ در طرح‌های ژئومکانیکی را از دیدگاه علمی و نظری مشکل می‌سازد. تعدد عوامل مؤثر بر رفتار توده‌سنگ و عدم شناخت قطعی آنها، لزوم ارزیابی رفتار واقعی آن را ایجاب می‌کند. بدین منظور با مشاهده اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای رفتاری توده‌سنگ با استفاده از اطلاعات حاصل از رفتارنگاری و همچنین استفاده از الگوریتم تحلیل برگشتی می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ را تعیین نمود. در مرحله اجرای پروژه، پارامترهای ژئومکانیکی را می‌توان با استفاده از آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی گوناگون تعیین کرد، اما این آزمایش‌ها منجر به یک سری عدم قطعیت می‌شود که ناشی از تغییر خصوصیات توده سنگ و خصوصیات مکانی آزمایش است بعلاوه برای تحلیل آزمایش‌های برجا نیز یک سری مشکلات وجود دارد که به علت خصوصیت ناهمگنی تنش و کرنش موجود در محل است که به سنگ اعمال می‌شود. از اینرو برای ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ، استفاده از روش تحلیل برگشتی پیشنهاد می‌گردد (Sakurai et al, 2001).

این روش به عنوان راهکاری که قابلیت کنترل پارامترهای سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن داشته باشد، بیان می‌شود (Sakurai and Takeuchi, 1983). تا کنون محققین مختلفی از این روش برای حل مسائل مربوط به پایداری و یا حفاری سازه‌های سنگی و یا آن‌هایی که در داخل خاک بنا می‌شوند، استفاده کرده‌اند که در ادامه به چند مورد مهم اشاره می‌شود.

آموزین و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۲) یک روش ساده برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه دادند که براساس تحلیل برگشتی با استفاده از تونل آزمایشی و اندازه‌گیری

---

<sup>1</sup>. Amusin, et al

تغییر شکل‌ها پارامترهای تجدیدنظر شده را تا دقت ۹۵٪ محاسبه کردند. فخمی و همکاران (۲۰۰۴)، از تحلیل برگشتی عددی برای تخمین پارامترهای خاک در تونل رسالت تهران استفاده نمودند. هدف اصلی این مطالعه، تخمین چسبندگی و تنش‌های افقی خاک بود. تحلیل برگشتی بوسیله تطابق دادن نتایج مدل سازی عددی با همگرایی اندازه گیری شده تونل انجام شد. بعلاوه نتایج آزمایشات برشی مستقیم برجا، بارگذاری صفحه ای و اندازه گیری فشار موجود و با نتایج بدست آمده از تحلیل برگشتی مقایسه و مشخص شد. این نشان داد که تحلیل برگشتی، در تعیین تنش‌های برجای افقی و چسبندگی خاک را با دقت خوبی ارائه می‌دهد. جیون و یانگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، به منظور دستیابی به مناسب ترین الگوریتم تحلیل برگشتی از میان روش های بهینه سازی، سه الگوریتم از روش های جستجوی مستقیم را به کار بردند و نشان دادند که روش تک متغیره و روش تک متغیره متناوب می توانند مقادیر بهینه پارامترها را صرف نظر از مقادیر اولیه آنها جستجو کنند، در صورتی روش جستجوی الگویی در برخی موارد با موفقیت همراه نیست. شانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) براساس داده‌های جمع آوری شده از پروژه‌های تونل و نتایج مدل سازی عددی، روش توسعه یافته برای تحلیل برگشتی تنش‌های برجا و مدول الاستیک توده‌سنگ اطراف تونل ارائه کردند که این تکنیک به طور گسترده برای تعیین خواص توده‌سنگ بر اساس اطلاعات به دست آمده از تغییر شکل‌ها در حین ساخت تونل‌ها و دیگر فضاهای زیرزمینی استفاده شده است. فینو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۸)، روش تحلیل برگشتی را برای شناسایی مجموعه پارامترهای ساختاری در شبیه سازی سیستم نگهداری حفريات عمیق شهری استفاده کردند. آن‌ها با کمینه کردن تابع هدف (حداقل مربعات وزنی) با دو الگوریتم گرادیان پایه و الگوریتم ژنتیک راه حل منحصر به فرد و بدون اشکالی را ارائه دادند و در مورد مزایا و معایب هر دو روش نیز بحث کردند. مهدوری و فتحی سلمی (۱۳۸۶)، برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان از روش تحلیل برگشتی به شیوه مستقیم استفاده کردند و

---

1. Yang and Jeon

2. Shang, et al

3. Finno, et al

همچنین برای کاهش اختلاف میان داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی از روش‌های کمترین مربعات و کمینه کردن تابع خطا بهره بردند. موریرا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۲)، برای تحلیل برگشتی ساخت یک نیروگاه جدید برق آبی در شمال پرتغال از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حفاری نیروگاه استفاده و عملکرد آن‌ها را برای مدل‌های الاستیک و الاستوپلاستیک مورد ارزیابی قرار دادند. یزدانی و همکاران (۲۰۱۲)، به تحلیل برگشتی داده‌های ابزار دقیق مغار نیروگاه سیاه بیشه با استفاده از روش مستقیم و مدل‌سازی در محیط پیوسته و ناپیوسته پرداختند و با مقایسه کردن پارامترهای حاصل از دو روش، نتایج را مورد بحث قرار دادند. شریف زاده و همکاران (۲۰۱۲)، جهت اصلاح سیستم نگهداری تونل شبلی از نتایج تحلیل برگشتی و مدل‌سازی عددی استفاده کردند. حسینی و افضل‌آقایی (۱۳۹۱)، به منظور تحلیل برگشتی داده‌های ابزار دقیق مغار نیروگاه سد سیاه بیشه از روش تحلیل برگشتی و الگوریتم جستجوی تک متغیره برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ استفاده کردند. همچنین به منظور ارزیابی خطر زلزله در هر محل روش‌های متعددی از قبیل تحلیلی و آماری وجود دارد، که مبانی نظری این روش‌ها متفاوت می‌باشد (برگی، ۱۳۸۲). به طور کلی بزرگی انرژی آزاد شده از زلزله، به طول گسیختگی گسل و حداکثر جابجایی آن ارتباط دارد و بر این اساس روابطی بین طول گسیختگی گسل و بزرگی آن وجود دارد که با استفاده از روابط تجربی بدست خواهد آمد. از دیدگاه مهندسی اهمیت زلزله‌ها به لحاظ تأثیراتی است که در سازه‌هایی نظیر سدها، نیروگاه‌ها، پل‌ها، خاکریزهای مناطق جنگلی، مناطق مسکونی و تأسیسات صنعتی ایجاد می‌نمایند و در اکثر موارد این سازه‌ها بر روی سطح زمین یعنی بر روی لایه‌های سنگ بستر بنا می‌شوند. همچنین این سازه‌ها غالباً در بالای محل گسل یا محل شروع و تولید امواج زلزله بنا نشده بلکه در فواصل مختلف نسبت به کانون زلزله قرار می‌گیرند. امواج زلزله با دور شدن از کانون آن و نیز با گذشتن از لایه‌های مختلف سنگی دچار تغییر و تحولاتی می‌شوند که عوامل مربوط به فاصله نقاط نسبت به کانون زلزله تحت عنوان تأثیر مسیر و عوامل مربوط به لایه‌های واقع بر سنگ بستر تحت عنوان تأثیر ساختگاه شناخته

---

<sup>1</sup>. Moreira, et al

می شوند (سقراط، ۱۳۹۰). هنگامی که یک گسل در زیر سطح زمین گسیخته می شود، امواج حجمی از منبع به تمام جهات منتشر می شوند. زمانی که این امواج به مرز بین مصالح مختلف زمین شناسی می رسند، منعکس و منکسر می شوند. در حالی که سرعت انتشار امواج در مصالح کم عمق تر عموماً کمتر از مصالح زیر آن ها است، اشعه های مایل که به مرز لایه افقی برخورد می نمایند معمولاً در جهتی عمودتر منعکس می شوند. زمانی که امواج مورد نظر به سطح زمین می رسند انکسارهای متعدد آن ها، سبب می شود که جهت آن ها تقریباً عمود بر سطح زمین باشد. هنگامی که این امواج به صورت عمود بر سطح زمین به لایه های سطحی برخورد می کنند خطرناک تر شده و آنالیز پاسخ ساختگاه نشان می دهد که این حرکات مخرب تر هستند. برای آنالیز پاسخ ساختگاه نسبت به حرکات ناشی از زلزله می توان مسئله را به صورت دو بعدی و سه بعدی در نظر گرفت. از مهمترین کاربردهای نظریه دینامیک سازه ها، تحلیل پاسخ سازه در برابر تکان های زمین به هنگام زلزله است (Gatmiri and Negugen, 2007).

با توجه به اینکه در زمان عملیاتی شدن، این مخزن بطور روزانه یکبار با آب پر و خالی می شود ضرورت تحقیق و توجه دقیق به ارزیابی و تحلیل پایداری این سازه مهم بیشتر ضرورت پیدا می کند. همچنین مشرف بودن مخزن بر روستای واقع در بخش جنوبی آن، بر حساسیت ارزیابی و تحلیل پایداری این سازه سنگی منحصر به فرد می افزاید.

### ۱-۳- بیان مساله و سوال های اصلی تحقیق

مخزن سنگی سد آزاد با توجه به مشخصات زمین شناسی و تکتونیکی و مشخصات و اهمیت سازه ای در توده سنگ های ماسه سنگی و یا دیگر سنگ هایی قرار گرفته است که رفتار ژئومکانیکی آن ها برای ما علی رغم اکتشافات و بررسی های انجام شده هنوز به درستی مشخص نمی باشد. علاوه بر آن وجود روستای مسکونی در بخش جنوبی این سازه مهم، اهمیت تحلیل و بررسی های همه جانبه برای پایداری این سازه مهم را که در شرف ساخت می باشد چند برابر می نماید لازم به ذکر است که تا



کنون حدود ۲/۴ میلیون متر مکعب این مخزن حفاری شده و به زودی عملیات حفاری بقیه آن به اتمام می‌رسد. به همین منظور با وجود مطالعات انجام شده در مورد ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ و به منظور کسب اطلاعات جامع تر برای ساخت آن یک سری ابزار دقیق شامل کشیدگی سنج و بارسنج در بخش‌های سست تر این سازه که در قسمت شمال شرقی این مخزن قرار گرفته‌اند، نصب شده است که از داده‌های حاصله از آن‌ها بایستی در تحلیل دقیق تر پایداری این مخزن استفاده شود. با توجه به موارد فوق سوالات تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

در این تحقیق هدف اصلی تحلیل پایداری ناحیه گسله‌ی مخزن می‌باشد، که مهمترین سوالاتی که در این زمینه مطرح است، عبارتند از:

- نوع شکست‌های احتمالی در نواحی مختلف مخزن چگونه است؟
- آیا نتایج مدل‌سازی عددی با اطلاعات حاصل از ابزار دقیق قابل ارزیابی می‌باشد؟
- خطر لرزه‌خیزی مخزن به چه صورت می‌باشد؟
- آیا مخزن در مقابل بارهای دینامیکی ناشی از وقوع زمین لرزه احتمالی پایدار خواهد ماند؟

#### ۴-۱- اهداف تحقیق و روش انجام کار

از اهداف این تحقیق می‌توان به تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با استفاده از روش تحلیل برگشتی و مقایسه آن با روش‌های رده بندی توده سنگ از قبیل GSI می‌باشد. همچنین بررسی رفتار سازه مورد نظر در برابر بارهای زلزله احتمالی با استفاده از روش‌های عددی نیز از دیگر اهداف مورد نظر می‌باشد.

جهت تحلیل پایداری اولیه مخزن از تحلیل سینماتیکی استفاده شده و سپس با استفاده از تحلیل برگشتی داده‌های ابزار دقیق، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در مخزن تعیین می‌شود در ادامه جهت ارزیابی خطر لرزه‌خیزی مخزن از روش تحلیلی استفاده می‌شود و در نهایت پایداری دینامیکی مخزن در برابر زلزله احتمالی به کمک مدل‌سازی عددی و استفاده از نرم افزار FLAC2D

(Itasca,2002) تحلیل خواهد شد.

## ۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل تدوین شده است. فصل اول شامل کلیاتی راجع به موضوع، هدف مطالعه و روش تحقیق می‌باشد و در فصل دوم نسبت به معرفی طرح، شرح زمین‌شناسی منطقه و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ اقدام می‌شود. در فصل سوم چگونگی تحلیل سینماتیکی سنگ‌های دیواره مخزن مورد بررسی قرار گرفته است و در فصل چهارم تحلیل برگشتی داده‌های ابزار دقیق با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره انجام می‌شود. در فصل پنجم ابتدا خطر لرزه‌خیزی مخزن با استفاده از روش تحلیلی انجام شده و در ادامه تحلیل دینامیکی ساختگاه مخزن در مقابل بارهای ناشی از زلزله با روش عددی صورت می‌گیرد. در نهایت در فصل ششم به اهم نتایج به دست آمده اشاره و پیشنهاداتی برای تکمیل کارهای آتی ارائه خواهد شد.



## فصل دوم

معرفی ساختگاه و شرایط زمین شناسی مهندسی

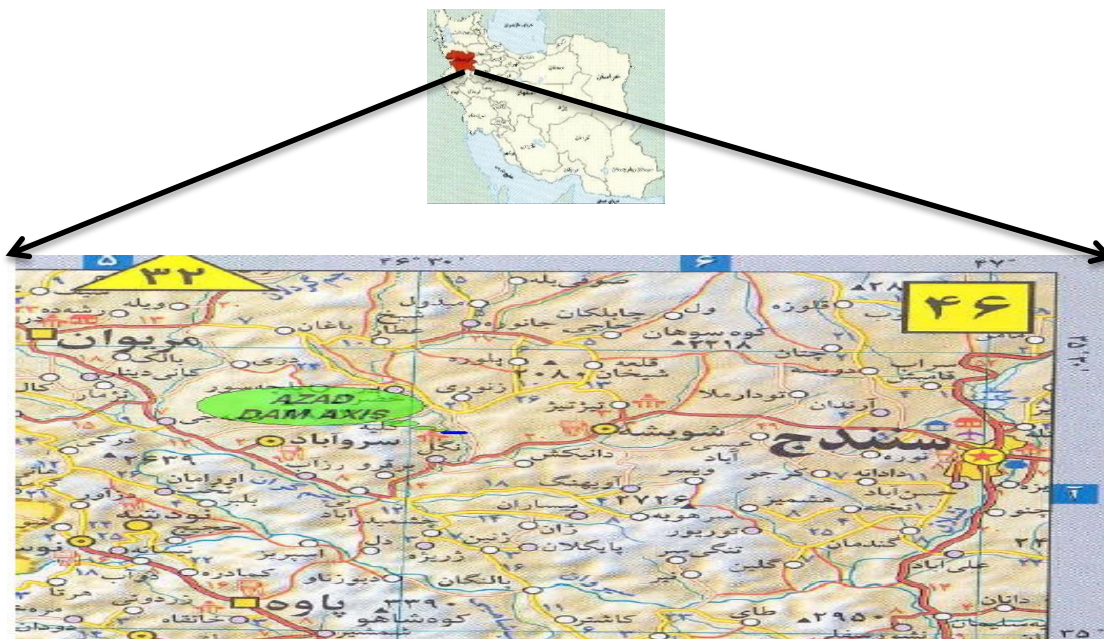
مخزن

## ۱-۲- مقدمه

در این فصل مطالب کلی راجع به معرفی طرح از جمله موقعیت سد ونیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد، زمین‌شناسی منطقه، بلوک‌بندی مخزن و طبقه‌بندی توده‌سنگ مخزن بالادست در بلوک‌های مختلف ارائه و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲-۲- موقعیت سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

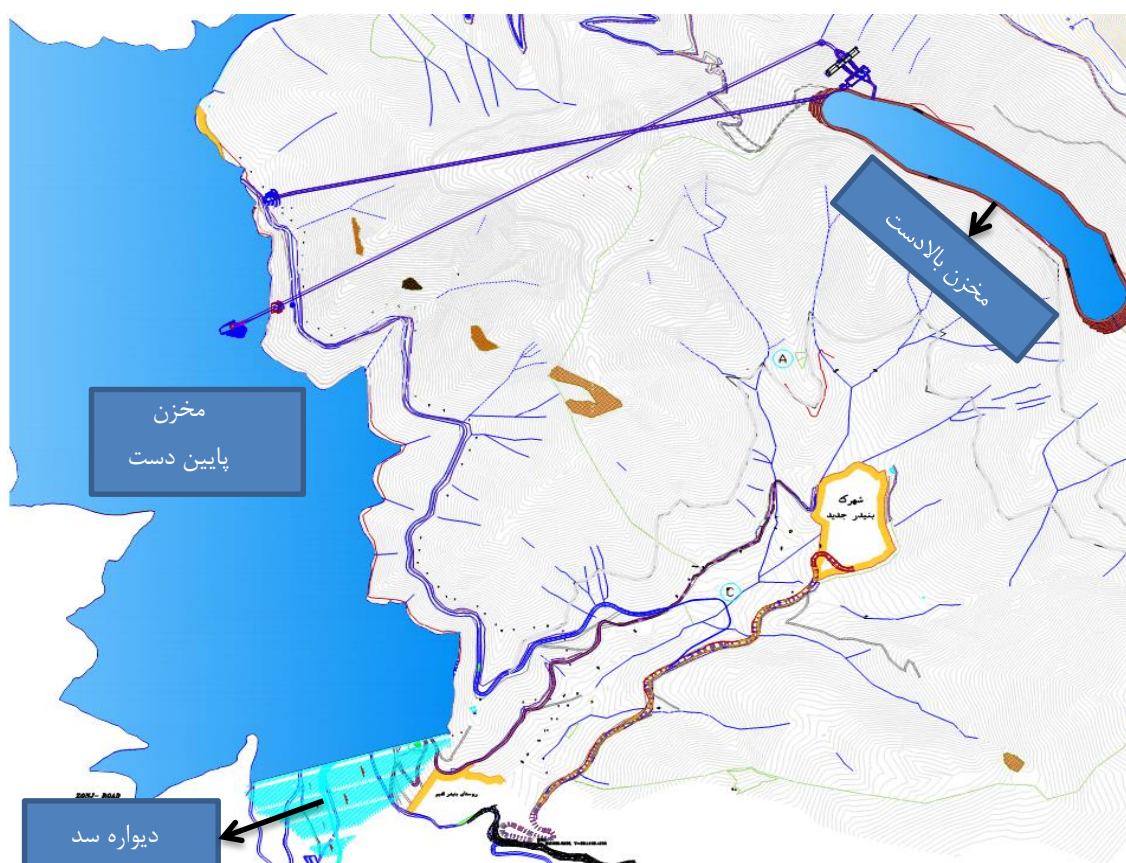
سد مخزنی آزاد، از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ظرفیتی در حدود ۳۰۰ میلیون متر مکعب به منظور کنترل سیلاب‌ها و تنظیم آبهای جاری، تأمین آب شرب و کشاورزی در استان کردستان بر روی رودخانه کوماسی از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان و در مجاورت روستای بنیدر از سال ۱۳۸۶ در دست احداث است. دسترسی به محل سد از طریق جاده اصلی سنندج به مریوان (۷۵ کیلومتر از سنندج) و پس از آن ۶ کیلومتر جاده اختصاصی روستای بنیدر صورت می‌گیرد. موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به سد مخزنی آزاد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نیز که در همین محدوده می‌باشد بر روی شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- موقعیت جغرافیایی سد آزاد و راههای دسترسی به آن (مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

## ۳-۲- معرفی طرح

برای تأمین بخشی از مصالح سنگی، معدن واقع در ۸ کیلومتری بالادست بدنه سد (مخزن پایین دست) به عنوان منبع قرضه در نظر گرفته شده است. استخراج از این معدن مطابق با طرح اولیه موجود برای دستیابی به دو منظور اصلی تأمین منابع قرضه مورد نیاز سد آزاد و استفاده از گودال (پیت) معدن به عنوان مخزن در یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای جهت تولید برق در زمان های اوج مصرف خواهد بود. نمایی از موقعیت قرارگیری مخزن بالادست و پایین دست (سد آزاد) در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. و همچنین تصویری واضح تر از مخزن بالادست در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: موقعیت قرارگیری مخزن بالا دست و پایین دست (مهاباد قدس، ۱۳۹۰)

مخزن بالا دست نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد با طول پیرامونی ۲۱۰۰ متر، عرضی در حدود ۱۰۰ متر و ارتفاع ۲۵ متر و حجم ۲/۷ میلیون متر مکعب است، که ارتفاع مذکور به صورت دو ترانشه ۱۲/۵

متری در توده سنگ از جنس ماسه سنگ قرار دارد. مخزن بالادست در فاصله ۸ کیلومتری سد (مخزن پایین دست) قرار گرفته و نسبت به آن ۴۰۰ متر اختلاف ارتفاع دارد.



شکل ۲-۳: تصویری از مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد(مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

## ۲-۴- زمین شناسی

محدوده مورد نظر در زون سنندج- سیرجان واقع شده است. این پهنه به صورت یک نوار دگرگون شده در امتداد و به موازات رورانندی زاگرس از ارومیه و سنندج در شمال غربی تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرقی کشیده شده است (درویش‌زاده، ۱۳۸۹). مشخصات رسوبگذاری در این پهنه مانند پهنه ایران مرکزی است ولی جهت و امتداد کلی آن از امتداد کلی زاگرس پیروی می کند. زون سنندج - سیرجان را می توان از ناحیه گلپایگان به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم بندی نمود. که منطقه مورد مطالعه در واحد شمالی این پهنه واقع شده است. به طور کلی پهنه سنندج- سیرجان جزو ناآرام ترین پهنه های ایران شناخته شده است. سنگ‌های چین خورده و دگرگون شده ناشی از

کوهزایی سیمرین پیشین، به وسیله ماسه سنگ و شیل تریاس فوقانی به طور دگرشیب پوشیده شده است. در این پهنه، دگرشیبی اصلی دوران مزوزوئیک و ترشیر، نظیر آنچه که در ایران مرکزی و البرز شناخته شده است، دیده می شود. سیستم شکستگی ها و گسل های آن که به حرکات کوهزایی کاتانگایی و سیمرین نسبت داده می شود، مانند ایران مرکزی بوده و جهت زاگرس را قطع می نماید و دگرگونی شدید سیمرین پسین در اواخر ژوراسیک، به ویژه در بخش شمالی پهنه سنندج- سیرجان مشاهده شده است. سنگ های کربناته کرتاسه زیرین (آپسین- آلبین) که توسط یک گنگلومرای قاعده ای به طور دگرشیب بر روی سنگهای قدیمتر شرق تراست زاگرس قرار دارند، حاکی از آن است که بخشهایی از بلوک سنندج- سیرجان تقریباً طی ۳۵ میلیون سال (ژوراسیک پایانی - کرتاسه زیرین) خارج از آب باقی مانده است (درویش زاده، ۱۳۸۹).

#### ۲-۴-۱- زمین شناسی مهندسی

همان گونه که در مبحث زمین شناسی ذکر شد، محدوده معدن قرضه برای مصالح لازم برای ساخت سد آزاد در ارتفاعات مشرف به دره قرار می گیرد. توده سنگهای محدود معدن سد آزاد از دیدگاه لیتولوژی شامل سنگهای رسوبی از نوع ماسه سنگ و کنگلومرا است. قسمت عمده معدن منبع قرضه در بخش ماسه سنگی و تنها بخش کوچکی از آن در توده سنگها شیلی و کنگلومرای قرار می گیرد (مهاب قدس، ۱۳۹۰).

#### الف- گسل های محدوده ساختگاه

از نقطه نظر گسلش و شرایط تکتونیکی منطقه، گسل های کرگینه و ساتیله به ترتیب از ۶/۲ و ۳۲ کیلومتری شرق و شمال شرقی محدوده مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد و گسل سرو آباد از ۲۳ کیلومتری جنوب مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد می گذرند. محدوده مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد تحت تاثیر فازهای کوهزایی و عملکرد تکتونیکی منطقه، دچار گسلش هایی شده است که شاخه هایی از آنها در محدوده مخزن عبور می نمایند، در مجموع ۱۰ گسل در محدوده مورد



مطالعه (مخزن بالادست) شناسایی شده است که این گسل‌ها بر اساس مشاهدات صحرائی و برمبنای تفاسیر داده‌های ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی در زیر توضیح داده شده است. برخی از گسل‌ها در بررسی‌های صحرائی جزء گسل‌های فرعی شناسایی شده‌اند که تأثیری در اجرای سازه مخزن نخواهند داشت، و از این رو از توصیف آنها صرف‌نظر شده است (آب نیرو، ۱۳۸۸).

این گسل‌ها بنام‌های F1 تا F10 نامگذاری شده‌اند. راستای گسل‌های F1، F2، F4 در جهت شمال غرب - جنوب شرق امتداد یافته‌اند و امتداد سایر گسل‌ها شمال شرق - جنوب غرب است. این گسل‌ها دارای زون خرد شده محدود (حداکثر یک متر) بوده و اغلب توسط نهشته‌های واریزه‌ای پوشیده شده‌اند. امتداد خطی این گسل‌ها تأثیراتی بر زمین ریخت شناسی منطقه طرح گذاشته است. نمایی از گسل F2 در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: نمایی از محدوده گسل F2 (مه‌اب قدس، ۱۳۹۰)

ب- درزه داری

در راستای بررسی وضعیت شکستگی‌های سطحی توده‌های سنگی در محل مخزن اطلاعات

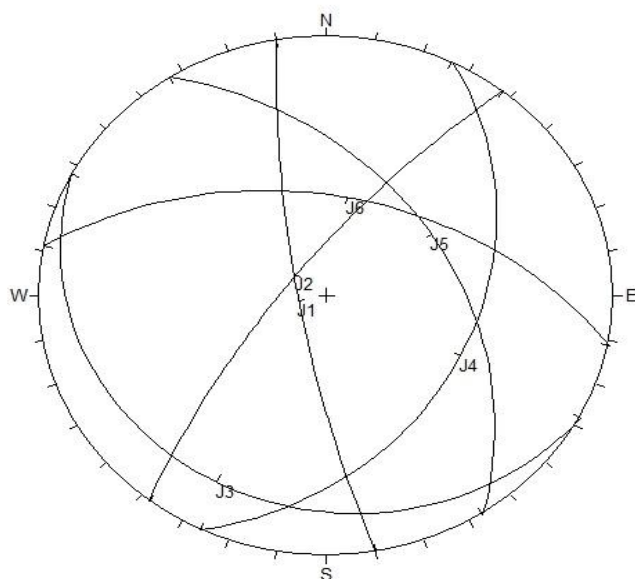
مربوط به سیستم درزه<sup>۱</sup>، سطوح لایه بندی و سطوح شیستوزیته، مشخصات سطح صفحات ناپیوستگی، مقدار باز شدگی<sup>۲</sup> فاصله داری<sup>۳</sup>، طول، مواد پرکننده و نیز کیفیت آب در درزه ها در ایستگاه‌های مختلفی در سطح زمین نیز قرائت و ثبت و سپس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. ناپیوستگی های موجود در توده سنگ معمولا عامل اصلی تعیین کننده رفتار آن می باشند(مهتاب قدس، ۱۳۹۰).

توده سنگ‌های تشکیل دهنده مخزن نیروگاه دارای شکستگی‌های متعددی با ویژگی‌های متفاوت می‌باشند. به منظور بررسی ویژگی هندسی ناپیوستگی ها، برداشت سیستم ناپیوستگی در سطح زمین و گمانه های اکتشافی به روش تصادفی و برداشت خطی انجام شده است. تحلیل داده ها نشان می‌دهد علاوه بر سطوح لایه بندی، ۶ دسته درزه اصلی در ساختگاه مخزن وجود دارد که مشخصات آنها در جدول ۱-۲ و تصاویر استریوگرافی هر کدام از آنها در شکل ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۲: مشخصات ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مخزن بالادست (مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

دسته درزه	شیب(درجه)	جهت شیب (درجه)
J <sub>1</sub>	۷۹	۲۶۰
J <sub>2</sub>	۷۵	۳۰۸
J <sub>3</sub>	۱۲	۲۰۸
J <sub>4</sub>	۳۵	۱۱۶
J <sub>5</sub>	۴۳	۵۷
J <sub>6</sub>	۴۸	۱۱

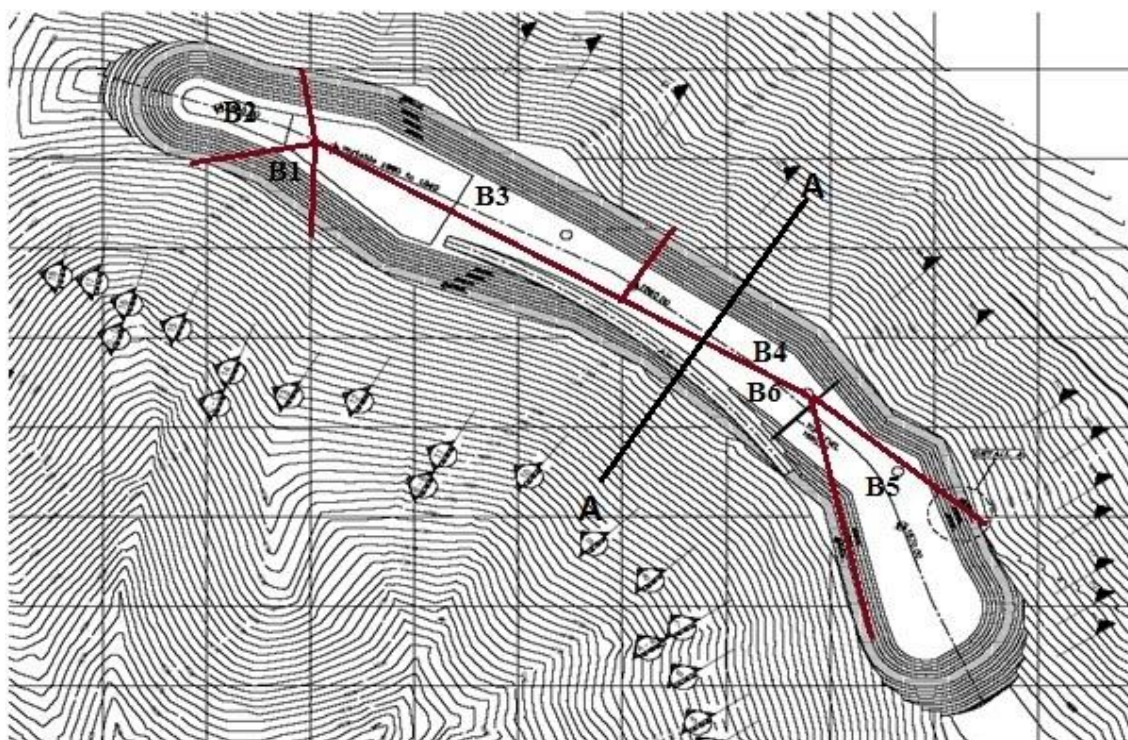
1. joint  
2. aperture  
3. spacing



شکل ۲-۵: تصویر استریوگرافیک سطوح ناپیوستگی در محدوده مخزن

## ۲-۴-۲- بلوک‌بندی مخزن بالادست

در خلال مطالعات میدانی، بخش‌های مختلف توده سنگ اطراف مخزن در رخنمون‌های موجود بر حسب شرایط قرارگیری آنها نسبت به دیواره معدن و نوع لیتولوژی تفکیک گردیده و بلوک بندی شده است. برای هر یک از بلوکها به طور سیستماتیک عملیات پیمایش و برداشت درزه صورت گرفته و آنالیز شده است. بررسی های میدانی و شکل ۲-۶ نشان می‌دهد که محدوده پیت معدن (مخزن بالادست) را می‌توان بر اساس امتداد اصلی و جهت شیب هر بخش از دیواره معدن، به ۶ بلوک مختلف ( $B_1$  تا  $B_6$ ) تقسیم کرد. در هر یک از بلوکها ممکن است حسب شیب دیواره شیب‌دار مخزن و مشخصات ناپیوستگی موجود در توده‌سنگ ریزش‌هایی اتفاق بیافتد که در فصل بعدی به این موضوع پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۶: بلوک بندی مخزن بالادست (مهتاب قدس، ۱۳۸۸)

### ۲-۴-۳- آزمایشات مکانیک سنگی

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و نیز پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگها، آزمایش‌های مکانیک سنگ روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌های اکتشافی در هر بلوک انجام گردید. همچنین جهت تعیین پارامتر مقاومت فشاری سنگ بکر از آزمایش‌هایی از قبیل مقاومت فشاری تک محوره، بار نقطه‌ای و چکش اشمیت استفاده شده است و در نهایت به منظور تخمین دقیق این پارامترها در هر بلوک از مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های مختلف میانگین‌گیری شده است و مقادیر آنها در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲: مقاومت فشاری (مگاپاسکال) حاصل از سه روش در بلوک‌های مختلف مخزن (مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

آزمایش	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳	بلوک ۴	بلوک ۵	بلوک ۶
تک محوره	۷۵	۸۰	۷۵	۷۰	۷۵	۷۵
بار نقطه‌ای	۶۰	۶۵	۶۰	۵۰	۵۵	۷۰
چکش اشمیت	۸۰	۷۵	۸۰	۶۰	۸۰	۸۰
میانگین	۷۱	۷۳	۷۱	۶۰	۷۰	۷۵

#### ۲-۴-۴- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

امروزه استفاده از نرم افزارهای عددی رواج گسترده‌ای یافته اند، بطوری که در اکثر پروژه های مهندسی سنگ از آن ها برای تحلیل های عددی استفاده می‌شود. یکی از مشکلات بزرگ در زمینه مدل های عددی، مسئله داده های ورودی برای خصوصیات توده سنگ است. در صورتی که داده های ورودی معتبر نباشد، نتایج حاصله از اعتبار چندانی برخوردار نخواهند بود. از طرفی در سال های اخیر معیار شکست هوک و براون بطور فزاینده‌ای برای توده سنگ به کار رفته است (بشری، ۱۳۸۸).

نرم‌افزار Roclab به منظور استفاده سریع و آسان از این معیار شکست ارائه شده است و به کاربر اجازه می دهد تا به راحتی تخمینی از خصوصیات توده سنگ را بدست آورد و تاثیر تغییر این خصوصیات را بر پوش های شکست بصورت گرافیکی مشاهده کرد (Wines and Lilly, 2001). بنابراین از نتایج بدست آمده در این نرم افزار می توان به عنوان ورودی مناسبی در بسیاری از نرم افزارهای تحلیل عددی استفاده کرد. لذا برای ارزیابی مقاومت برشی توده های سنگ ساختگاه و تعیین عوامل مقاومت برشی هوک و براون و موهر-کلمب معادل، از این نرم افزار استفاده به عمل آمده است.

جهت تعیین پارامترهای توده سنگ از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشاری و

کششی و مدول تغییرشکل پذیری، نیاز به پارامترهایی شامل مقاومت فشاری سنگ بکر، اندیس مقاومت زمین شناسی، ضریب آشفستگی (D) که بسته به وضعیت حفاری تعیین می‌شود و پارامتر  $m_i$  برای سنگ بکر می‌باشد، که این مقادیر در جدول ۲-۲ و جدول ۳-۲ آمده است.

جدول ۳-۲:  $m_i$  و GSI توده سنگ در نواحی مختلف مخزن (مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

بلوک	۱	۲	۳	۴	۵	۶
GSI	۴۰	۳۵	۴۰	۳۰	۳۵	۴۴
$m_i$	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۲۱

بطور کلی کاربرد معیار شکست هوک و براون در مورد سنگهای بکر و یا توده های سنگی خیلی درزه داری توصیه شده است که بتوان آنها را متجانس و همسانگرد فرض کرد. به بیان دیگر این معیار وقتی کاربرد دارد که خواص توده سنگ در قسمت‌های مختلف و نیز در امتدادهای متفاوت، کمابیش یکسان باشد. بدین ترتیب این معیار را نمی توان در مورد سنگهای دگرگونی دارای شیستوزیته و نیز سنگهایی که خواص آنها به وسیله یک دسته ناپیوستگی (مثل سطح لایه بندی) کنترل می شود، به کار بست. در چنین توده سنگهایی معیار هوک و براون را فقط در مورد بخشهای سالم و بکر می توان استفاده نمود، در عین حال مقاومت ناپیوستگی‌های سنگ را نیز می بایست مد نظر قرارداد (Singh and Rao, 2005). در نرم افزار Roclab می توان مقدار GSI را بر مبنای بازدید صحرایی انجام گرفته و مشخص نمودن شرایط سطوح ناپیوستگی ها مطابق شکل ۲-۷ تعیین نمود.

مقدار GSI با استفاده از دو پارامتر ساختار توده سنگ و شرایط سطوح ناپیوستگی تعیین می‌گردد. با توجه به شرایط ناپیوستگی و وضعیت ساختار توده سنگ، مقدار میانگین اندیس مقاومت (GSI) از روی کنتورهای موجود ارزیابی می‌شود.

## ۲-۵- طبقه بندی مهندسی توده سنگ

از دیرباز روش‌های تجربی طبقه بندی توده سنگ از دیدگاه مهندسی در مسائل کاربردی مورد

توجه قرار گرفته است. که شناخته شده ترین این روش ها عبارتند از :

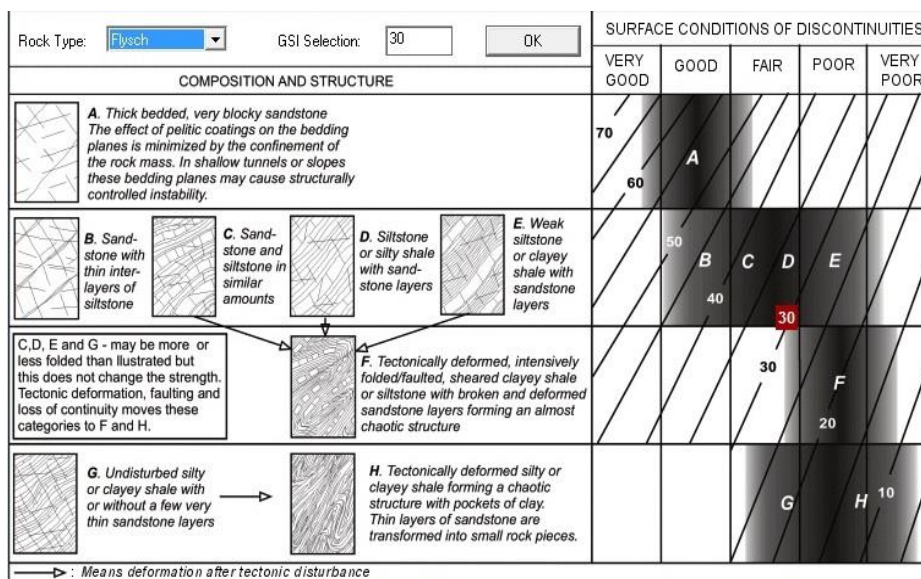
- روش پیشنهادی بنیادسکی که به نام امتیاز توده سنگ (RMR<sup>1</sup>) در سال ۱۹۷۴ است و اصلاح

شده آن در سال ۱۹۸۹ می باشد.

- روش بارتون و همکاران در سال ۱۹۷۴

- روش شاخص مقاومت زمین شناسی توده سنگ (GSI)

مواردی که در طبقه بندی Q جمع آوری و تحلیل شده اند اغلب سازه های زیرزمینی (تونل ها و فضاهای زیرزمینی) در سنگ های کم درزه و یا یکپارچه که در اعماق زیاد هستند را در برمی گیرند. در این موارد، شرایط ساختاری کمتر بر توده سنگ تأثیر گذار بوده و بیشتر شرایط تنش توده سنگ را تحت تأثیر قرار می دهد. در روش طبقه بندی RMR سازه هایی که بیشتر در اعماق متوسط قرار داشته و سنگهای دربرگیرنده بطور میانگین سه دسته درزه هستند، مدنظر بوده اند. در این روش تنش در سنگ کمتر مورد توجه بوده و بیشتر شرایط ساختمانی بر رفتار توده سنگ حاکم می باشد. شاخص مقاومت زمین شناسی توده سنگ (GSI) که امروزه بیش از سایر روشها مورد توجه قرار می گیرد و در سازه های سطحی نیز قابل استفاده است (Marions and Hoek, 2000).



شکل ۲-۷: انتخاب GSI در نرم افزار Roclab

<sup>1</sup>. Rock Mass Rating (RMR)

به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ محدوده مورد مطالعه، از نرم افزار Roclab1.0 استفاده شده است که بر مبنای شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) و آخرین معیار ارائه شده هوک و براون، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ را محاسبه می کند. در این بخش با استفاده از معیار شکست هوک و براون پارامترهای مقاومتی توده سنگ، پارامترهای معیار هوک و براون و پارامترهای مقاومتی معیار موهر- کولمب برای بلوک‌های مختلف مخزن محاسبه شده و در جدول ۲-۴ آمده است.

جدول ۲-۴: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ بلوک‌های شش گانه مخزن، با استفاده از روابط مربوط به

معیار گسیختگی هوک- براون و موهر - کولمب

$\sigma_c$ (Mpa)	E (Gpa)	$\sigma_t^*$ (Mpa)	معیار هوک و براون		پارامترهای مقاومت برشی		بلوک
			$m_r^*$	$s_r^*$	$\Phi$ (degree)	C(Mpa)	
۴/۳	۲/۳۷	- ۰/۰۱۴	۰/۲۳۴	۴/۵۴e-۵	۴۲/۱۰	۰/۱۷۶	۱
۳/۵۷	۱/۸	- ۰/۰۰۹	۰/۱۶۴	۱/۹۷e-۵	۳۸/۹۶	۰/۱۴۷	۲
۴/۳	۲/۳۷	- ۰/۰۱۴	۰/۲۳۴	۴/۵۴e-۵	۴۲/۱۰	۰/۱۷۶	۳
۰/۱۳۵	۱/۲۲	- ۰/۰۰۴	۰/۱۱۵	۸/۵۷e-۵	۳۳/۸۹	۰/۱۱۱	۴
۰/۲۶۲	۱/۷۶	- ۰/۰۰۸	۰/۱۶۴	۱/۹۷e-۵	۳۸/۶۵	۰/۱۴۵	۵
۵/۹۴	۳/۰۶	- ۰/۰۱۷	۰/۳۸۵	۱۰e-۵	۴۶/۷۷	۰/۲۲	۶

$m_r^*$  و  $s_r^*$  پارامترهای توده سنگ می باشند.

$\sigma_t^*$  مقاومت کششی توده سنگ می باشد.

در فصل آینده به تحلیل سینماتیکی مخزن در بلوک‌های مختلف آن می پردازیم.





## فصل سوم

تحلیل پایداری سینماتیکی بلوک‌های سنگی اطراف

مخزن

برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها روش‌های مختلفی ارائه شده است، که از جمله آنها می‌توان به تئوری بلوکی، استفاده از تصاویر استریوگرافیک، روش تعادل حدی، مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی اشاره نمود (امامی میبدی، ۱۳۸۶). تمامی این روش‌ها با در نظر گرفتن هندسه شیب و ساختارهای موجود در آن و پارامترهای اختصاصی دیگر سعی در تحلیل شیروانی مورد مطالعه دارند که با توجه به کاربری شیروانی و امکانات موجود بهترین روش ممکن انتخاب می‌شود. از میان روش‌های ارائه شده مدل‌سازی عددی می‌تواند بهترین نتیجه را در اختیار قرار دهد ولی برای تعریف دقیق نوع مدل‌سازی باید دید اولیه‌ای نسبت به منطقه داشت تا بر اساس نوع شکست‌های موجود و نیز با توجه به پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط اقدام به مدل‌سازی کرد (Morales et al, 2004). در شیروانی مشرف بر ساختگاه مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد، ابتدا بر اساس برداشت‌های صحرایی ناپیوستگی‌های عمده و موثر در وقوع شکست با استفاده از نرم افزار DIPS معرفی می‌شود. سپس با توجه به هندسه شیب و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، نوع شکست احتمالی نواحی مختلف شیروانی تعیین می‌شود.

### ۳-۲- تشخیص نوع شکست با استفاده از تصاویر استریوگرافیک

در این بخش با استفاده از بررسی‌های سینماتیکی، پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای<sup>۱</sup>، واژگونی<sup>۲</sup> و گوه‌ای<sup>۳</sup> در دیواره، با توجه به وضعیت هندسی و ژئومکانیکی ناپیوستگی‌های مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه تشخیص انواع شکست در جدول ۳-۱ آورده شده است. با توجه به امتداد اصلی و جهت شیب هر بخش از دیواره مخزن و تقسیم کردن محدوده مورد مطالعه به ۶ ناحیه مختلف و در نظر گرفتن ویژگی‌های ژئومکانیکی هر ناحیه به تحلیل سینماتیکی آن می‌پردازیم.

1. Plane Failure

2. Toppling Failure

3. Wedge Failure

جدول ۳-۱: تعیین نوع شکست با استفاده از مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها و دیواره (Terry and Kyo, 2007)

نوع شکست	شرایط حاکم
صفحه‌ای	۱- امتداد ناپیوستگی با امتداد شیروانی تقریباً موازی باشد. ۲- زاویه شیب صفحه کمتر از زاویه شیب شیروانی باشد. ۳- شیب صفحه شکست بزرگتر از زاویه اصطکاک باشد. ۴- سطوحی که شکست در آن اتفاق می‌افتد دارای مقاومت کمی باشد.
گوه‌ای	۱- زاویه شیب تقاطع دو صفحه بزرگتر از زاویه اصطکاک باشد. ۲- زاویه شیب تقاطع دو صفحه از زاویه شیب شیروانی کمتر باشد. ۳- جهت خط تقاطع دو صفحه حداکثر اختلاف $\pm 30^\circ$ درجه با امتداد شیروانی داشته باشد.
واژگونی	زمانی رخ می‌دهد که ناپیوستگی‌های قائم یا با شیب مخالف در توده سنگ وجود داشته باشد.

مشخصات نواحی مورد مطالعه (B1 الی B6) از قبیل شیب و جهت شیب دیواره در نواحی شش‌گانه مخزن و نیز پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در جدول ۳-۲ آمده است و همچنین محل آنها بر روی هندسه مخزن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: هندسه شیب و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اطراف مخزن

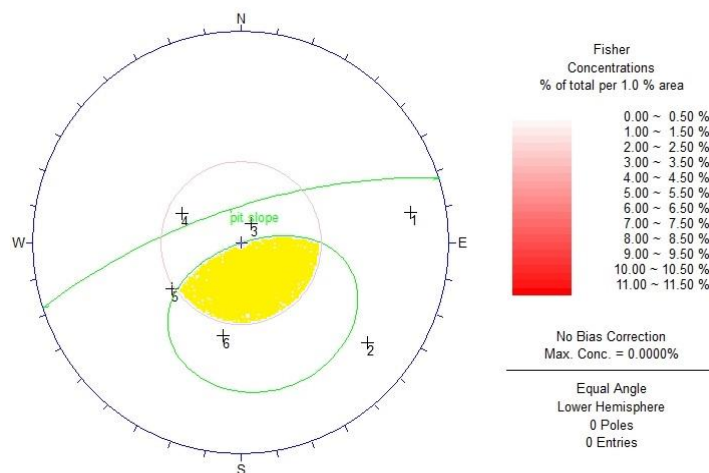
بلوک	شیب دیواره (درجه)	جهت شیب دیواره (درجه)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
<b>B1</b>	۷۱	۳۴۲	۱۷۶	۴۲
<b>B2</b>	۷۱	۱۱۲	۱۴۷	۳۹
<b>B3</b>	۷۱	۱۹۵	۱۷۶	۴۲
<b>B4</b>	۷۱	۲۱۸	۱۱۱	۳۴
<b>B5</b>	۷۱	۲۸۸	۱۴۵	۳۹
<b>B6</b>	۷۱	۲۶	۲۲۰	۴۶

برای استفاده از روش استریوگرافیک برای تحلیل مقدماتی پایداری دامنه‌های سنگی استفاده

می‌شود. به این منظور ابتدا توسط بررسی های آماری دسته درزه های اصلی و دیگر گسستگی های موجود در دامنه تعیین و در شبکه استریونت<sup>۱</sup> پیاده می‌شود سپس استریوگرام<sup>۲</sup> معرف سطح دامنه یا شیبی که بر اثر حفاری به وجود خواهد آمد در استریونت رسم می‌شود. تحلیل استریوگرافیک زمانی کامل تر می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی نیز در نظر گرفته شود (Gurocak et al, 2008).

### ۳-۲-۱- بررسی پتانسیل گسیختگی های صفحه‌ای

در بررسی پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای، قطب ناپیوستگی‌ها (+) به همراه قطب صفحه شیب دیواره روی استریونت ترسیم و همچنین مخروط اصطکاک نیز رسم می‌گردد. سپس ناپیوستگی‌های دارای پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای به صورت شکل ۳-۱ مشخص می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود منطقه ریزش صفحه‌ای، فضای ایجاد شده مابین صفحه دیواره نهایی و دایره شکست ناشی از زاویه اصطکاک داخلی است که با رنگ زرد بر روی شکل مشخص شده است. به عبارت دیگر کلیه ناپیوستگی‌هایی که در راستای تقریب دیواره شیب دار باشند و قطب آن‌ها در داخل زون زرد رنگ قرار گیرند پتانسیل لغزش صفحه‌ای را دارند.

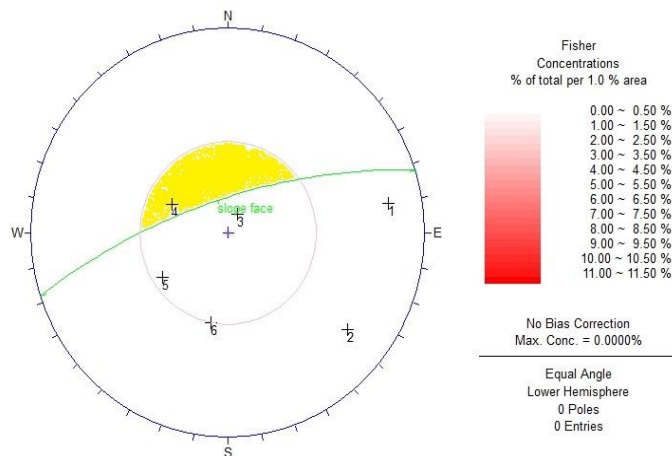


شکل ۳-۱: محدوده گسیختگی صفحه‌ای ( $\phi$ ): زاویه اصطکاک داخلی، دایره مرکزی: مخروط اصطکاک، بیضی پایین شکل: پوش روشنی روز، (daylight envelope)

1. stereonet  
2. stereogram

### ۲-۲-۳- بررسی پتانسیل گسیختگی های گوه ای

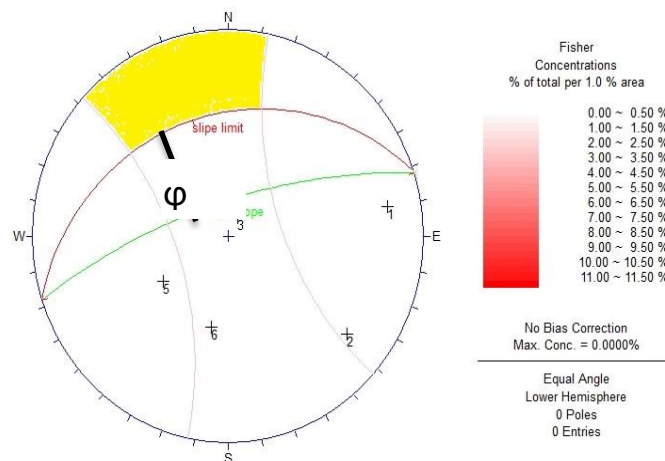
به منظور بررسی پتانسیل گسیختگی گوه ای، قطب دسته درزه ها به همراه صفحه دیواره بر روی شبکه استریونت ترسیم و محدوده گسیختگی گوه ای تعیین می گردد. محدوده گسیختگی گوه ای فضایی است ما بین صفحه دیواره و دایره شکست که با مکمل زاویه اصطکاک داخلی ترسیم می شود، محدوده گسیختگی گوه ای در شکل ۲-۳ با رنگ زرد مشخص شده است. یعنی نقطه تقاطع دو دسته درزه باید داخل محدوده زرد رنگ باشد تا لغزش گوه ای اتفاق بیافتد.



شکل ۲-۳: ناحیه زرد رنگ محدوده گسیختگی گوه ای خواهد بود بشرطی که نقطه تقاطع دو دسته درزه داخل آن باشد

### ۳-۲-۳- بررسی پتانسیل گسیختگی های واژگونی

به منظور بررسی پتانسیل گسیختگی واژگونی، قطب دسته درزه ها به همراه صفحه دیواره بر روی شبکه استریونت ترسیم و محدوده گسیختگی واژگونی با رنگ زرد در شکل ۳-۳ تعیین شده است. یعنی کلیه درزه ها و یا ناپیوستگی های که قطب آن ها داخل محدوده زرد رنگ قرار گیرند، پتانسیل لغزش واژگونی را دارند.



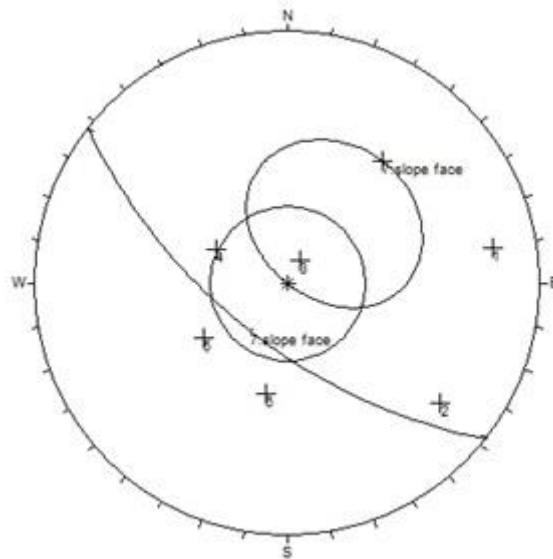
شکل ۳-۳: محدوده گسیختگی واژگونی ناحیه زرد رنگی است که قطب ناپیوستگی مربوط در آن باشد

### ۳-۳- تحلیل سینماتیکی دیواره مخزن

در این بخش با استفاده از بررسی‌های سینماتیکی، پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی در دیواره، با توجه به وضعیت هندسی و ژئومکانیکی ناپیوستگی‌های مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تحلیل پایداری دیواره، دسته درزه‌های شناسایی شده به عنوان ناپیوستگی‌های تأثیر گذار در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل پایداری بر اساس اطلاعات سطحی گردآوری شده در منطقه مورد مطالعه صورت می‌گیرد. امروزه جهت مدیریت پایداری شیب دیواره، همگام با پیشرفت کار، ناپیوستگی‌های قابل مشاهده که به تدریج در دیواره‌ها پدیدار می‌شوند برداشت و تحلیل می‌شوند، در اینجا نتایج تحلیل حاصل از شکست صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی بلوک ۴ به ترتیب در شکل ۳-۴ تا شکل ۳-۶ و برای بلوک ۶ در شکل ۳-۷ تا شکل ۳-۹ آمده است و نتایج حاصل برای بقیه بلوک‌ها در پیوست الف آمده است. به علاوه در مناطق مشکوک به ناپایداری و دارای پتانسیل ریزش، برنامه رفتارسنجی<sup>۱</sup> به مرحله اجرا در می‌آید تا قبل از وقوع ریزش، اقدامات لازم برای پایدارسازی صورت گیرد.

<sup>1</sup>. Monitoring

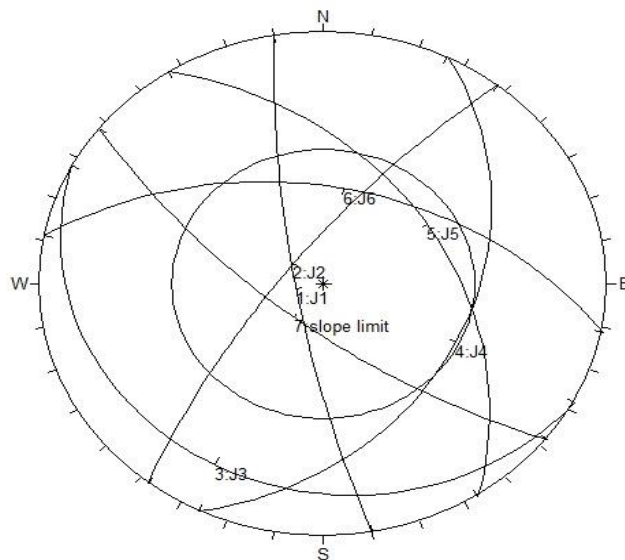
۳-۳-۱- تحلیل سینماتیکی بلوک ۴



شکل ۳-۴: تحلیل شکست صفحه‌ای بلوک ۴

همانطور که در شکل فوق مشخص است دیواره شیبدار در این بلوک دارای پتانسیل لغزش تحت

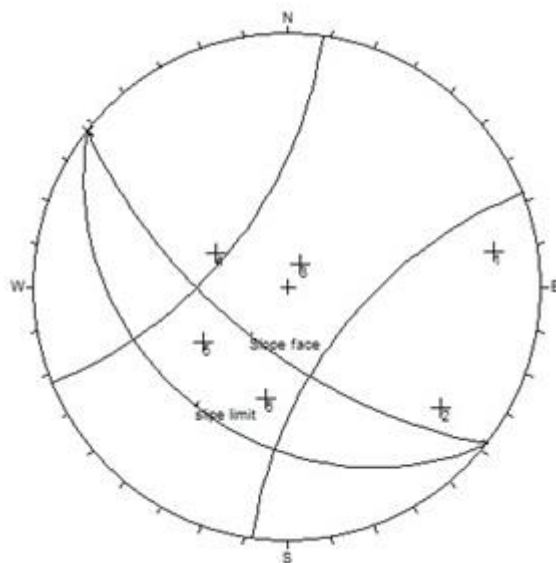
تأثیر دسته درزه J3 است.



شکل ۳-۵: تحلیل شکست گوه‌ای بلوک ۴

با توجه به شکل فوق پتانسیل لغزش گوه‌ای در این بلوک وجود ندارد.

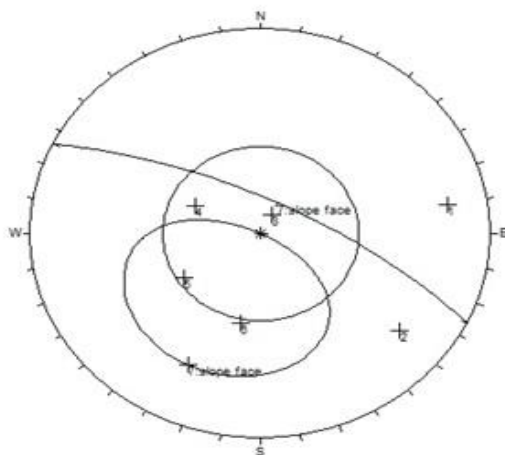




شکل ۳-۶: تحلیل شکست واژگونی بلوک ۴

با توجه به شکل فوق پتانسیل لغزش واژگونی در بلوک ۴ وجود ندارد.

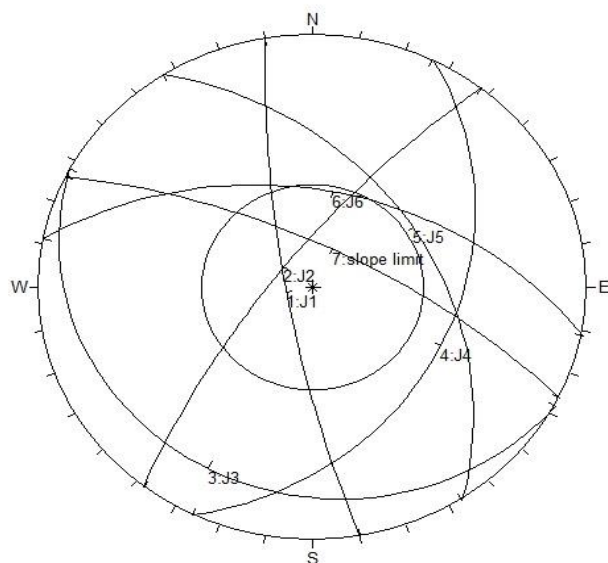
### ۳-۳-۲- تحلیل سینماتیکی بلوک ۶



شکل ۳-۷: تحلیل شکست صفحه‌ای بلوک ۶

همانطور که در شکل فوق مشخص است دیواره شیبدار در این بلوک دارای پتانسیل لغزش تحت

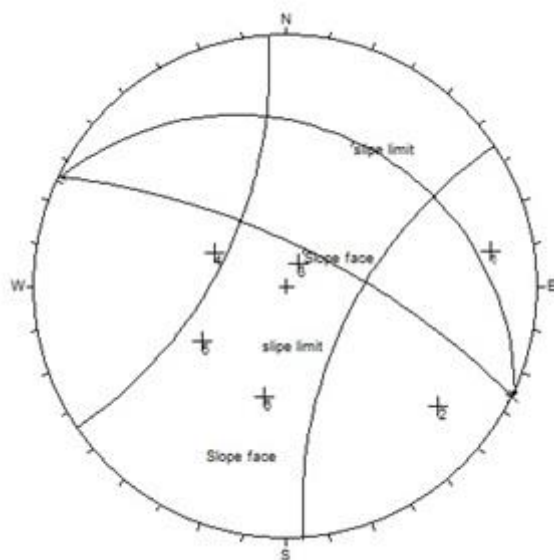
تأثیر دسته درزه 5 است.



شکل ۳-۸: تحلیل شکست گوه‌ای بلوک ۶

با توجه به شکل فوق پتانسیل لغزش گوه ای در این بلوک بواسطه تقاطع دسته درزه‌های  $J_2$  و  $J_6$

وجود دارد.



شکل ۳-۹: تحلیل شکست واژگونی بلوک ۶

با توجه به شکل فوق پتانسیل لغزش واژگونی در بلوک ۶ وجود ندارد.

تحلیل های انجام شده نشان می دهد که بعد از حفاری مخزن، احتمال وقوع گسیختگی های متعددی از قبیل صفحه ای، گوه ای و واژگونی در مناطق مختلف وجود خواهد داشت که انواع شکست ها و عوامل ایجاد آن ها در جدول ۳-۳ آمده است، که البته این موارد نیاز به بررسی های بیشتر دارد که در فصول بعدی به آن ها پرداخته می شود.

جدول ۳-۳: بررسی انواع شکست در بلوک های مختلف مخزن

بلوک	شکست صفحه ای	شکست گوه ای	شکست واژگونی
۱	.....	تحت تأثیر دسته درزه های J5 و J6	.....
۲	تحت تأثیر دسته درزه J4	تحت تأثیر دسته درزه های J5 و J6	تحت تأثیر دسته درزه J2
۳	تحت تأثیر دسته درزه J3	.....	.....
۴	تحت تأثیر دسته درزه J3	.....	.....
۵	تحت تأثیر دسته درزه J3	تحت تأثیر دسته درزه های J1 و J6	.....
۶	تحت تأثیر دسته درزه J5	تحت تأثیر دسته درزه های J2 و J6	.....

..... : شکست رخ نمی دهد

نتایج حاصل مبین این است که در ناحیه پنجم تحت اثر دسته درزه ۳، امکان شکست صفحه ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۵۰ درجه می باشد و در ناحیه ششم تحت اثر دسته درزه ۵، امکان شکست صفحه ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۴۵ درجه می باشد. علاوه بر آن در ناحیه پنجم تحت اثر دسته درزه های ۱ و ۶، امکان شکست گوه ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۵۵ درجه می باشد، در ناحیه ششم نیز تحت اثر دسته درزه های ۲ و ۶، امکان شکست گوه ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۴۵ درجه می باشد.

## فصل چهارم

رفتارنگاری داده‌های ابزار دقیق و تحلیل برگشتی

شرایط گوناگون زمین‌شناسی و طبیعت پیچیده توده‌سنگها، پیش‌بینی مدل‌سازی رفتار توده‌سنگ در طرح‌های ژئومکانیکی، را از دیدگاه علمی و نظری مشکل می‌سازد. تعداد عوامل مؤثر بر رفتار توده‌سنگ و عدم شناخت قطعی آنها، لزوم ارزیابی رفتار واقعی آن را ایجاب می‌کند.

در طی سال‌های اخیر استفاده از روش‌های عددی مختلف نظیر روش المان محدود<sup>۱</sup>، روش تفاضل محدود<sup>۲</sup>، روش المان مرزی<sup>۳</sup> و روش المان مجزا<sup>۴</sup> در زمینه مهندسی عمران و ژئومکانیک گسترش چشمگیری داشته است. هرچند که در حال حاضر بطور وسیع از این روشها برای طراحی سازه‌های سنگی نظیر تونلها، فضاها بزرگ زیرزمینی، فونداسیون سدها و نظایر آن استفاده می‌شود، اما پیش‌بینی رفتار مکانیکی چنین سازه‌هایی با دقت کافی بسیار دشوار است. به عبارت دیگر اعتبار این پیش‌بینی‌ها به دقت اطلاعات ورودی و اینکه تا چه حد بیانگر رفتار واقعی سنگ می‌باشند، بستگی دارد. بیان کمی و دقیق ساختارهای زمین‌شناسی، خواص ژئومکانیکی سنگهای برجا، سطح آبهای زیرزمینی و نفوذپذیری نیز کاری بسیار دشوار است. بدین ترتیب جای هیچگونه تعجب نیست که علی‌رغم استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی دقیق و تحلیل‌های کامپیوتری پیچیده، رفتار واقعی سازه‌های مذکور متفاوت با رفتار پیش‌بینی شده آنها باشد.

به مشاهده، اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای رفتاری توده‌سنگ، رفتارسنجی<sup>۵</sup> و به هر وسیله‌ای که بدین منظور استفاده شود، ابزار و به عمل استفاده از ابزار برای رفتارسنجی، ابزاربندی گفته می‌شود (موسوی، ۱۳۸۷). ابزاربندی و رفتارسنجی وسیله مناسبی است که توسط آنها می‌توان پارامترها و شرایط فرض شده طراحی را تایید و عملکرد سازه و توده سنگ را ارزیابی کرد و یا در صورت وقوع ناپایداری به علت آن پی برد. اگر شرایط واقعی زمین با شرایط پیش‌بینی شده اختلاف

<sup>1</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>2</sup> Finite Difference Method (FDM)

<sup>3</sup> Boundary Element Method (BEM)

<sup>4</sup> Distinct Element Method (DEM)

<sup>5</sup> Monitoring

چشم گیری داشته باشد، بر اساس مشاهدات و نتایج ابزار دقیق، تغییرات و اصلاحات در طرح یا روش اجرا صورت می گیرد (مهدوری و فتحی سلمی، ۱۳۸۶).

همانطور که گفته شد روش طراحی و ساخت سازه مورد نظر را می توان توسط اندازه گیری های صحرائی تصحیح نمود که در این صورت آن را روش مشاهده ای<sup>۱</sup> نیز می نامند. سؤالی که در این روش مطرح می شود آن است که چگونه می توان بطور کمی نتایج آزمایش برجا را در جهت ارزیابی طراحی اولیه و نحوه ساخت سازه تفسیر نمود؟ برای پاسخ به این سؤال می توان از روش تحلیل برگشتی<sup>۲</sup> که در حقیقت پلی بین واقعیت و پیش بینی است، استفاده نمود (موسوی، ۱۳۸۷).

هدف این فصل بررسی داده های ابزار دقیق نصب شده در مخزن و تحلیل برگشتی آنها به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در بلوک ۴ (که بر روی شکل ۲-۶ مشخص شده است) و مقایسه آن با نتایج روش طبقه بندی GSI می باشد. که برای رسیدن به این هدف از مدل سازی توسط نرم افزار FLAC استفاده شده است.

## ۴-۲- تحلیل برگشتی و تحلیل عادی

تحلیل برگشتی عبارت از تکنیکی است که قادر است پارامترهای کنترلی یک سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن پیش بینی نماید (Jeon and Yang, 2004).

در تحلیل برگشتی برای مسائل مهندسی سنگ، شرایط نیرو (بارهای خارجی و فشارهای سنگ) و نیز خواص مکانیکی (مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و ...) با توجه به تغییر مکان، کرنش و فشار اندازه گیری شده در طی مراحل اجرای پروژه و پس از آن تعیین می شوند. در حقیقت این روش عکس روش تحلیل عادی است که در آن شرایط نیرو و خواص مکانیکی، اطلاعات ورودی برای تعیین تغییر مکان، تنش و کرنش می باشند. به همین جهت است که نام این روش را تحلیل برگشتی می نامند.

---

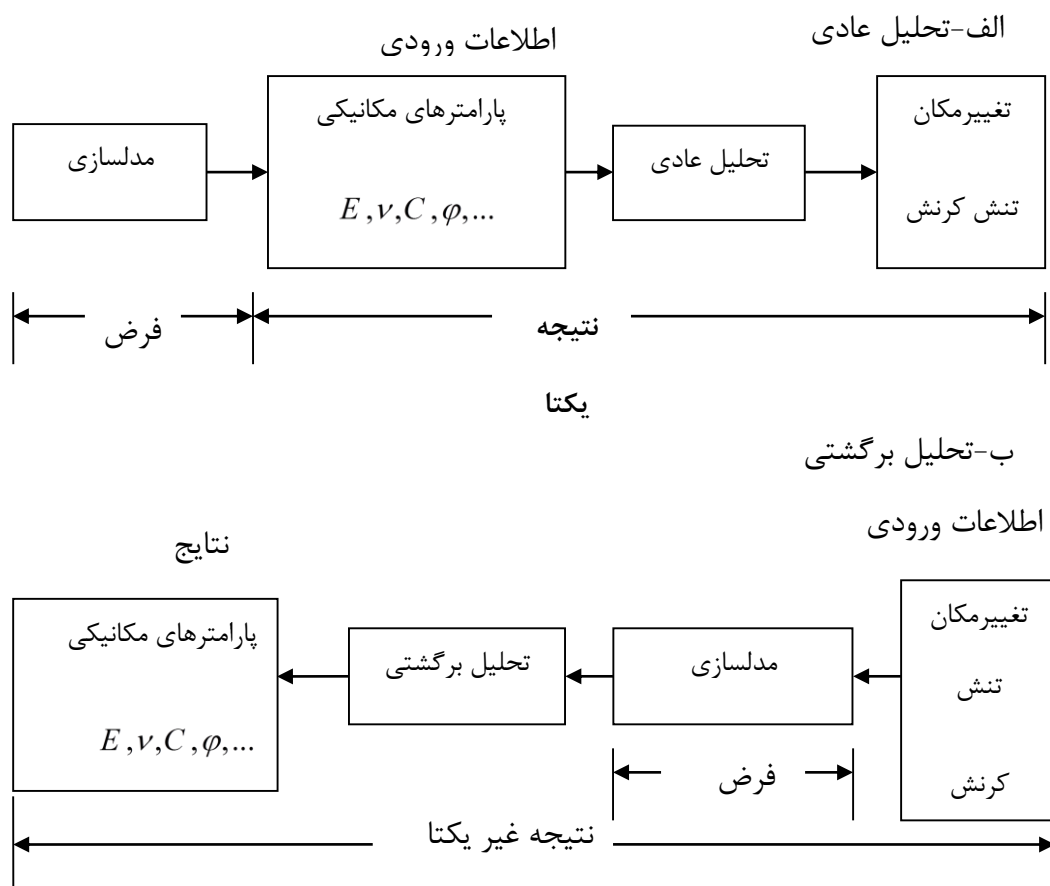
<sup>1</sup> Observational Method

<sup>2</sup> Back Analysis Technique

لازم به ذکر است که تحلیل برگشتی دقیقاً عکس تحلیل عادی نبوده و پیچیده تر از آن می باشد، چرا که در تحلیل برگشتی فرض اصلی خصوصاً در مدل سازی سنگ می تواند تغییر کند. در تحلیل عادی معمولاً یک مدل مکانیکی مشخص نظیر الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوپلاستیک و... برای سنگ فرض می شود. با فرض این مدل مقادیر ثابت های مکانیکی آن را می توان با انجام آزمایش های آزمایشگاهی یا آزمایشهای برجا تعیین نمود. در تحلیل عادی از این مقادیر به عنوان اطلاعات ورودی جهت محاسبه تغییر مکان، تنش و کرنش استفاده می شود. لازم به ذکر است که این روش حداقل برای یک مدل معین منجر به نتیجه ای یکتا خواهد شد (Zhang and Yue, 2005).

از طرف دیگر در تحلیل برگشتی مقادیر جابجایی ها، کرنش و فشار از روی اندازه گیری های صحرائی تعیین شده و سپس یک مدل مکانیکی فرض می شود. با استفاده از نتایج اندازه گیری های صحرائی بعنوان اطلاعات ورودی برای مدل، می توان پارامترهای مکانیکی مدل و نیروهای خارجی را توسط تحلیل برگشتی محاسبه نمود. بدین ترتیب پارامترهای مکانیکی و نیروهای خارجی محاسبه شده کاملاً به مدل مکانیکی فرض شده بستگی خواهند داشت. بعنوان مثال با فرض مدلی بصورت الاستیک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بدست می آید، در حالی که با فرض مدل الاستوپلاستیک علاوه بر پارامترهای قبلی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز تعیین می شوند. بدین ترتیب با استفاده از اطلاعات ورودی یکسان، نتایج متفاوتی بدست خواهد آمد (نوریان، ۱۳۸۳).

تفاوت بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی در شکل ۴-۱ بیان شده است. مطابق شکل در تحلیل عادی حداقل در مورد اطلاعات ورودی معین نتیجه یکتایی بدست خواهد آمد. حتی در مواردی که رفتار واقعی سنگ با رفتار پیش بینی شده مدل یکسان نباشد، باز هم یکتا بودن نتیجه مذکور قطعی است. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی نتیجه بدست آمده یکتا نخواهد بود، چراکه عمل مدل سازی پس از تعیین اطلاعات ورودی صورت می گیرد. لذا عمل مدل سازی در تحلیل برگشتی بسیار دشوارتر از مدل سازی تحلیل عادی است.



شکل ۴-۱: مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (نوریان، ۱۳۸۳)

هدف تحلیل برگشتی صرفاً تعیین مدل مکانیکی یا مقادیر پارامترهای مکانیکی و نیروهای خارجی نیست، بلکه هدف نهایی آن ارزیابی روش‌های طراحی و ساخت پروژه مورد نظر در طی اجرای آن می‌باشد.

### ۴-۳- روش‌های بهینه‌سازی

در این بخش روش‌های بهینه‌سازی مسائل آنالیز معکوس بیان می‌شوند. روش‌های آنالیز معکوس دقیق روش‌هایی هستند که بر پایه ریاضی بنا شده‌اند و از یک اساس ریاضی برای حل مسئله معکوس استفاده می‌کنند. امتیاز اصلی این روش‌ها حل دقیق جواب می‌باشد ولی زمان محاسبه برای حل



جواب ها بسیار زیاد می باشد. بدین منظور از روش های ابتکاری<sup>۱</sup> و فراابتکاری برای حل مسائل مربوط به آنالیز معکوس استفاده می شوند تا بتوانند جواب بهینه را با درصد قابل قبولی به دست آورند. اکثر این روش ها از پدیده های موجود در طبیعت الهام گرفته و پدیده های طبیعی را شبیه سازی می کنند. از جمله روش های دقیق می توان به جستجوی تک متغیره مستقیم<sup>۲</sup>، تک متغیره متناوب<sup>۳</sup> و تکنیک جستجوی الگویی<sup>۴</sup> اشاره کرد (Baykasoglu et al, 2008). از روش های بهینه سازی ابتکاری می توان به الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup>، روش های گرادیان<sup>۶</sup>، روش های ترکیبی<sup>۷</sup>، الگوریتم اجتماع مورچه<sup>۸</sup>، اجتماع زنبور عسل<sup>۹</sup> و غیره نام برد. روش های ابتکاری و فرا ابتکاری کاربردهای زیادی در مسائل مختلف مهندسی دارند (Shang, 2002).

#### ۴-۳-۱- الگوریتم بهینه سازی دقیق

به طور کلی روش تحلیل برگشتی به روش های مستقیم و معکوس تقسیم می شود. در روش مستقیم بر اساس فرض پارامترهای مجهول اولیه و تکرار حل معادلات به روش معمول به تصحیح مقدار نهایی مجهولات به وسیله کاهش دادن مقدار تابع خطا می پردازند. از مزایای روش مستقیم این است که بدون نگرانی از حل معادلات پیچیده ریاضی می توان آن را برای بدست آوردن مقادیر مجهول استفاده کرد. یکی از روش های مناسب برای تحلیل برگشتی روش جستجوی مستقیم می باشد که یک روش بهینه سازی بدون محدودیت می باشد (Sakurai and Takeuchi, 1983).

چیون و یانگ<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۴) به منظور دستیابی به مناسب ترین الگوریتم تحلیل برگشتی از میان روش های بهینه سازی، سه الگوریتم از روش های جستجوی مستقیم را به کار بردند و دریافتند که

---

1. Innovative Method

2. Univariate Method

3. Alternative Univariate Method

4. Pattern Recognition Method

5. Genetic algorithms

6. Gradient methods

7. Hybrid methods

8. Ant Colony

9. Bumblebee Colony

10. Jeon & Yang

روش تک متغیره و روش تک متغیره متناوب می توانند مقادیر بهینه پارامترها را صرف نظر از مقادیر اولیه آنها جستجو کنند، در صورتی که روش جستجوی الگویی، در برخی موارد با موفقیت همراه نیست.

#### ۴-۳-۲- روش الگوریتم جستجوی تک متغیره مستقیم

روش تک متغیره مقدار بهینه پارامترهای مکانیکی سنگ از قبیل مدول الاستیسیته و چسبندگی و غیره را صرف نظر از مقدار اولیه آنها به طرز موفقیت آمیزی جستجو می کند. در این روش، بهینه سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطایی که توسط رابطه زیر تعریف می شود به کار می رود.

$$Error = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} \quad 1-4$$

که در آن  $N$  تعداد نقاط اندازه گیری و  $u_k$  و  $u_k^*$  به ترتیب  $k$  امین مقدار اندازه گیری شده و مقدار پیش بینی شده می باشد (Vardakos, 2007).

روش تک متغیره متناوب موجود، اصلاح شده روش تک متغیره می باشد. این روش  $n$  گام تک متغیره را در نظر می گیرد و بنابراین  $n$  متغیر به طور همزمان تغییر پیدا می کند و تا زمانی تکرار می شود که تابع هدف به مقدار مجاز همگرا شود. در روش تک متغیره مقدار اولیه برای متغیر در نظر گرفته می شود و در مراحل بعدی برای تغییر پارامتر مجهول از رابطه زیر استفاده می شود.

$$x_{i+1} = x_i + \lambda_i s_i \quad 2-4$$

که در آن  $\lambda_i$  نسبت بین جابجایی به دست آمده از مرحله قبلی به جابجایی اندازه گیری شده است که به آن طول گام می گویند و  $s_i$  جهت جستجو است که با توجه به روش استفاده شده تعیین می شود.

#### ۴-۴- مدل سازی عددی در حل مسائل ژئومکانیک

حل دقیق مسائل ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست. ترکیب این دو روش، می‌تواند ما را در حل مسائل پیچیده زمین کمک کند. اساس روش‌های عددی، شبیه‌سازی یک محیط با بی نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط است. موقعیت تعداد و ارتباط نقاط یاد شده توسط مش (المان) بندی مشخص می‌شود. با استفاده از روش‌های عددی می‌توان سازه‌های سطحی و یا زیرزمینی (تونل‌ها، مغارها، شیروانی‌ها و...) را با هر شکل و مقطع مدل سازی کرد و تنش‌ها و جابجایی‌ها در تمام نقاط موردنظر را به دست آورد. از آنجایی که بیشتر سازه‌های سنگی سطحی و زیرزمینی شکل منظم و ساده‌ای ندارند و از طرفی به علت وجود ناپیوستگی‌ها و نبود شرایط ایزوتروپیک، همگن، الاستیک در توده‌سنگ روش‌های فرم بسته ریاضی برای تعیین تنش‌ها و جابجایی‌ها و گسیختگی‌ها با محدودیت مواجه همراه است لذا روش‌های عددی برای حل این مشکل تا حد زیادی جایگزین روش‌های تحلیلی شده‌اند.

محیط‌هایی که یک سازه در آنها و یا بر روی آنها ساخته می‌شود مطابق شکل ۴-۲ به سه دسته پیوسته<sup>۱</sup>، ناپیوسته<sup>۲</sup> و شبه پیوسته<sup>۳</sup> قابل تقسیم می‌باشند (Ling, 2003; Bobet, 2010).

محیط نوع اول (شکل ۴-۲ الف) ممکن است برای زمین‌هایی که از سنگ بکر بدون درزه و شکاف تشکیل شده‌اند به کار رود. نوع دوم (شکل ۴-۲ ب) نماینده سنگ‌های درزه دار می‌باشد و محیط نوع سوم (شکل ۴-۲ ج) نماینده سنگ‌های شدیداً خرد شده و یا هوازده می‌باشد. به دلیل اینکه رفتار نهایی زمین‌های گروه سوم، می‌تواند شبیه به رفتار زمین‌های گروه اول باشد، رفتار این گونه زمین‌ها را شبه پیوسته می‌نامند. رفتار مکانیکی محیط نوع اول را می‌توان به کمک تئوری مکانیک محیط پیوسته تحلیل نمود. در حالی که برای تحلیل رفتار محیط نوع دوم باید از تئوری‌های مربوط به مکانیک محیط‌های ناپیوسته استفاده نمود. برای تحلیل رفتار محیط نوع سوم می‌توان از تئوری‌های

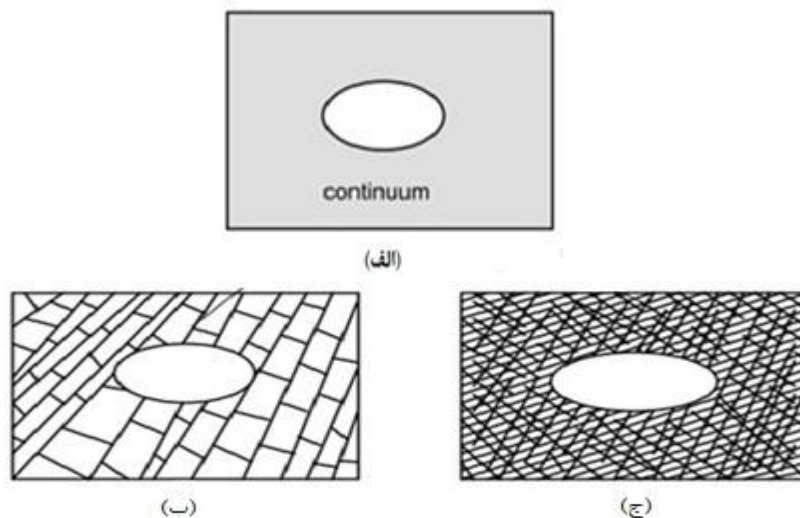
---

<sup>1</sup> continuum

<sup>2</sup> discontinuum

<sup>3</sup> pseudo continuum

محیط‌های ناپیوسته استفاده کرد؛ ولی از آنجایی که تعیین موقعیت، ابعاد و خواص مکانیکی تمام سیستم درزه‌های موجود، غیر ممکن به نظر می‌رسد، روش تحلیل محیط‌های ناپیوسته برای تحلیل رفتار این نوع محیط‌ها کاربرد عملی نخواهد داشت. با توجه به اینکه این محیط‌ها تا حدی شبیه به محیط‌های پیوسته رفتار می‌کنند، جهت تحلیل رفتار آنها می‌توان از تئوری‌های محیط پیوسته استفاده نمود (Itasca, 2002).



شکل ۴-۲: مطابقت روش‌های عددی مختلف برای یک حفاری در توده سنگ برای محیط‌های (الف) پیوسته، (ب)

پیوسته تا ناپیوسته، (ب) ناپیوسته و (ج) شبه پیوسته (Ling, 2003; Bobet, 2010).

از مزایای روش‌های عددی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

با استفاده از روش‌های عددی می‌توان تنش‌ها و جابجایی‌ها را در هر نقطه دلخواه سیستم و در هر زمان که لازم باشد، به دست آورد. علاوه بر آن می‌توان روند حفاری، نصب سیستم نگهداری و سایر فعالیت‌های ایجاد سازه را در نظر گرفت. همچنین می‌توان تمام عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، انواع ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها و لایه‌های مختلف زمین را در مدل لحاظ کرد.

روش‌های عددی با وجود این مزیت‌ها، معایب و مشکلاتی نیز دارند. چنانچه خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ برجا به طور دقیق مشخص نباشد، مدل‌سازی عددی نمی‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد. با توجه به اینکه بعد از حفر یک فضای زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ

تغییر می‌کند؛ با به کارگیری پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی، نمی‌توان رفتار توده‌سنگ را به خوبی پیش بینی کرد. در مدل‌سازی عددی به دلیل عدم توانایی در شبیه‌سازی تمام زمین و یا حتی یک مجموعه حفاری، تنها بخشی از زمین مدل‌سازی شده و با توجه به مدل مفروض، شرایط مرزی برای مدل ساخته شده تعریف می‌شود. جهت حذف تاثیرات این مرزها در تحلیل تنش، کرنش و تغییر شکل در مجاورت یا در امتداد فضای حفاری، مرزها به اندازه کافی دور از فضا در نظر گرفته می‌شوند که در نتیجه باعث افزایش در تعداد المان‌ها می‌شود (Chen et al, 2009). امروزه روش‌های عددی المان محدود، تفاضل محدود، المان مرزی، المان مجزا، تغییر شکل ناپیوسته ( $DDA^1$ ) و مدل ذرات مقید ( $BPM^2$ ) در حل مسائل ژئومکانیک کاربرد زیادی دارند که در این مجموعه بدلیل استفاده از نرم‌افزار FLAC که در آن از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود، فقط به شرح این روش پرداخته می‌شود و برای آگاهی از چگونگی عملکرد بقیه روش‌ها می‌توان به منابعی چون (Ling, 2003; Bobet et al, 2009; Bobet, 2010) رجوع کرد.

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی است که برای حل یک سری معادلات دیفرانسیل که مقادیر اولیه و شرایط مرزی آن‌ها مشخص باشد، استفاده شده است. در روش تفاضل محدود هر مشتقی که در دسته معادلات حاکم وجود دارد توسط یک عبارت جبری که بر حسب متغیرهای مسأله است جایگزین می‌شود (مثلاً بر حسب تنش‌ها یا جابجایی‌ها). عبارت جبری مورد نظر بر حسب مقادیر متغیرها در یک سری نقاط مجزا (نقاط گره‌ای) می‌باشد و در نقاط دیگر تعریف نشده است (صفری، ۱۳۸۰)

به طور کلی روش تفاضل محدود شبیه روش المان محدود می‌باشد و شامل تقسیم مدل به زیر بخش و المان می‌باشد. اما در این روش شرایط بارگذاری و تحلیل به صورت یک مرحله ای انجام نمی‌شود. در این روش شرایط بارگذاری و تحلیل مدل در فواصل زمانی بسیار کوتاه انجام شده و در هر مرحله فرض بر آن است که هر المان مستقل عمل می‌کند. در این روش، معلومات با مجهولات

1. Discontinuous deformation analysis

2. Bonded Particle model

مسئله بر مبنای روابط حرکت نیوتن در ریاضیات ارتباط داده می‌شود. در این روش، هر مشتق در معادلات حاکم مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه در فضا) می‌باشد، جایگزین می‌شود. تغییر مکان‌های جزئی گره‌ها به مختصات گره‌ها اضافه شده به صورتی که شبکه با مصالح ارائه شده آن حرکت نموده و تغییر مکان می‌دهد. نام این عمل، فرمول بندی لاگرانژی است که در این روش به کار می‌رود. بعضی تصور می‌کنند که روش تفاضل محدود به شبکه‌های المانی مستطیلی محدود می‌شود که در واقع اینچنین نمی‌باشد. روش تفاضل محدود را روش صریح<sup>۱</sup> می‌نامند بدین معنی که المان‌ها به طور مجزا تحلیل شده و تاثیر آنها بر المان بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مزایای روش تفاضل محدود می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

روش محاسبات به حل معادلات قانون حرکت نیوتن و قوانین بنیانی مواد برجا بر می‌گردد. در این روش، امکان تحلیل رفتار محیطی که درگیر زمان است نیز وجود دارد، بنابراین می‌توان مراحل گام به گام ایجاد گسیختگی در سازه را در هر مرحله داشت. مبنای ریاضی مدل ساده بوده و نیاز به تشکیل ماتریس سختی ندارد. از اینرو می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را بدون وجود مشکلات کامپیوتری، در تحلیل داشت. این روش در تحلیل سیالات، جریان‌ها و هیدرولیک نسبت به روش المان محدود جواب بهتری می‌دهد.

از معایب روش تفاضل محدود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در تحلیل‌های استاتیکی، نسبت به روش المان محدود وقت گیرتر می‌باشد.

- در تحلیل سازه‌های غیر سیال، نسبت به روش المان محدود ضعیف‌تر می‌باشد.

#### ۴-۴-۱- معرفی نرم‌افزار FLAC<sup>۲</sup>

نرم‌افزار FLAC2D یک برنامه تفاضل محدود دو بعدی می‌باشد که می‌تواند رفتار سازه‌های ساخته

<sup>۱</sup> Implicit

<sup>۲</sup> Fast Lagrangian Analysis Continua (FLAC)

شده از خاک، سنگ یا دیگر موادی را که ممکن است، پس از رسیدن به حدود پلاستیک دچار جریان پلاستیک شوند، شبیه‌سازی کند (Itasca, 2002). محلی که قرار است سازه زیرزمینی یا روباز در آن حفر شود، بوسیله شبکه‌ای از عناصر نمایش داده می‌شوند. این شبکه توسط کاربر طوری طراحی می‌شود که بر شکل سازه مورد نظر منطبق گردد. هر المان مطابق با یک قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می‌کند. اگر تنش‌ها به اندازه کافی زیاد باشند که سبب تسلیم شدن مواد و جریان آنها شوند، شبکه طراحی شده می‌تواند مطابق واقعیت (در حالت کرنش بزرگ) تغییر شکل یافته و همراه با مواد ذکر شده حرکت کند. به علاوه این نرم افزار، دارای چندین مدل رفتاری از پیش ساخته شده می‌باشد که به آن اجازه شبیه سازی عکس العمل‌های شدیداً غیرخطی و برگشت ناپذیر مواد زمین یا مواد مشابه دیگر را می‌دهد. این برنامه دارای مدل‌های عددی ویژه‌ای، جهت شبیه‌سازی واکنش مکانیکی مواد زمین می‌باشد. همچنین FLAC دارای مدل‌های رفتاری از پیش ساخته شده‌ای می‌باشد که از مدل فضای خالی برای نمایش حفاری‌ها در شبکه تا مدل‌های تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش سختی و کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل برگشت و غیرخطی را در بر می‌گیرند. این نرم افزار توانایی مدل‌سازی سازه‌هایی از قبیل پوشش‌های تونل، بولت‌ها، قطعات تسلیم پذیر یا شمع‌های صفحه‌ای که با سنگ یا خاک درونگیر خود اندرکش انجام می‌دهند را دارا است (Itasca, 2002).

#### ۴-۵- پارامترهای مورد سنجش در رفتارنگاری

یک برنامه ابزاربندی شامل نصب، قرائت و تفسیر نتایج می‌باشد. با اجرای یک برنامه رفتارنگاری مناسب می‌توان هر یک یا ترکیبی از پارامترهای زیر را به دست آورد.

- پارامترهای توده‌سنگ

۱- جابجایی‌ها<sup>۱</sup>

---

<sup>1</sup>. Displacement

- جابجایی افقی

- جابجایی قائم و یا مایل (با نقاط نشانه میکرو ژئودزی)، کشیدگی سنجهای گمانه‌ای یک نقطه‌ای<sup>۱</sup>

و چند نقطه‌ای<sup>۲</sup>.

۲- همگرایی<sup>۳</sup> (با متر نواری دقیق)

۳- تغییر تنش در سنگ (با تنش سنجهای گوناگون)

۴- فشار آب در حفره یا درزه (با پیزومتر)

- پارامترهای سیستم نگهدارنده

۱- همگرایی (با متر نواری دقیق)

۲- خیز (با انحناسنج)

۳- بار وارده (با سلول بارسنج<sup>۴</sup>)

۴- تنش وارده (با کرنش‌سنج و سلول فشارسنج)

#### ۴-۵-۱- ابزارهای نصب شده در مخزن

ابزار دقیق‌های مخزن نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ۸ ایستگاه در بخش‌های سست‌تر این مخزن

(زون گسله) نصب شده است، که شامل شش عدد بارسنج و دو عدد کشیدگی سنج چهارنقطه‌ای می-

باشند، لازم به ذکر است که کشیدگی سنج‌ها در راستای محور X (عمود بر دیواره) نصب شده‌اند.

محدوده‌ای که در آن ابزار دقیق نصب شده است در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود. همچنین مشخصات

بارسنج‌ها و کشیدگی‌سنج‌ها به ترتیب در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

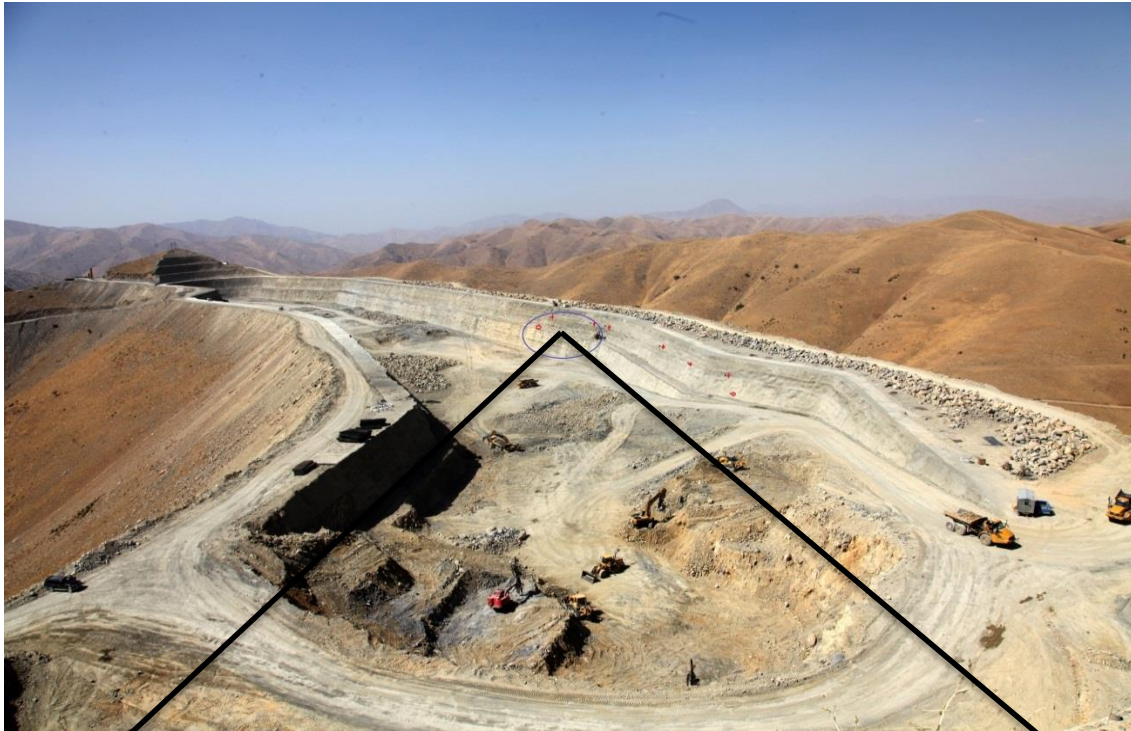
2. Single Point Borehole extensometer (SPBX)

3. Multiple Point Borehole extensometer (MPBX)

4. Convergence

5. Load cell





➡ : اکستنسومتر    ✨ : بارسنج

شکل ۳-۴: ابزار دقیق‌های نصب شده در مخزن بالادست (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

جدول ۴-۱: مشخصات بارسنج های نصب شده در مخزن (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

محل نصب		بارسنج
ارتفاع (متر)	کیلومتر	
۱۸۹۴/۶۹	۰+۶۷۴	۱
۱۸۹۵/۲۶	۰+۷۱۸	۲
۱۸۹۵/۲۵	۰+۷۳۲	۳
۱۸۹۶/۰۶	۰+۸۱۱	۴
۱۸۹۵	۰+۸۴۷	۵
۱۸۹۵	۰+۸۷۵	۶

جدول ۴-۲: مشخصات کشیدگی سنج های نصب شده در مخزن (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

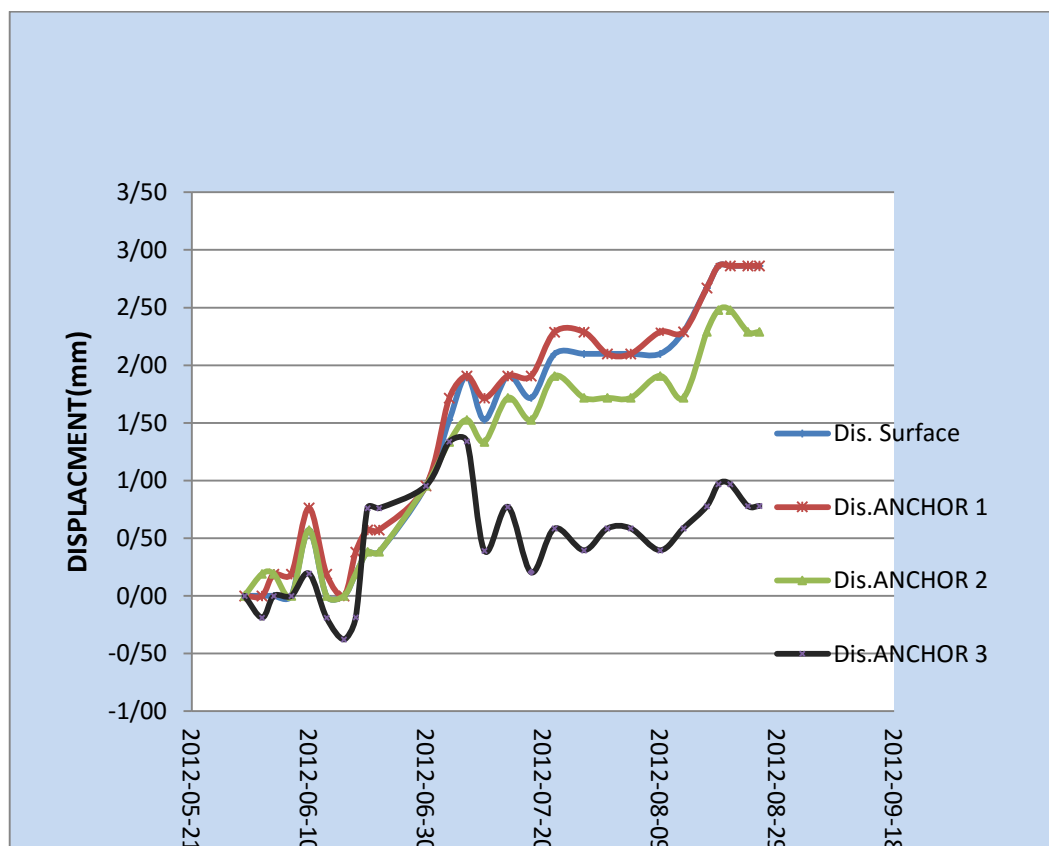
تاریخ نصب	طول راد (بر حسب متر)				محل نصب		کشیدگی سنج
	راد ۴	راد ۳	راد ۲	راد ۱	ارتفاع (متر)	کیلومتر	
۱۳۹۱/۳/۱۰	۱۲	۷	۳	۱	۱۸۹۰	۰+۶۷۲	۱
۱۳۹۱/۳/۱۰	۱۲	۷	۳	۱	۱۸۹۰	۰+۸۷۹	۲

جابجایی سنج ها عمود بر دیواره ترانشه نصب شده اند و جابجایی در راستای مذکور که همان در راستای X می باشد را اندازه گیری می کنند.

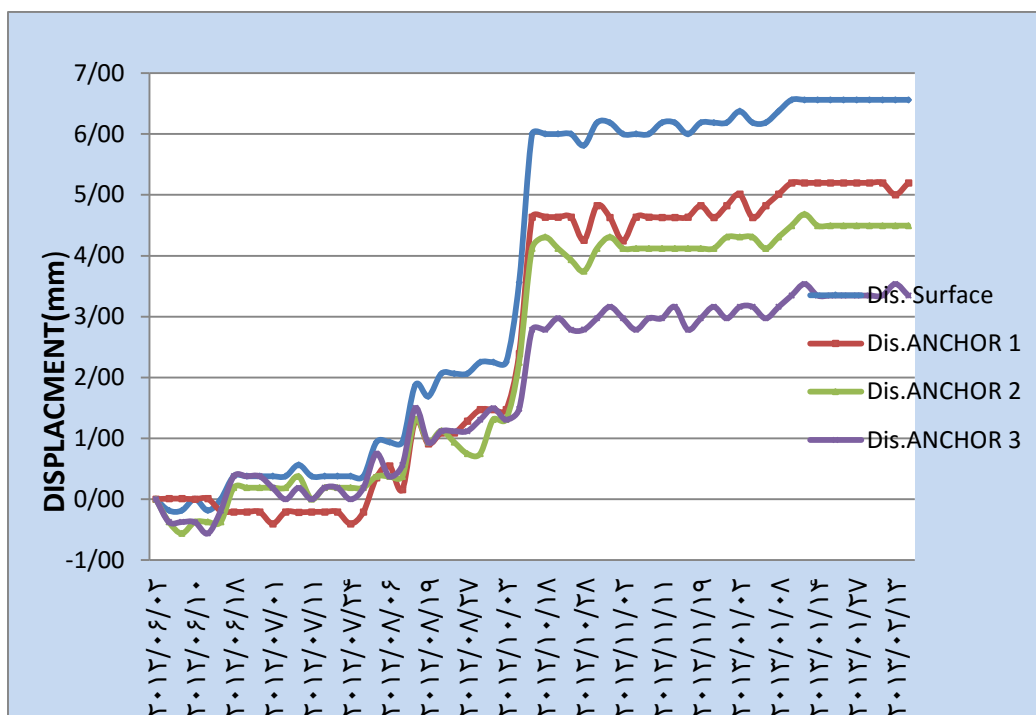
#### ۴-۵-۲- تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از کشیدگی سنج ها

تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از همگرایی سنجی را می توان به دو مرحله مجزا تفکیک نمود، که شامل مرحله اول، بررسی پایداری مخزن بر اساس نمودارهای همگرایی و در مرحله دوم استفاده از تحلیل برگشتی جهت ارزیابی پارامترهای حاصل از ابزار دقیق نصب شده در مخزن می باشد. تجزیه و تحلیل مرحله دوم نسبت به مرحله اول فرآیندی پیچیده تر و بالتبع آن نتایج حاصله نیز بیشتر و دقیق تر خواهند شد. در اینجا سعی می شود هر دو مرحله را در مورد داده های ابزار کشیدگی سنج مخزن مورد بررسی قرار گیرد.

در این مرحله بر اساس مشخصات نمودارهای همگرایی به ارزیابی شرایط پایداری مخزن در مرحله ساخت پرداخته می‌شود. مشاهده نمودارهای کشیدگی سنج‌های مخزن در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ نشان می‌دهد که همگی از یک روند کلی پیروی می‌کنند بدین ترتیب که پس از گذشت مدت زمانی از نصب ایستگاه و فاصله گرفتن سینه کار (دیواره شیروانی) از محل آن، جابجایی‌های توده سنگ درونگیر مخزن کم شده و به مقدار ثابتی همگرا می‌شود. بعبارت دیگر سیستم نگهداری موقت مورد استفاده کفایت تامین پایداری مخزن در این مرحله (مرحله ساخت) را می‌نماید و می‌توان به پایداری مخزن و ایمنی عملیات اطمینان داشت. قاعدتاً مدت زمانی که پس از حفر مخزن تا زمان تثبیت همگرایی لازم است، برای ایستگاههای مختلف یکسان نیست که این موضوع را می‌توان ناشی از تفاوت بین شرایط ژئومکانیکی ساختگاه مخزن در محل ایستگاههای مختلف و همچنین تفاوت در مشخصات سیستم نگهداری دانست.



شکل ۴-۴: جابجایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی سنج شماره ۱



شکل ۴-۵: جابجایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی سنج شماره ۲

## ۴-۶- مدل سازی مخزن بالادست

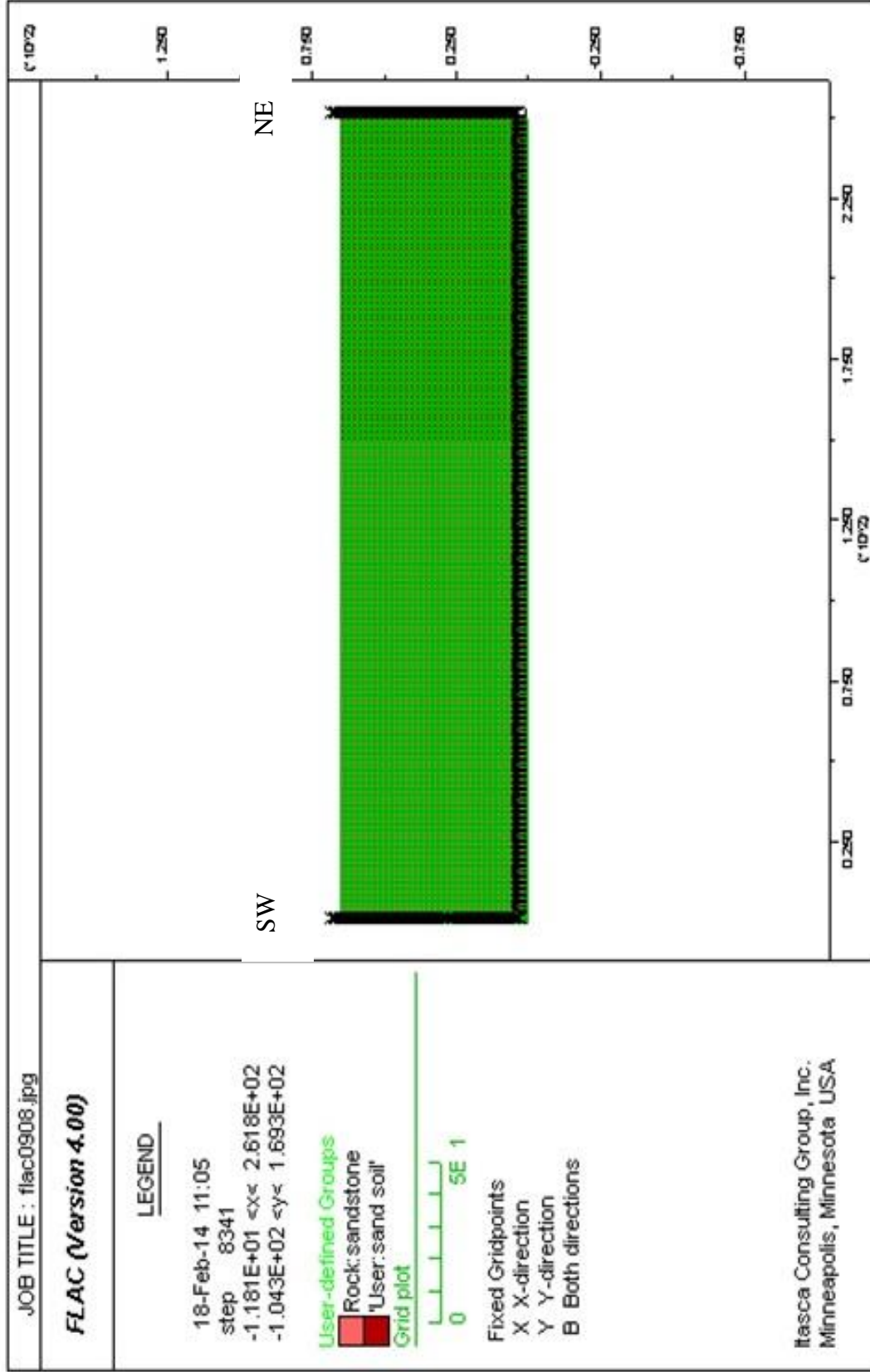
### ۴-۶-۱- تعیین ابعاد مدل و ترسیم هندسه آن

هر تغییری که در محیط ایجاد می‌شود توزیع تنش را در محدوده ای از محیط به نام ناحیه تاثیر، تغییر می‌دهد. وقتی یک سازه در دل زمین حفر می‌شود، قسمتی از خاک و سنگ‌های پیرامون آن دچار تغییر الاستیک و یا پلاستیک می‌شوند. اندازه و ابعاد مدل عددی باید بگونه ای باشد که این تاثیرات در آن قابل مشاهده و بررسی باشد. در مدل سازی عددی مربوط به مخزن بالادست سد آزاد، روی اندازه‌های مختلف مدل، آنالیز حساسیت انجام گرفت. به این مفهوم که با ابعاد مختلف مدل سازی صورت گرفته و تاثیر زون حفاری را روی هر یک از مدل‌ها بررسی کرده و مناسب ترین مدل با اندازه ۶۵ \* ۲۵۰ (ارقام بر حسب متر می‌باشند) مطابق شکل ۴-۶ انتخاب و تحلیل های لازم روی آن انجام می‌شود. چندین مدل رفتاری در برنامه موجود می‌باشد که بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. در این تحقیق مدل موهر-کولمب برای بررسی توده سنگ منطقه مورد

مطالعه استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی در جدول ۳-۴ آمده است. همچنین مقطع مورد نظر بر روی شکل ۲-۶ با علامت AA در فصل دوم مشخص شده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی

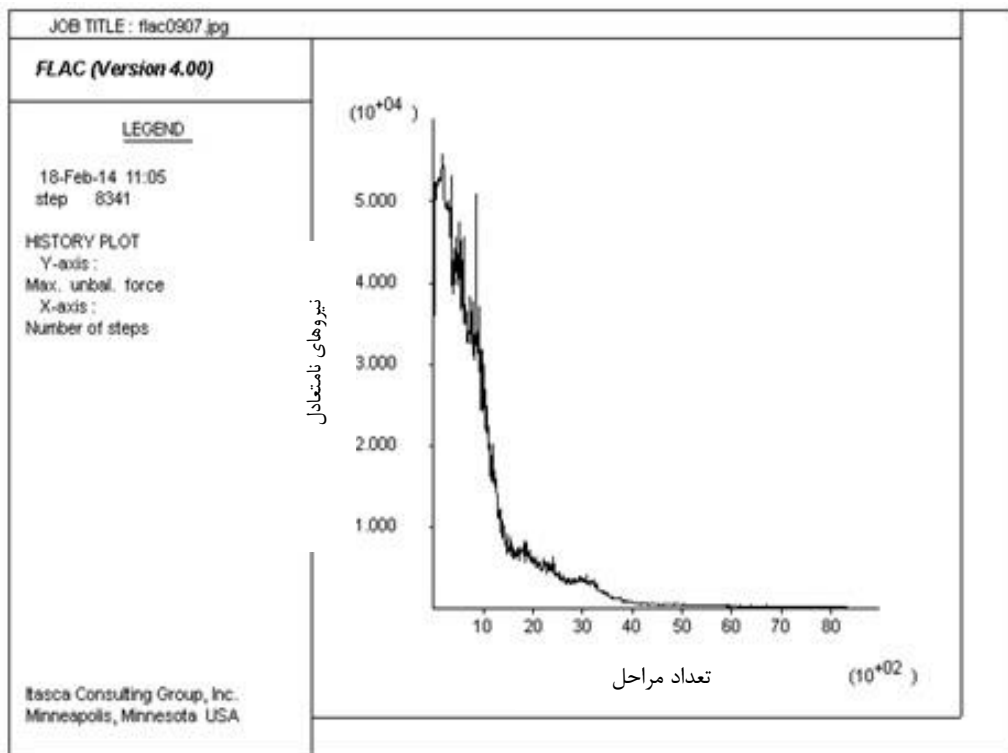
پارامترهای مدل	مدول الاستیسیته (Gpa)	چسبندگی (Kpa)	زاویه اصطکاک (deg)	مدول بالک (Gpa)	مدول برشی (Gpa)
بلوک ۴ (B <sub>4</sub> )	۱/۲۲	۱۱۱	۳۴	۰/۸۳۳	۰/۳۸۴
بلوک ۶ (B <sub>6</sub> )	۳	۲۲۰	۴۶	۲/۵	۱/۱۵



شکل ۴-۶: مدل دوبعدی مخزن بالادست قبل از حفاری در امتداد پروفیل AA، شکل

#### ۴-۶-۲- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری

سعی بر آن بوده است تا فرآیند، مطابق با روند موجود در طبیعت و شرایط مدل نیز نزدیک به واقعیت مدل‌سازی شود. در مدل‌سازی عددی قبل از حفر مخزن، مدل با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی (جدول ۴-۳)، شرایط مرزی که با توجه به نوع تحلیل (استاتیکی) گیردار می‌باشد و تنش‌های برجا که برابر ۰/۵ می‌باشد، اجرا می‌شود. برای اطمینان از به تعادل رسیدن مدل باید تاریخچه نیروهای متعادل را کنترل کرد. در حالت تعادل، نسبت نیروهای نامتعادل باید کمتر از ۰/۰۰۱ بوده و تمایل نمودار به صفر باشد (Itasca, 2002). همانطور که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود، نمودار نیروهای نامتعادل در نهایت به صفر میل کرده است.



شکل ۴-۷: نمودار نیروهای نامتعادل در پایداری اولیه مدل

بنابراین مدل در این حالت به تعادل اولیه رسیده و شرایط طبیعی زمین را دارا خواهد بود.

سیستم نگهداری اولیه مقطع مخزن ترکیبی از شاتکریت و راک بولت تزریقی می‌باشد. راک بولت با طول ۴ و ۶ متری و با قطر ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. قطر چاله‌ها جهت نصب راک بولت ۸۶ میلی‌متر می‌باشد (مه‌باب قدس، ۱۳۹۱). خصوصیات شاتکریت و راک بولت در جدول ۴-۴ و جدول ۴-۵ آمده است. برای اطلاع از چگونگی بدست آمدن پارامترهایی از قبیل سختی برشی و مقاومت چسبندگی مذکور در جدول ۴-۴ می‌توان به منبع (ضمیران، ۱۳۹۱) رجوع کرد.

جدول ۴-۴: خصوصیات شاتکریت در بلوک‌های ۴ و ۶

بلوک ۶	بلوک ۴	خصوصیات شاتکریت
۲/۳	۲/۳	چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )
۲۲	۲۲	مدول الاستیسیته (Gpa)
۰/۲	۰/۲	ضریب پواسون
۴۰	۴۰	مقاومت فشاری (Mpa)
۸/۱۲	۲/۷۱	سختی برشی (Gpa)
۰/۱۵	۰/۲۵	ضخامت (m)
۵۹/۴	۳۴/۳	مقاومت چسبندگی (KN/m)

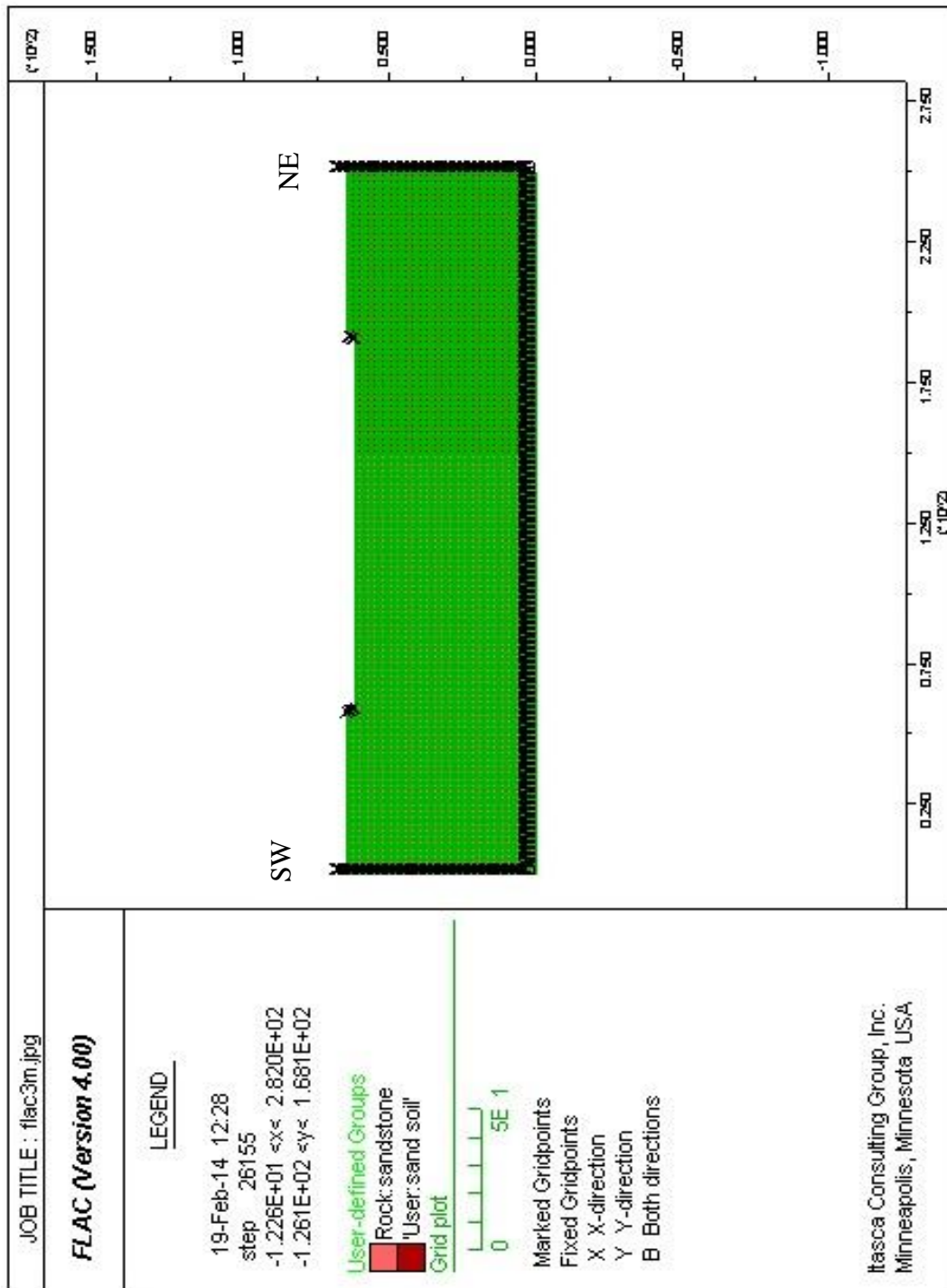
جدول ۴-۵: خصوصیات راک بولت بلوک‌های ۴ و ۶ (مه‌باب قدس، ۱۳۹۱)

بلوک ۶	بلوک ۴	خصوصیات بولت
۶ و ۴	۶ و ۴	طول (m)
۲۰۰	۲۰۰	مدول الاستیسیته (Gpa)
۲۵	۲۵	قطر (mm)
۰/۲۳۸	۰/۲۳۸	مقاومت کششی (Mpa)
۲/۷×۲/۷	۱/۴×۱/۴	آرایش پیچ سنگ (m)
۰/۳	۰/۳	ضریب پواسون

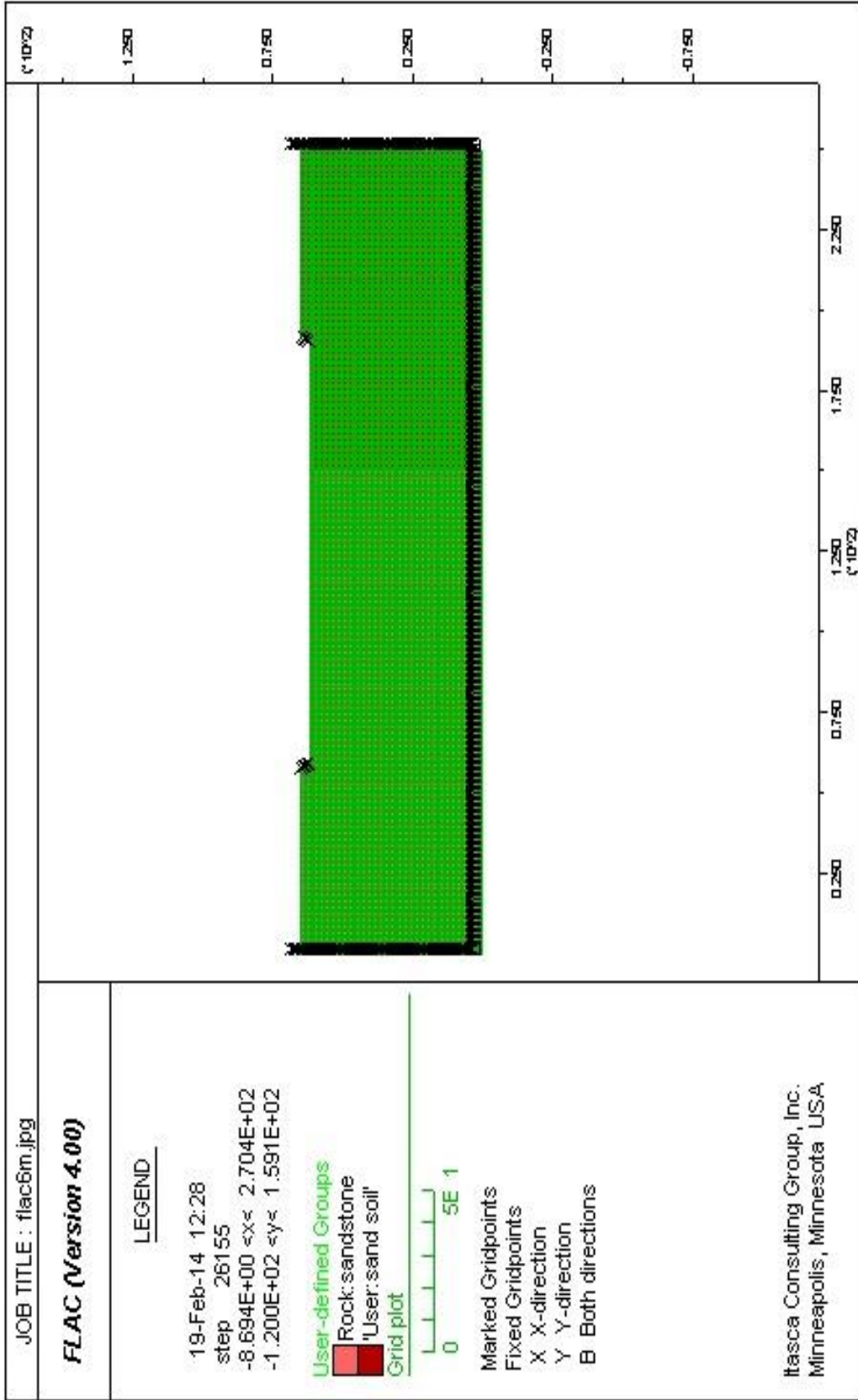
از آنجا که حفر مخزن به صورت مرحله به مرحله انجام گرفته و در هر مرحله، ۳ متر (ارتفاع) حفر و پس از آن سیستم نگهداری موقت شامل شاتکریت و راک بولت نصب شده است، در مدل‌سازی نیز



سعی بر آن است که شرایط طبق واقعیت مدل شود و به همین دلیل حفر مخزن به صورت مرحله به مرحله صورت گرفته است. که در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ دو مرحله حفر نشان داده شده است.

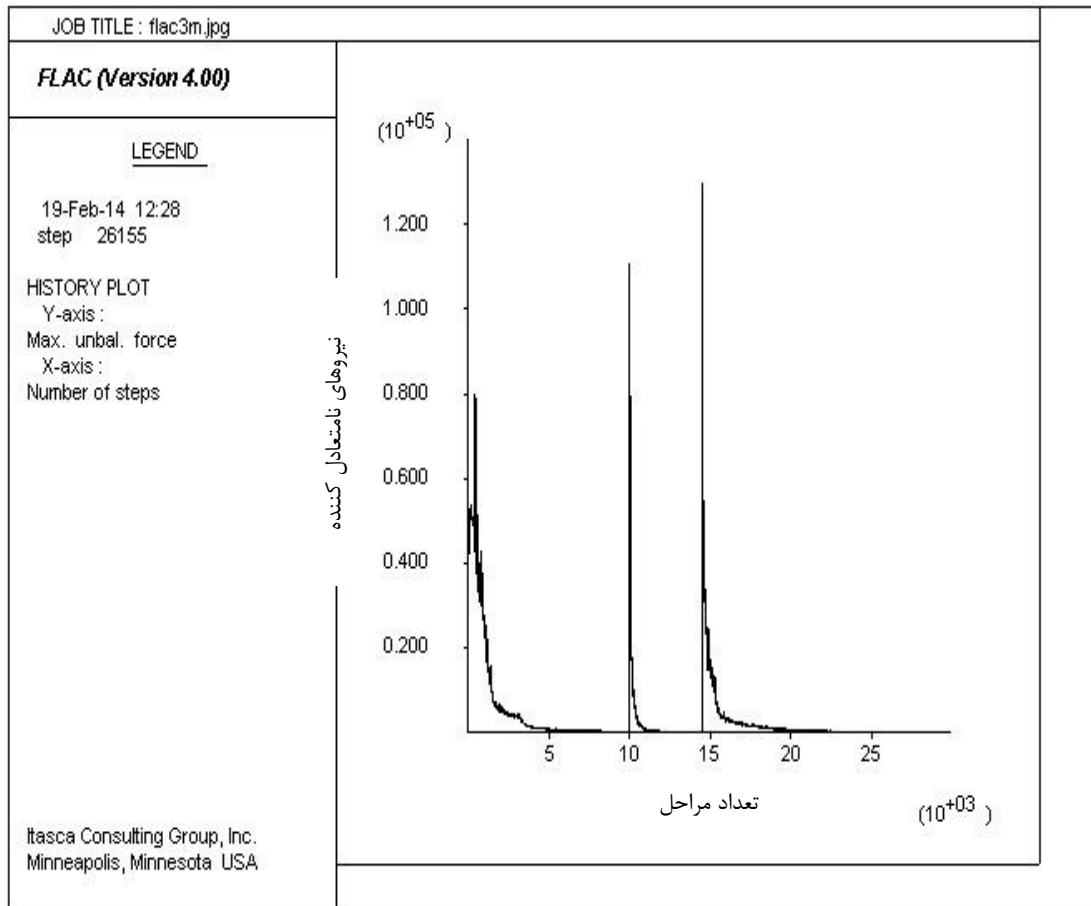


شکل ۴-۸: مدل دوبعدی حفر ۳ متر اول مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت



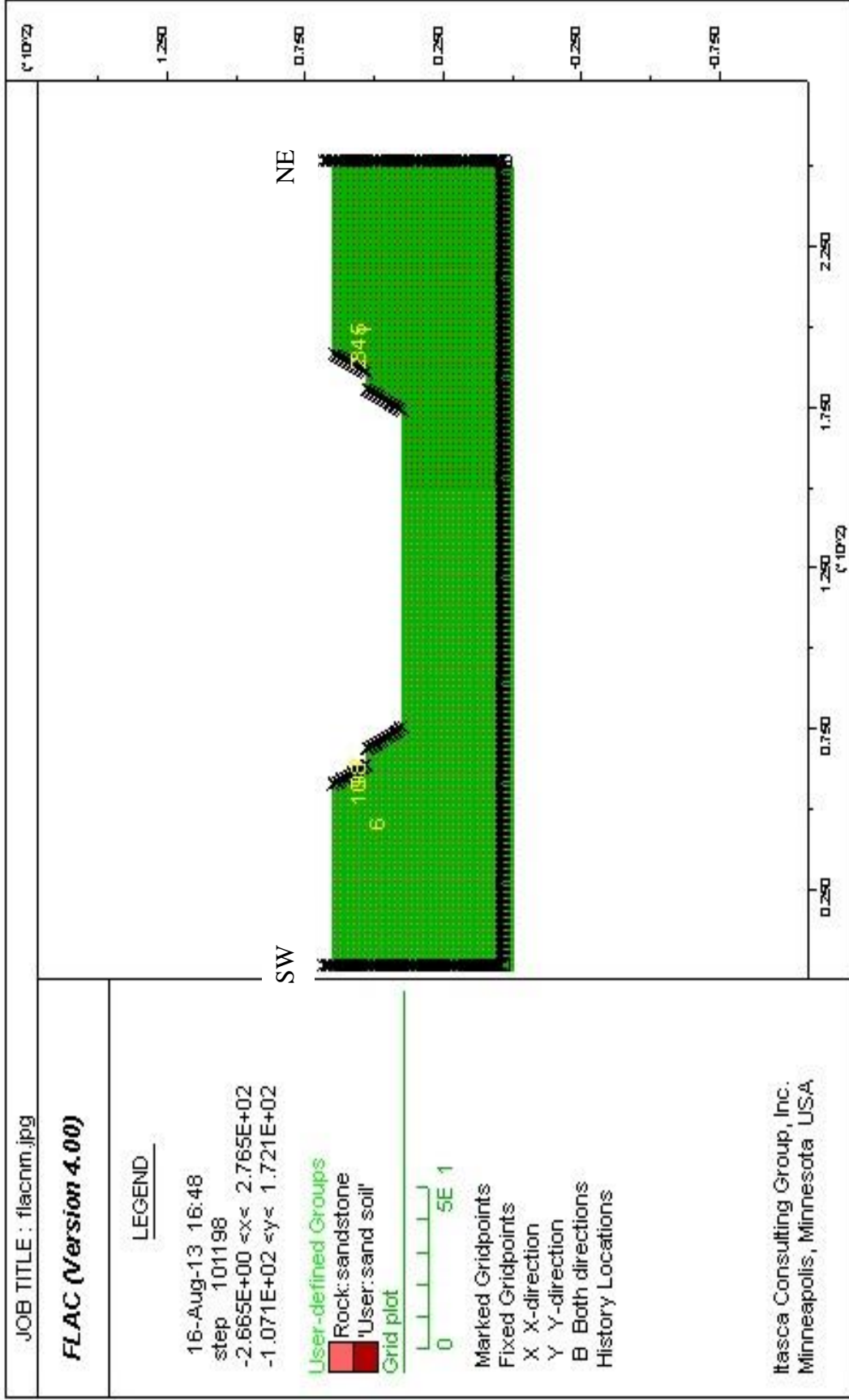
شکل ۴-۹: مدل دوبعدی حفر ۶ متر اول مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت

در حالت تعادل، نسبت نیروهای نامتعادل باید کمتر از ۰/۰۰۱ بوده و تمایل نمودار به سمت صفر می‌باشد. همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، نمودار نیروهای نامتعادل در نهایت به صفر میل کرده است.



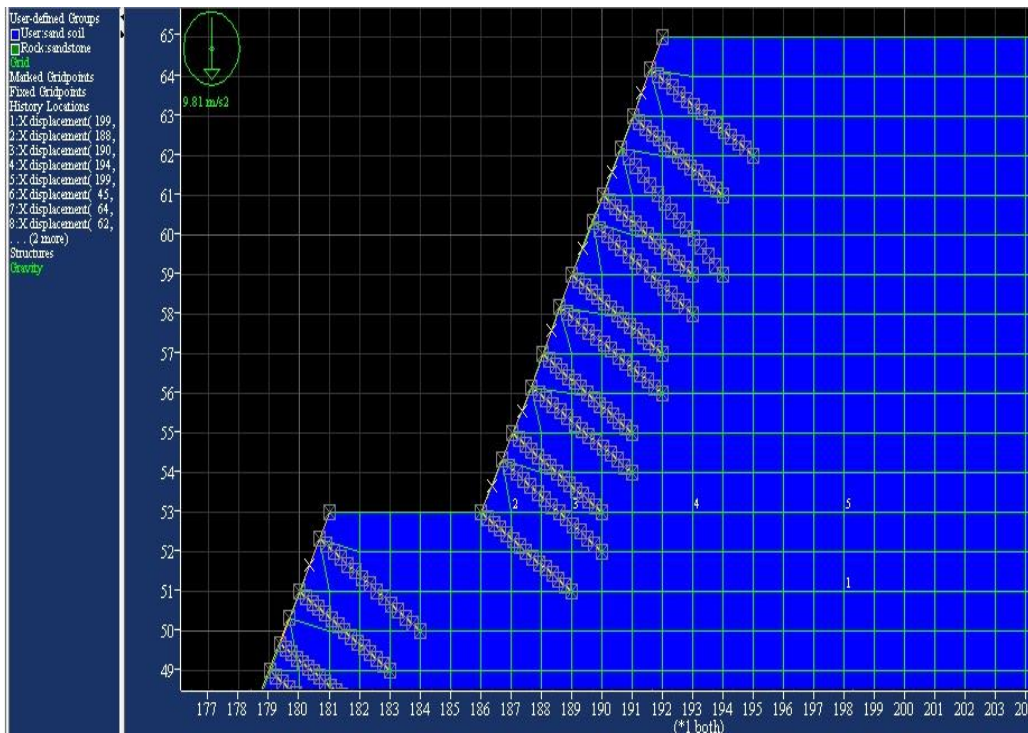
شکل ۴-۱۰: نمودار نیروهای نامتعادل کننده در دو گام اول حفاری (۶ متری)

با ادامه روند حفاری به صورت مذکور (مرحله به مرحله) و نصب سیستم نگهداری آن با مشخصات جدول ۴-۴ و جدول ۴-۵ در هر مرحله از حفاری و به تعادل رساندن آن، در نهایت مدل دو بعدی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد به صورت شکل ۴-۱۱ می‌باشد.



شکل ۱-۴: مدل دویعدی مخزن و نصب سیستم نگهداری موقت

نمایی از بلوک ۴ (قسمت شمال شرقی مخزن) با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲: نمایی از بلوک ۴ (قسمت شمال شرقی مخزن)

در بین ایستگاه‌های رفتار سنجی، کشیدگی سنج شماره ۱ واقع در ایستگاه ۶۷۲+۰ که محل آن بر روی شکل ۴-۳ با علامت EX<sub>1</sub> مشخص شده است، برای تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومتی انتخاب گردید. همچنین با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و نقشه‌های زمین شناسی در می‌یابیم که بعد از فاصله ۱۲ متری (افقی) و عمق قرارگیری ۱۲ متر پایین تر از سطح زمین (گام آخر اکستنسومتر)، باتوده ماسه سنگی با شرایط ژئومکانیکی نزدیک به سنگ بکر می‌رسیم. با در نظر گرفتن این مساله از مقادیر جابجایی‌های نسبی کشیدگی سنج مذکور نصب شده در دیواره نسبت به نقطه گیرداری در فاصله ۱۵ متری استفاده شده است.

#### ۴-۶-۳- مقایسه نتایج ابزار دقیق با مدل سازی عددی

پس از انتخاب مقطع مناسب ابزار دقیق و بررسی نتایج آنها و نیز پس از مدل سازی مخزن و فضای در برگیرنده آن، برای مقایسه بین نتایج ابزار دقیق و نتایج تحلیل عددی می بایستی پارامترهای ورودی به نرم افزار بر اساس، پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه انتخاب شود. با انجام تحلیل برگشتی و تعیین دقیق پارامترهای ژئومکانیکی به وسیله این روش می توان به پارامترهای ورودی برای مدل سازی های بعدی از جمله تحلیل های نگهداری مخزن از نظر پایداری و تعیین ایمنی نگهداری و نیز تحلیل دینامیکی در مقابل بارهای ناشی زلزله احتمالی و تعیین و پیش بینی جابه جایی هایی مخزن در شرایط وقوع زلزله که مسأله بسیار مهمی است، پرداخته شود. هدف از انجام تحلیل برگشتی تخمین پارامترهای مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ میزبان با کمینه کردن اختلاف میان جابه جایی های ثبت شده توسط کشیدگی سنج ها و محاسبه شده توسط مدل های عددی است. این عمل از طریق ایجاد مدل های عددی مکرر با پارامترهای ژئومکانیکی متفاوت و بررسی روند تغییرات تابع خطا انجام می شود (مهدوری و فتحی سلمی، ۱۳۸۶).

#### ۴-۶-۴- انتخاب پارامترهای معلوم و مجهول برای انجام تحلیل برگشتی

برای انتخاب پارامترها در انجام یک تحلیل برگشتی باید به موارد زیر توجه نمود:

۱- پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر روی پایداری حفاری های روباز دارند.

۲- پارامترهایی که بدست آوردن آنها با استفاده از روش های دیگر مشکل است.

۳- کاهش تعداد پارامترهای مجهول تا اینکه امکان تحلیل برگشتی باشد.

برای طراحی و ساخت حفاریات روباز، استحکام، تغییر شکل پذیری توده سنگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از مهمترین پارامترها می باشند. مدول تغییر شکل پذیری یکی از مهمترین پارامترها در کنترل رفتار تغییر شکل توده سنگ می باشد. برای انجام تحلیل برگشتی، در این تحقیق بازه مناسب

برای پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با استفاده از مقادیر ذکر شده برای بلوک‌های شش گانه در جدول ۴-۲ فصل دوم استفاده می‌شود که مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین آن‌ها در جدول ۴-۶ نیز ذکر شده است.

جدول ۴-۶: محدوده پارامترهای مجهول توده سنگ مخزن واقع در بلوک‌های شش گانه

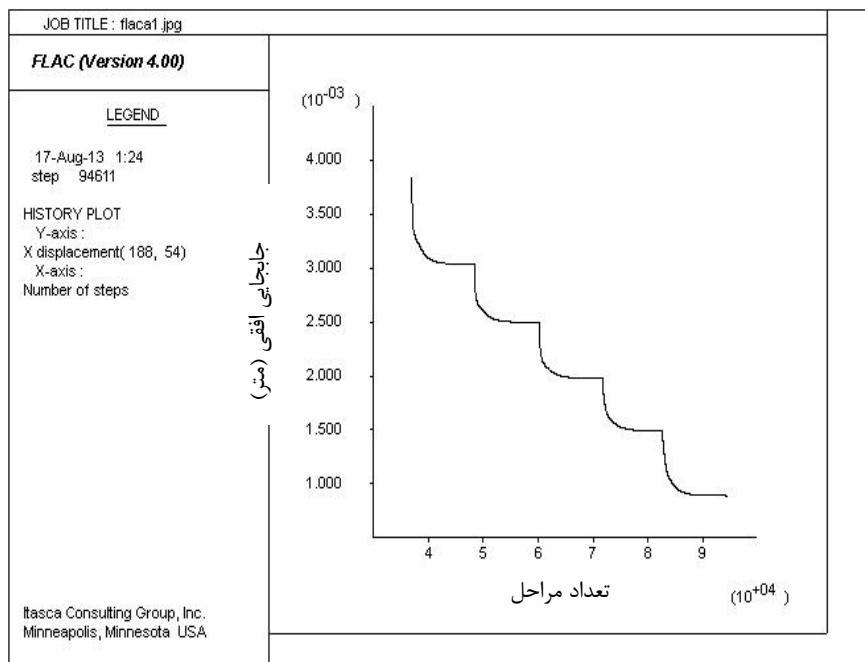
پارامترهای مجهول	حداقل	حداکثر	میانگین
مدول تغییر شکل پذیری (Gpa)	۰/۵	۳	۱/۷۵
چسبندگی (kPa)	۵۰	۱۵۰	۱۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	۲۰	۴۰	۳۰

#### ۴-۷- روش کار

با توجه به موارد فوق، برای تحلیل برگشتی نتایج قرائت‌های انجام شده در مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد از روش تحلیل برگشتی مستقیم استفاده شده است. در مرحله اول با استفاده از مدل‌سازی و نیز با ثابت در نظر گرفتن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و همچنین استفاده از مدل الاستیسیته به عنوان پارامتر متغیر تا رسیدن به نقطه بهینه با خطایی کمتر از ۱ درصد به مدل‌سازی ادامه خواهیم داد. با توجه تعداد زیاد نمودارهای حاصل از تحلیل در اینجا نتایج یکی از مدل‌سازی‌ها با ویژگی‌های ژئومکانیکی مذکور در جدول ۴-۷ به صورت جابجایی در راستای x در گام‌های ۱ متری، ۳ متری، ۷ متری و ۱۲ متری سینه کار شیروانی به ترتیب در شکل ۴-۱۳ الی شکل ۴-۱۶ در زیر نشان داده شده است. که با توجه به شکل‌های مربوطه جابجایی‌های افقی در راستای عمود بر دیواره شیب به ترتیب برابر ۳، ۲/۹، ۲/۴ و ۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که این نمودارها برای ۵ مرحله حفاری (۳ متری)، بعد از حفاری تا رسیدن محل نصب اکستنسومترها می‌باشد.

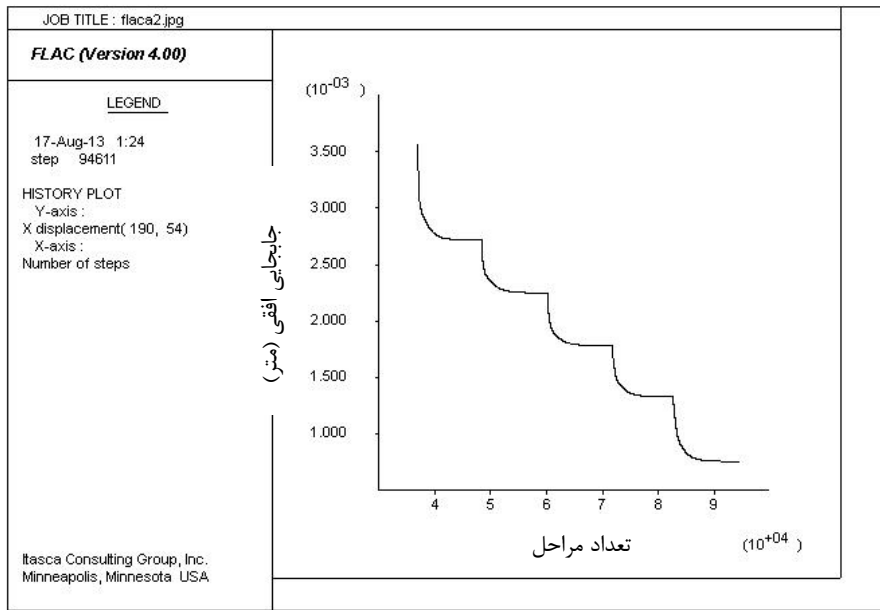
جدول ۴-۷: پارامترهای ژئومکانیکی در نظر گرفته شده برای یکی از تحلیل‌ها

مقدار	پارامترهای مجهول
۱	مدول تغییر شکل پذیری (Gpa)
۱۵۰	چسبندگی (kPa)
۳۵	زاویه اصطکاک داخلی

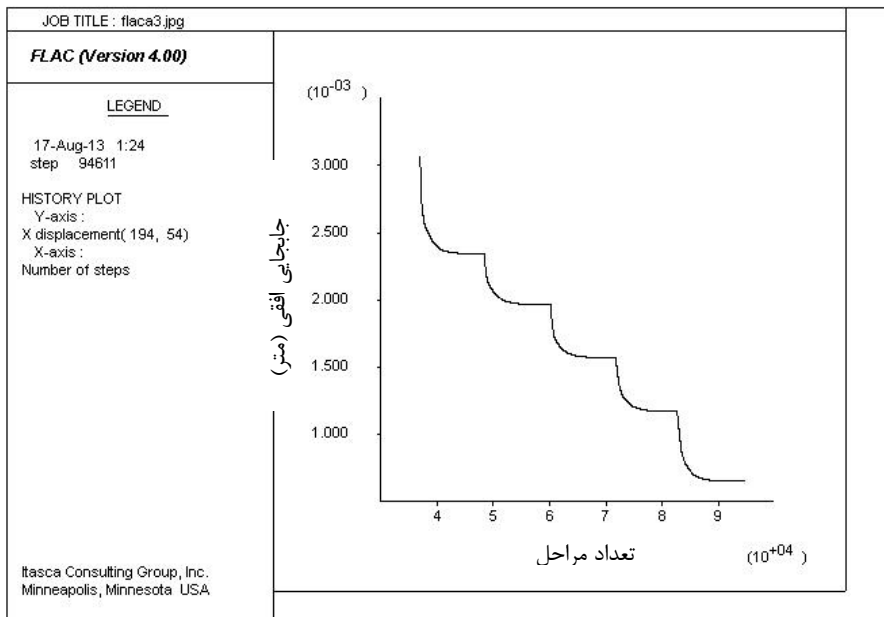


شکل ۴-۱۳: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۱ متری اکستنسومتر

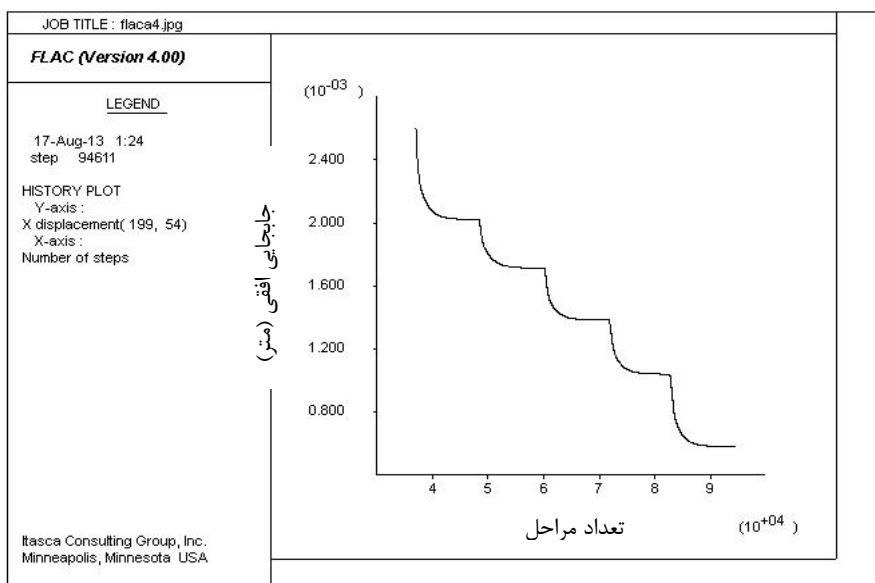




شکل ۴-۱۴: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۳ متری آکستنسومتر



شکل ۴-۱۵: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۷ متری آکستنسومتر



شکل ۴-۱۶: جابجایی افقی (متر) بدست آمده از مدل در گام ۱۲ متری اکستنسومتر

#### ۴-۷-۱- تحلیل برگشتی دو بعدی با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره

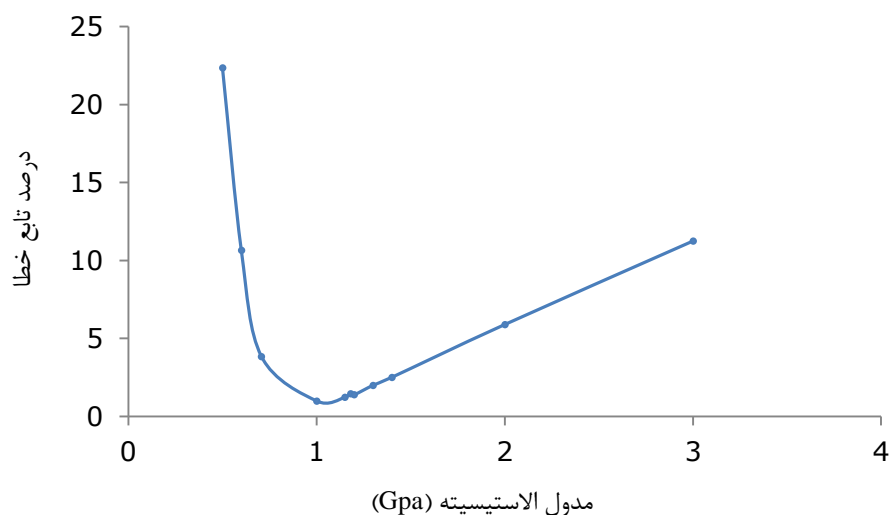
روش الگوریتم تک متغیره مقدار بهینه پارامترهای ژئوتکنیکی از قبیل مدول الاستیسیت، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ را صرف نظر از مقدار اولیه آنها به طرز موفقیت آمیزی جستجو می نماید. روش بهینه سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطایی که توسط رابطه ۴-۱ معرفی گردید به کار می رود (Vardakos, 2007).

#### ۴-۷-۲- نمودار خطای همگرایی پارامترها

با استفاده از روش تک متغیره مستقیم میزان خطا از رابطه ۴-۱ محاسبه گردید. در این نمودارها میزان خطا با نزدیک شدن به مقدار واقعی پارامتر مورد نظر کاهش یافته و با دور شدن از مقدار واقعی پارامتر افزایش می یابد. خطای ناشی از مدل سازی در جدول ۴-۸ آورده شده است. میزان خطا با توجه به تغییرات مدول الاستیک در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است، که کمترین میزان خطا برای مدول الاستیک ۱ گیگا پاسکال می باشد.

جدول ۴-۸: خطای ناشی از مدل سازی در مدول الاستیسیته های مختلف

مدل	مدول الاستیسیته (Gpa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	چسبندگی (Kpa)	درصد خطا
۱	۰/۵	۳۵	۱۵۰	۲۲/۳۶۰۴
۲	۰/۶	۳۵	۱۵۰	۱۰/۶۶۲۰۱
۳	۰/۷	۳۵	۱۵۰	۳/۸۴۶۳
۴	۱	۳۵	۱۵۰	۰/۹۹۲۰۲
۵	۱/۱۵	۳۵	۱۵۰	۱/۲۱۹۵۵۱
۶	۱/۱۸	۳۵	۱۵۰	۱/۴۵۵۳۰۷
۷	۱/۲	۳۵	۱۵۰	۱/۳۹۱۰۶۱
۸	۱/۳	۳۵	۱۵۰	۱/۹۹۵۴۱۹
۹	۱/۴	۳۵	۱۵۰	۲/۵۰۸۳۸
۱۰	۲	۳۵	۱۵۰	۵/۸۹۳۸۵
۱۱	۳	۳۵	۱۵۰	۱۱/۲۴۸۳۸



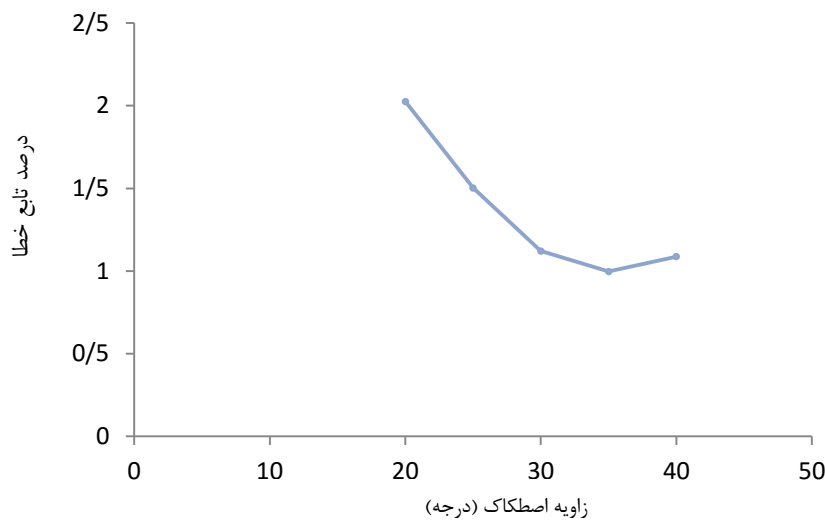
شکل ۴-۱۷: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف مدول الاستیسیته

با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار بالا مشاهده می شود که تابع خطا در مقدار  $E=1 \times 10^9$  به کمینه مقدار خود رسیده به عبارت دیگر به نقطه بهینه دست یافته ایم.

در مرحله بعد با ثابت نگه داشتن مدول الاستیسیته و چسبندگی و متغیر در نظر گرفتن زاویه اصطکاک در بازه [۲۰،۴۰] ، تا رسیدن به نقطه بهینه با خطایی کمتر از ۱ درصد به مدل سازی ادامه می دهیم، خطای ناشی از مدل سازی در جدول ۴-۹ قابل مشاهده می باشد. همچنین در شکل ۴-۱۸ تغییرات خطا در مقابل زاویه اصطکاک داخلی نشان داده شده است.

جدول ۴-۹: خطای ناشی از مدل سازی در زاویه اصطکاک های مختلف

مدل	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	مدول الاستیسیته (Gpa)	چسبندگی (Kpa)	درصد خطا
۱	۲۰	۱	۱۲۷	۲/۰۲۵۵۸۷
۲	۲۵	۱	۱۲۷	۱/۵۰۲۶۸۲
۳	۳۰	۱	۱۲۷	۱/۱۲۱۰۰۶
۴	۳۵	۱	۱۲۷	۰/۹۹۷۲۰۷
۵	۴۰	۱	۱۲۷	۱/۰۸۷۰۳۹



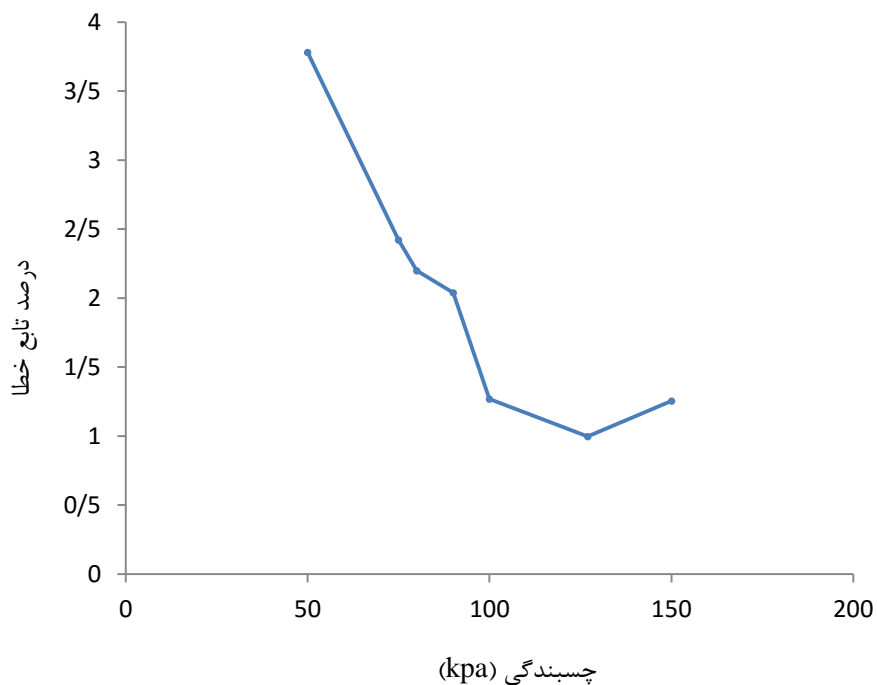
شکل ۴-۱۸: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک

با توجه به نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۸ مشاهده می شود که تابع خطا در مقدار زاویه اصطکاک ۳۵ درجه به حداقل مقدار خود رسیده به عبارت دیگر به نقطه بهینه دست یافته ایم. در مرحله آخر نیز با ثابت نگه داشتن دو پارامتر بدست آمده مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک و

متغیر نمودن چسبندگی طبق جدول ۴-۱۰ تا رسیدن به نقطه بهینه با خطایی کمتر از ۱ درصد به مدل سازی ادامه می دهیم. همچنین در شکل ۴-۱۹ نیز تغییرات خطا در مقابل چسبندگی داخلی نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۰: خطای ناشی از مدل سازی در چسبندگی های مختلف

مدل	چسبندگی (Kpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	درصد خطا
۱	۵۰	۱	۳۵	۳/۷۸۰۷
۲	۷۵	۱	۳۵	۲/۴۲۱۲۳
۳	۸۰	۱	۳۵	۲/۱۹۸۶۶
۴	۹۰	۱	۳۵	۲/۰۲۸۶۶
۵	۱۰۰	۱	۳۵	۱/۲۶۹۳۸
۶	۱۲۷	۱	۳۵	۰/۹۹۷۳
۷	۱۵۰	۱	۳۵	۱/۲۵۴۲



شکل ۴-۱۹: نمودار تابع خطا در مقادیر مختلف چسبندگی

با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار فوق مشاهده می شود که تابع خطا در مقدار چسبندگی

۱۲۷ کیلو پاسکال به کمینه مقدار خود رسیده و به عبارت دیگر به نقطه بهینه دست یافته‌ایم. در نهایت مقادیر حاصل از تحلیل برگشتی و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ بلوک ۴ (B4) حاصل از رده‌بندی توده سنگ به روش GSI در آمده است.

جدول ۴-۱۱: مقایسه پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ حاصل از تحلیل برگشتی و طبقه‌بندی GSI بلوک ۴

زاویه اصطکاک داخلی (deg)	چسبندگی (Kpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	بلوک ۴
۳۳/۸۹	۱۱۱	۱/۲۲	طبقه‌بندی GSI
۳۵	۱۲۷	۱	تحلیل برگشتی

جدول فوق نشان می‌دهد در بلوکی که ابزار دقیق‌ها در آن نصب شده‌اند (بلوک ۴)، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ حاصل از طبقه‌بندی GSI که عبارتند از مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱/۲۲ گیگا پاسکال، ۱۱۱ کیلو پاسکال و ۳۳/۸۹ درجه می‌باشد. و نیز نتایج حاصل از تحلیل برگشتی با استفاده از روش تک متغیره مستقیم در بالا آمده است که مدل-سازي جهت رسیدن این مقادیر به خطایی کمتر از یک درصد ادامه داشته است. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل برگشتی و طبقه‌بندی GSI می‌توان به دقت مدل‌سازی پی برد.

#### ۴-۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج مدل‌سازی عددی بر اساس مدل رفتاری موهر-کلمب مقایسه شود. با توجه به این که پارامترهای مقاومتی توده سنگ که در مدل‌سازی استفاده می‌شود، حاصل از نتایج آزمایشگاهی است و از طرفی فرضیات ساده شونده‌ای مانند فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسانگرد بودن توده سنگ به طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار و نتایج دور از انتظار نیست. اما با کمینه کردن خطا با استفاده از روش جستجوی تک متغیره سعی در یافتن مقدار بهینه برای پارامترهای ژئومکانیکی شده

است. استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم با الگوریتم جستجوی تک متغیره، روشی سریع برای ارزیابی پارامترهای کنترل کننده رفتار سازه می باشد. زمانی این الگوریتم مفید واقع می شود که پارامترهای ژئومکانیکی مدل مناسب انتخاب گردند. همچنین میزان مدول تغییر شکل پذیری و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از این الگوریتم به ترتیب مقادیر ۱ گیگاپاسکال، ۱۲۷ کیلوپاسکال و ۳۵ درجه به دست آمد.

## فصل پنجم

### تحلیل دینامیکی مخزن بالادست سد آزاد



## ۵-۱- مقدمه

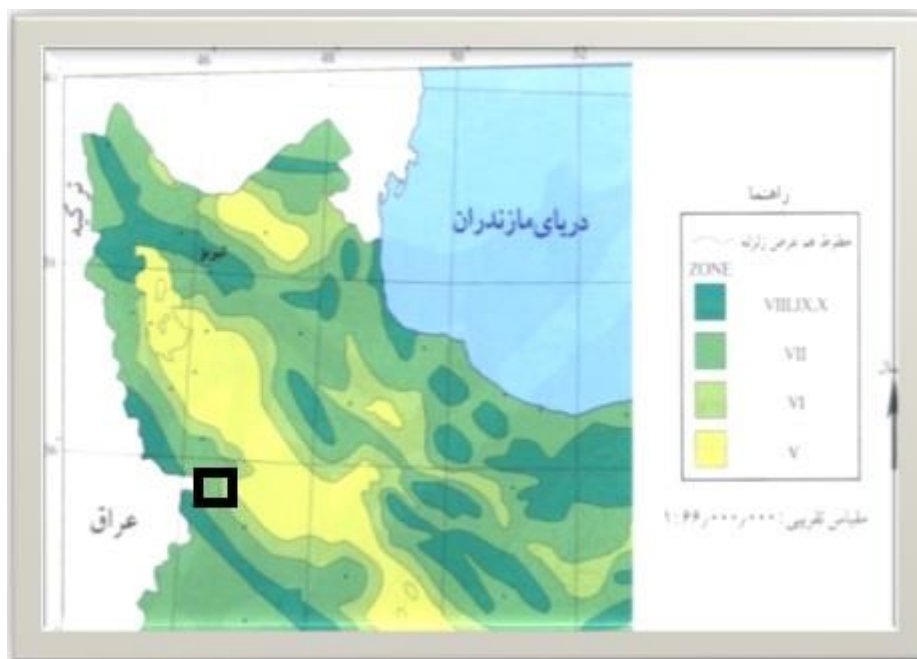
میزان لرزه‌خیزی ساختگاه یکی از عوامل موثر در طراحی سازه‌های مختلف اعم از ساختمانها، سازه‌های زیرزمینی و سدها و دیگر سازه‌های سنگی می باشد. تحلیل لرزه ای سازه‌های مختلف اغلب با دو رویکرد استفاده از روش شبه استاتیک و روش دینامیکی قابل انجام می باشد. روش شبه استاتیک روشی معمول در مطالعه پایداری لرزه ای سازه‌های مختلف بوده و بر اساس این روش بررسی پایداری سازه در مقابل زلزله با معادل سازی نیروی زلزله با یک نیروی ثابت افقی انجام می شود و بدین وسیله پایداری سازه در مقابل زلزله مورد ارزیابی قرار می گیرد (شیردل و همکاران، ۱۳۹۰). زلزله به عنوان یکی از مخربترین عوامل طبیعی است که از دیدگاه مهندسی، اهمیت آن به لحاظ تأثیراتی است که در سازه‌هایی نظیر سدها، سازه‌های سنگی، پل‌ها، مناطق مسکونی و تأسیسات صنعتی ایجاد می‌نمایند. ارزیابی پاسخ زمین به زلزله یکی از مسائل مهم در ژئوتکنیک لرزه‌ای است. تحلیل‌های پاسخ زمین جهت پیش بینی حرکات سطح زمین و تدوین طیف پاسخ طرح به منظور تعیین کرنشهای دینامیکی برای ارزیابی خطرات ناشی از زمین لرزه به کار می‌رود (برارپور و مکاران ۱۳۹۰).

در این فصل ضمن جمع آوری اطلاعات لرزه‌خیزی منطقه و گسل‌های موجود، ابتدا خطر لرزه‌خیزی منطقه با استفاده از روش تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه پایداری دیواره‌های سنگی شیب‌دار مخزن بالادست سد آزاد در مقابل نیروهای دینامیکی زلزله‌های احتمالی با ارائه مدل‌های دینامیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

## ۵-۲- مشخصات لرزه‌ای ساختگاه مخزن بالادست

محدوده سد آزاد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد بر اساس تقسیم بندی زمین ساختی - لرزه زمین‌ساختی ایران در زون سنندج - سیرجان قرار می‌گیرد. این کمربند باریک در طول دوران اول بسیار پرتحرک بوده و به صورت حاشیه قاره‌ای فعال در طی دوران دوم که حاشیه جنوبی ایران

مرکزی را بر همبندی گسل معکوس زاگرس تشکیل می‌دهد مشخص می‌شود. روند کلی این زون همانند زاگرس (شمال غربی - جنوب شرقی) می‌باشد (مهاب قدس، ۱۳۹۰). منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۵-۱ از لحاظ شدت زلزله در مقیاس شدت مرکالی، در محدوده ای با شدت VII قرار دارد. در مناطقی با این شدت لرزه‌ای احتمال تخریب سازه‌های خوب طراحی شده، متوسط و برای سازه‌هایی که ضعیف اجرا شده باشند قابل ملاحظه خواهد بود (کرامر، ۱۳۷۸).



شکل ۵-۱: نقشه شدت خطرات زلزله غرب و شمال غرب ایران همراه با محدوده مورد مطالعه (آب نیرو، ۱۳۸۸)

یکی از داده‌های مهم و اساسی برای مطالعات لرزه‌ای زمین ساخت و برآورد خطر زمین لرزه، شناخت و بررسی چشمه‌های زمین لرزه‌ای نقطه ای می‌باشد. بدین منظور نیاز به بررسی عمیق و دقیق تاریخچه زمین لرزه‌های گذشته (اعم از تاریخی و قرن بیستم به بعد) است. چنانچه در بررسی فراوانی رویداد زمین لرزه‌ها از دوره کوتاهی (مثلاً زمین لرزه‌های قرن بیستم) استفاده شود، در بررسی دوره بازگشت زمین لرزه‌ها، ممکن است پهنه‌های لرزه خیز به اشتباه به صورت بی لرزه یا کم لرزه نشان داده شوند. یکی از روش‌های پیش‌بینی بزرگای زمین لرزه احتمالی و بیشترین خطر لرزه‌ای تهدید کننده گستره طرح، بررسی پیشینه لرزه‌خیزی و مشخصات زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاهی

رخداده در گستره مورد مطالعه می‌باشد.

### ۵-۲-۱- گسل‌های مهم مولد زلزله در گستره طرح

گسل‌ها از عوامل مهم در بررسی لرزه خیزی منطقه هستند. همواره در مناطق لرزه‌خیز، رابطه‌ای بین گسل‌های اصلی منطقه و زمین لرزه‌های آن وجود دارد. علاوه بر چند گسل اصلی در محدوده مخزن چند گسل فرعی نیز در منطقه گزارش شده است که در جدول ۵-۱ و جدول ۵-۲ مشخصات آن‌ها آمده است و جزئیات مربوط به هر گسل نیز در پیوست ب آمده است.

جدول ۵-۱: مشخصات گسل‌های اصلی (آب نیرو، ۱۳۸۸)

گسل اصلی	طول گسل (کیلومتر)	فاصله از مخزن بالادست (کیلومتر)
سروآباد	۸۵	۲۳
گرگینه	۸۵	۶/۲
ساتیله	۶۵	۳۲

جدول ۵-۲: مشخصات گسل‌های فرعی (مهتاب قدس، ۱۳۹۰)

گسل فرعی	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>
طول گسل (متر)	۳۵۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۲۰	۲۰۰	۲۳۰	۲۵۰	۳۸۰	۶۰۰	۳۰۰

### ۵-۳- ارزیابی خطر لرزه‌خیزی با استفاده از روش تحلیلی

جهت برآورد توان لرزه‌زایی گسل‌ها، طول هر قطعه گسل یکی از مهم ترین پارامترهایی می باشد که با لرزه‌زایی رابطه مستقیم دارد. علاوه براین باید سایر پارامترها از جمله سازوکار گسل‌ها و ویژگی‌های لرزه ساختی هر گستره را به طور دقیق مورد بررسی قرار داد تا با توجه به این عوامل و فاصله ساختگاه از گسل مورد نظر، بتوان شدت و شتاب ناشی از هر گسل را تعیین کرد. جهت برآورد

خطر زمین لرزه برای محاسبه بزرگی زلزله و شتاب از فرمول‌های تجربی استفاده می‌شود.

### ۵-۳-۱- رابطه بین بزرگی زمین لرزه و طول گسل

برآورد حداکثر بزرگی زمین لرزه در یک گستره از جمله مهم‌ترین پارامترهایی است که جهت ارزیابی خطر زلزله، باید به کار گرفته شود. برای محاسبه بزرگی ( $M_s$ ) قابل تولید توسط هر گسل از فرمول‌های متعددی استفاده می‌شود که می‌توان به فرمول‌های تجربی کروز، مهاجر اشجعی و نوروزی، سلمونز و توچر اشاره نمود (برگی، ۱۳۸۲). که روابط هر یک از آن‌ها در جدول ۵-۳ آمده است.

جدول ۵-۳: رابطه بین بزرگی ( $M_s$ ) زمین لرزه و طول گسل ( $L$ )

شماره رابطه	نام ارائه دهنده رابطه	رابطه
۱-۵	کروز طول گسل ( $L$ بر حسب متر)	$M_s = 1.244 \log L + 1.25$
۲-۵	مهاجر اشجعی و نوروزی طول گسل ( $L$ بر حسب کیلومتر)	$M_s = \log L + 5.4$
۳-۵	نوروزی طول گسل ( $L$ بر حسب متر)	$M_s = (\log L + 0.126) / 0.675$
۴-۵	سلمونز طول گسل ( $L$ بر حسب متر)	$M_s = 1.404 + 1.169(\log L)$
۵-۵	توچر طول گسل ( $L$ بر حسب کیلومتر)	$M_s = \log L + 5.7$

با استفاده از روابط تجربی ذکر شده در جدول ۵-۳ بزرگی  $M_s$  در مقیاس ریشتر محاسبه گردید و سپس از بزرگی  $M_s$  های بدست آمده از روابط بالا برای هر گسل میانگین گیری شده و مقدار حاصل از این میانگین گیری به عنوان بزرگی زمین لرزه در نظر گرفته شد. همانگونه که در جدول ۴-۵ مشاهده می‌شود بیشترین بزرگی زمین لرزه احتمالی مربوط به دو گسل گرگینه و ساتیله می‌باشد.

جدول ۴-۵: مقادیر بزرگی زمین لرزه احتمالی با استفاده از روابط تجربی

گسل	Ms کروز	Ms اشجعی	Ms نوروزی	MS سلمونز	MS توچر	Ms میانگین
سروآباد	7.253637	7.226075	7.336407	7.045681	7.526075	7.277575044
ساتیله	7.382197	7.329419	7.48951	7.166491	7.629419	7.399407048
گرگینه	7.382197	7.329419	7.48951	7.166491	7.629419	7.399407048
F1	4.331539	4.877121	3.856476	4.299755	5.177121	4.508402406
F2	5.356481	5.70103	5.077081	5.262904	6.00103	5.479705369
F3	4.331539	4.877121	3.856476	4.299755	5.177121	4.508402406
F4	4.163974	4.742423	3.656922	4.142292	5.042423	4.349606756
F5	4.112481	4.70103	3.5956	4.093904	5.00103	4.300809073
F6	4.187989	4.761728	3.685523	4.16486	5.061728	4.372365532
F7	4.233037	4.79794	3.73917	4.207192	5.09794	4.415055928
F8	4.459251	4.979784	4.008568	4.419767	5.279784	4.629430661
F9	4.70602	5.178151	4.302446	4.651659	5.478151	4.863285553
F10	4.331539	4.877121	3.856476	4.299755	5.177121	4.508402406

### ۵-۳-۲- برآورد بیشینه شتاب در اثر جنبش گسل‌ها

به منظور بررسی بیشینه شتاب ناشی از گسل‌های مذکور بر گستره مورد مطالعه از فرمول‌های تجربی میرایی گوناگونی می‌توان استفاده کرد، که در اینجا از فرمول‌های تجربی دنوان، استوا و ویلاورده و نوموسکی استفاده شده است. که در این رابطه ها، a شتاب بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه و R فاصله کانونی زمین لرزه بر حسب کیلومتر می باشد (Nowroozi, and Mohajer Ashjai, 1985).

$$a = 1080 * e^{0.5M_s / (R+25)^{1.32}} \quad \text{۶-۵ : رابطه دنوان}$$

$$a = 5583 * e^{0.8M_s / (R+40)^2} \quad \text{۷-۵ : رابطه استوا و ویلاورده}$$

$$a = 653.93 * e^{0.544M_s / (R+25)^{1.3}} \quad \text{۸-۵ : رابطه نوموسکی}$$

R: فاصله گسل از ساختگاه که در جدول ۵-۱ آمده است.

بزرگی شتاب، بر اساس فرمول های تجربی ذکر شده محاسبه گردید و سپس از نتایج بدست آمده از روابط بالا برای هرگسل میانگین گیری شده و مقدار حاصل از این میانگین گیری به عنوان شتاب در نظر گرفته شده است. همانگونه که در جدول ۵-۵ مشاهده می شود بزرگترین شتاب، مربوط به گسل گرگینه می باشد.

جدول ۵-۵: مقادیر بزرگی شتاب با استفاده از روابط تجربی

گسل	a دنوان	a استوا	a نوموسکی	a میانگین
سروآباد	0.248022	0.47498	0.223506349	0.31550278
ساتیله	0.210102	0.400885	0.191007195	0.267331377
گرگینه	0.465479	0.973646	0.41810568	0.61907698
F1	0.146937	0.128566	0.115703704	0.130402206
F2	0.238806	0.279635	0.1962563	0.238232709
F3	0.146937	0.128566	0.115703704	0.130402206
F4	0.135721	0.113229	0.106128202	0.118359343
F5	0.13245	0.108893	0.103347994	0.114897129
F6	0.137275	0.115309	0.107450319	0.120011276
F7	0.140236	0.119315	0.109974901	0.123175382
F8	0.156103	0.141637	0.123577936	0.140439274
F9	0.175466	0.170776	0.140342951	0.162194755
F10	0.146937	0.128566	0.115703704	0.130402206

#### ۵-۴- برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین

بر اساس مطالعات لرزه خیزی و لرزه زمین ساخت، مهمترین چشمه لرزه‌زا نسبت به ساختگاه مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد پاره گسل گرگینه می باشد، این گسل با توان لرزه‌زایی ۷/۳ ریشتر و درازای ۸۵ کیلومتر و با راستای شمال غربی - جنوب شرقی در شمال و شمال شرقی ساختگاه سد، در فاصله سطحی ۶/۲ کیلومتری (نزدیکترین فاصله مستقیم سطحی تا ساختگاه مخزن) قرار گرفته است و نسبت به سایر چشمه‌های لرزه‌زای مهم منطقه، بیشترین شتاب را در محل این سازه ایجاد می نماید.

به منظور برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای سطوح مختلف طراحی لرزه‌ای از دو روش

قطعی و احتمالی استفاده شده است که در جدول ۵-۶ ارائه شده است. در مورد برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای سطوح طراحی لرزه‌ای  $DBL^1$ ،  $MDL^2$ ،  $MCL^3$  از روش احتمالی و قطعی استفاده شده است.

جدول ۵-۶: بیشینه مقادیر شتاب زمین ( $PGA^4$ ) برای سطوح طراحی لرزه‌ای مختلف (آب نیرو، ۱۳۸۸)

PGA		دوره بازگشت	سطح طراحی لرزه‌ای
مولفه قائم	مولفه افقی		
۰/۱۹	۰/۲۵	۵۰۰ ساله	DBL (سطح مبنای طراحی)
۰/۲۷	۰/۳۴	۲۰۰۰ ساله	MDL (سطح حداکثر طراحی)
۰/۴	۰/۴۷	بیش از ۲۰۰۰ سال	MCL (سطح حداکثر پذیرفتنی)

## ۵-۵- تعیین طیف پاسخ طرح و انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

به منظور انتخاب و اصلاح شتاب‌نگاشت‌های سازگار با سطوح طراحی لرزه‌ای ساختگاه، لازم است تا برای هر سطح طراحی لرزه‌ای، طیف خاص طرح تعریف گردد (Dhakal, 2004)، مهمترین سناریوی لرزه‌زا در گستره طرح شناسایی و توان لرزه‌زایی هر یک از آنها برآورد می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده برای بیشینه مقادیر شتاب زلزله برای سطوح طراحی لرزه‌ای مختلف، مشاهده می‌شود که طیف پاسخ بیشینه مقدار پذیرفتنی شتاب حاصل از سناریوی گسل گرگینه، دارای توان لرزه‌ای ۷/۳ می‌باشد و ۶/۲ کیلومتر تا ساختگاه فاصله دارد.

پس از مشخص شدن طیف پاسخی نهایی شتاب طرح برای سطوح مختلف لرزه‌ای در طراحی DBL، MDL و MCL لازم است تا شتاب‌نگاشت‌هایی مناسب انتخاب و عمل به مقیاس درآوردن آنها به منظور انطباق با طیف پاسخ مورد نظر برای گستره طرح انجام گیرد. در نهایت با بررسی کلیه

<sup>1</sup> Design Base Level

<sup>2</sup> Maximum Design Level

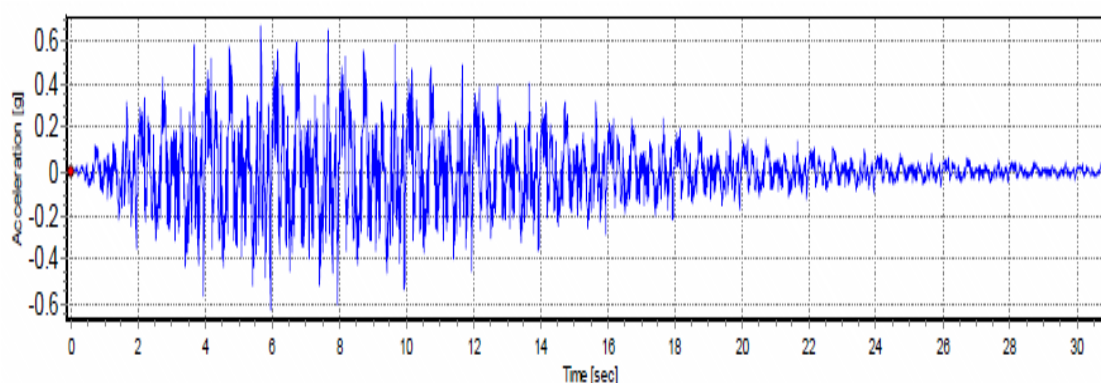
<sup>3</sup> Maximum Credite Level

<sup>4</sup> Peak Ground Acceleration

زمین‌لرزه‌های موجود در بانک اطلاعاتی شتاب‌نگاشتی شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، اسامی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای سطوح مختلف لرزه‌ای در طراحی (سه زمین‌لرزه برای هر سطح) در جدول ۷-۵ آورده شده است. همچنین شتاب‌نگاشت حاصل از تحلیل ساختگاه در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. که حاصل از زلزله خورگو، ثبت شده در ایستگاه بندر عباس ۲ در تاریخ ۲۱ مارس ۱۹۷۷ می‌باشد.

جدول ۷-۵: شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای سطوح مختلف در طراحی لرزه‌ای مخزن (آب نیرو، ۱۳۸۸)

ایستگاه ثبت	تاریخ رخداد	زلزله	سطوح طراحی لرزه‌ای
ده بالا	۶ مه ۱۹۹۹	بس - ایران	DBL
گرمابدره	۲۸ مه ۲۰۰۴	بلده - ایران	
Argostoli	۲۳ مارس ۱۹۸۳	Kefallinia - Greece	MDL
سد قدرونی	۲۲ فوریه ۲۰۰۵	زرنده - ایران	
محمد آباد	۲۶ دسامبر ۲۰۰۳	بم - ایران	MCL
Las palmas Ave	۱۷ ژانویه ۱۹۹۴	North-ridge-USA	
بندر عباس ۲	۲۱ مارس ۱۹۷۷	خورگو - ایران	MCL
کرمان	۲۸ ژوئیه ۱۹۸۱	سیرج - ایران	
Shelter cove	۲۵ آوریل ۱۹۹۲	Capmendocino-USA Airport	



شکل ۲-۵: شتاب‌نگاشت سازگار با شرایط ساختگاه مخزن (آب نیرو، ۱۳۸۸)



## ۵-۶- تحلیل دینامیکی ساختگاه مخزن با استفاده از روش عددی

### ۵-۶-۱- تدوین تاریخچه زمانی زلزله‌های سطوح طراحی

با استفاده از شتاب‌نگاشت حاصل از تحلیل ساختگاه مخزن در شکل ۵-۲ و بیشینه مقادیر شتاب افقی زمین مربوط به ساختگاه ذکر شده در جدول ۵-۵، مشخصات زلزله بدست آمده از تحلیل ساختگاه در جدول ۵-۸ ذکر شده است. لازم به ذکر است که مدت دوام حرکات زلزله برمبنای تعریف بلت<sup>۱</sup>، یعنی فاصله زمانی میان اولین و آخرین تجاوز از شتاب  $g/0.5$  محاسبه شده است (کرامر، ۱۳۷۸).

جدول ۵-۸: مشخصات حرکات نیرومند زمین در شتاب‌نگاشت حاصل از تحلیل آبرفت ساختگاه

مدت دوام حرکت	شتاب (g)
۳۰/۹۳	۰/۶۱

### ۵-۶-۲- اصلاح شتاب‌نگاشتهای سطوح طراحی لرزه‌ای

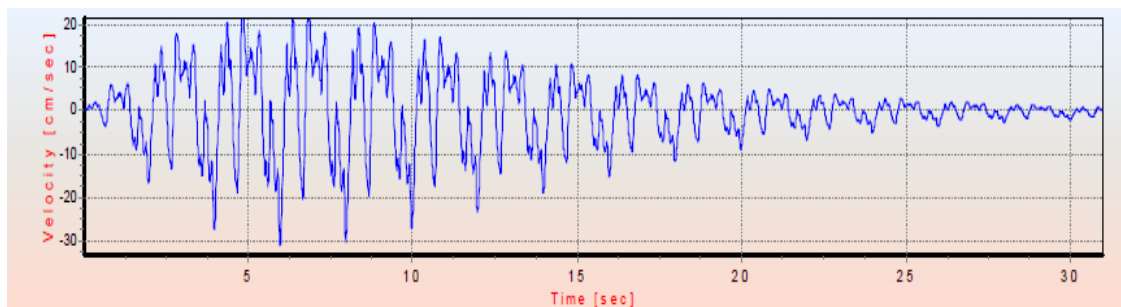
از آنجایی که بیشینه شتاب افقی بدست آمده از تحلیل آبرفت ساختگاه،  $g/0.61$  با بیشینه مقادیر شتاب افقی بدست آمده از تحلیل خطر زلزله برای سطوح طراحی لرزه‌ای MCL، یعنی  $g/0.47$  (جدول ۵-۶) تفاوت دارد. بنابراین لازم است تا شتاب‌نگاشت مبنا نسبت به مقادیر مورد نظر مقیاس شود. سپس باید محتوای فرکانس تاریخچه‌های زمانی شتاب اصلاح شود. در مدل‌سازی عددی، برای تحلیل دینامیکی رفتار زمین و برای جلوگیری از اعوجاج در اثر انتشار موج در مدل، لازم است تا بزرگترین بعد المان کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بزرگترین فرکانس موج ورودی باشد. در صورتیکه  $C_s$  سرعت موج برشی و  $f_{max}$  بزرگترین فرکانس تاریخچه زمانی موج باشد، بزرگترین بعد المان را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد (Itasca, 2002).

<sup>1</sup> Belt

$$l_{\max} = \frac{c_s}{f_{\max}}$$

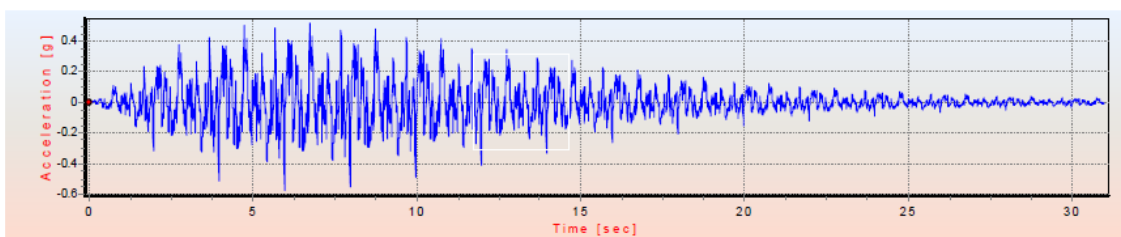
۹-۵

با انتگرال گیری از شتاب نگاشت شکل ۲-۵ می توان تاریخچه سرعت شکل ۳-۵ را ایجاد کرد. همچنین با انتگرال گیری از تاریخچه زمانی سرعت، تاریخچه زمانی جابه جایی را ایجاد نمود.

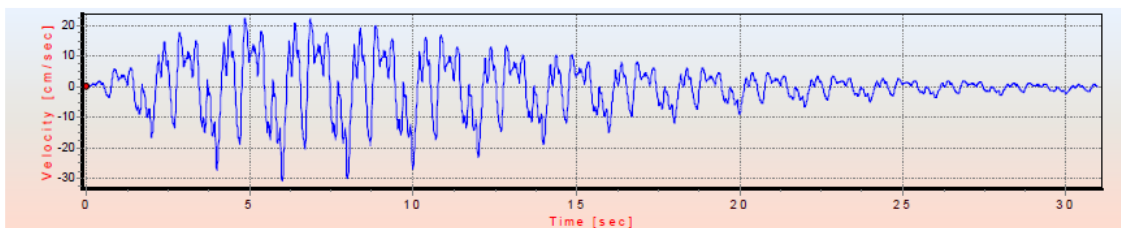


شکل ۳-۵: تاریخچه زمانی سرعت ناشی از شتاب نگاشت حاصل از تحلیل ساختمانگاه

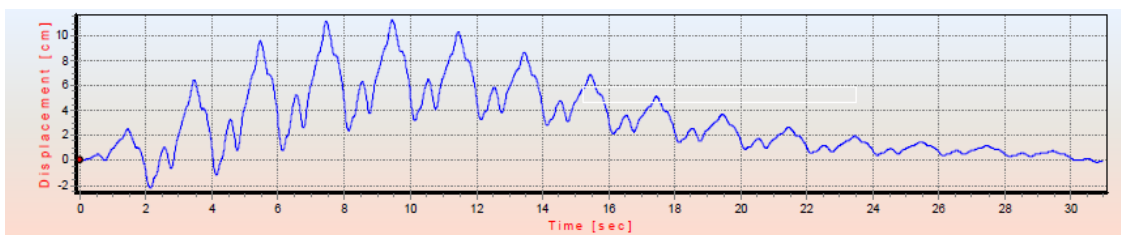
مشاهده می شود که تاریخچه سرعت و جابجایی در نهایت به صفر متمایل نشده اند. به منظور رفع این مشکل، در مهندسی زلزله از روند تصحیح خط مبنا بهره گرفته می شود. برای این کار با افزودن یک موج فرکانس کوتاه به تاریخچه اصلی، سرعت و جابجایی نهایی آن را صفر می کنند. چنانچه از نمودارهای شتاب نگاشت یا سرعت نگاشت خام که از مراکز ثبت زلزله استخراج می شود برای مدل سازی در FLAC استفاده شود، ممکن است برنامه مقادیری از سرعت یا جابجایی باقی مانده را بعد از ارتعاشات انجام گرفته در خروجی ها نشان دهد (ضمیران، ۱۳۹۱). در شکل ۴-۵ الی شکل ۶-۵ به ترتیب نتایج نهایی تاریخچه شتاب، سرعت و جابجائی اصلاح شده برای زلزله سطح MCL نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: شتاب نگاشت اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه ای MCL



شکل ۵-۵: تاریخچه زمانی سرعت اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه‌ای MCL



شکل ۵-۶: تاریخچه زمانی جابجایی اصلاح شده بر اساس سطح طراحی لرزه‌ای MCL

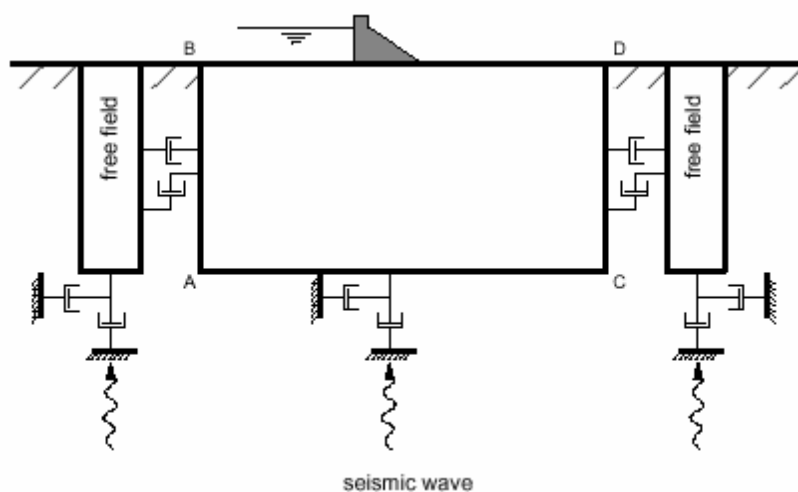
### ۵-۶-۳- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

نرم افزار FLAC یک ناحیه از مصالح در معرض بارگذاری دینامیکی را با بکارگیری شرایط مرزی ورودی دینامیکی بر روی مرزهای مدل یا نقاط داخلی شبکه، مدل می‌کند. برای نزدیک کردن مساله مدل شده به واقعیت، باید انعکاس موج در مرزهای مدل را به حداقل رساند. این کار را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی آرام (ویسکوز) انجام داد. بعد از تحلیل استاتیکی، شرایط مرزی ویسکوز اعمال می‌شود. در طرفین و کف مدل مرزهای آرام تعبیه شده است. در اثر زلزله امواج حجمی از چشمه لرزه در تمام جهات منتشر می‌شود. هنگامی که این امواج به مرز لایه‌ها می‌رسند، دچار انعکاس و انکسار می‌شوند. سرعت عبور امواج در لایه‌های مختلف مواد متفاوت است. در لایه‌های نزدیک به سطح معمولاً سرعت موج کمتر از لایه‌های زیرین است، لذا در این قسمت انکسار رخ می‌دهد. این پدیده سبب می‌شود که جهت انتشار امواج زلزله در لایه‌های افقی سطحی به صورت عمودی باشد. نرم افزار FLAC ورودی دینامیکی را بصورت یکی از تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت، تنش (یا فشار) یا نیرو، می‌تواند بکاربرد. اما در صورت استفاده از ورودی شتاب یا سرعت، نمی‌توان در مرزهای

مدل دینامیکی، شرایط مرزی را در طول مرز یکسانی مانند شرایط مرزی آرام (ویسکوز) بکار ببرد، زیرا اثر مرز آرام خنثی خواهد شد. براساس این دو واقعیت، بارگذاری دینامیکی حاصل از زلزله، بصورت یک موج صفحه ای برشی در نظر گرفته شده است که از کف مدل در جهت قائم منتشر می‌شود. برای وارد نمودن حرکات لرزه‌ای در مرز آرام، یک شرایط مرزی تنش دار استفاده می‌شود یا به عبارت دیگر، یک رکورد سرعت با استفاده از رابطه ۵-۱۰ به یک رکورد تنش تبدیل شده و بر روی مرز آرام بکار گرفته می‌شود. تاریخچه سرعت یک موج برشی را می‌توان با فرمول زیر به یک تاریخچه تنش برشی تبدیل نمود (Itasca, 2002):

$$\sigma_s = -2 \rho C_s V_s \quad 5-10$$

در این رابطه  $\sigma_s$  تنش برشی بکار گرفته شده،  $\rho$  چگالی جرمی،  $C_s$  سرعت انتشار موج برشی از میان محیط،  $V_s$  سرعت برشی ذرات مصالح زمین می‌باشد. از آنجایی که نصف انرژی ورودی توسط مرزهای ویسکوز جذب شده است، لذا بایستی تنش بکار برده شده نیز دو برابر مقدار مشاهده شده در محیط نامحدود باشد و ضریب ۲ در رابطه مذکور به این دلیل است. نحوه مدل‌سازی به صورت شکل ۵-۷ خواهد بود.



شکل ۵-۷: شبیه‌سازی ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های سطحی همراه با مرزهای آزاد (Itasca, 2002)

## ۵-۶-۴- میرایی

هر سیستم دینامیکی دارای میرایی داخلی است. در صورت عدم میرایی، ارتعاش یک سیستم مکانیکی در معرض نیروهای محرک تا ابد ادامه می‌یابد. مقداری از میرایی به واسطه افت انرژی در اثر لغزش در طول تماس بلوک‌های درون سیستم و قسمتی نیز به واسطه افت اصطکاکی درونی مواد بکر و مقاومت ایجاد شده به وسیله هوا و یا سیالات دربرگیرنده سازه و یا لغزش بر روی درزه‌ها صورت می‌گیرد (Hack et al, 2007). در مدل‌سازی عددی میرایی چنان انتخاب می‌شود که انرژی مستهلک شده در محاسبات عددی، مشابه انرژی تلف شده در سیستم فیزیکی باشد. در نرم افزار FLAC از میرایی امواج ریلی جهت مدل‌سازی میرایی مدل به هنگام تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود. این نوع میرایی از دو قسمت متناسب با جرم و متناسب با سختی و طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad ۱۱-۵$$

که در این رابطه  $K, M, C$  به ترتیب به ترتیب ماتریس میرایی، جرم و سختی سازه و  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت های میرایی متناسب با جرم و سختی هستند. در میراگر ریلی، میرایی وابسته به فرکانس است. اما محدوده ای از فرکانس را می‌توان یافت که در آن محدوده می‌توان میرایی را مستقل از فرکانس در نظر گرفت (Itasca, 2002). در نتیجه در این محدوده میراگر ریلی می‌تواند به درستی میرایی فیزیکی در زمین را مدل نماید. این محدوده فرکانسی به صورتی است که همواره نسبت بیشترین فرکانس محدوده به کمترین فرکانس محدوده، به نسبت سه به یک می‌باشد. در واقع میراگر ریلی با یک فرکانس مرکزی مشخص، علاوه بر فرکانس مرکزی می‌تواند محدوده‌ای از فرکانس‌ها را نیز میرا کند که بیشترین فرکانس این محدوده ۳ برابر کمترین فرکانس محدوده باشد. هنگام استفاده از میراگر ریلی اگر فرکانس مرکزی ریلی به گونه‌ای انتخاب شود که فرکانس‌هایی را که بیشترین انرژی را به محیط اعمال می‌کنند، میرا گردند در این صورت می‌توان اظهار نمود که میرایی مدل‌سازی شده عددی با فیزیک مساله انطباق دارد. در صورتی که فرکانس طبیعی مدل و یا فرکانس‌های پرنرژی در

موج ورودی به گونه‌های باشند که انتخاب یک فرکانس مرکزی برای میراگر ریلی در مدل‌سازی، نتواند بخش پرنرژی موج را میرا کند باید با تغییر در ابعاد مدل، فرکانس طبیعی مدل را تغییر داد و یا با فیلترکردن موج ورودی از روش حوزه فرکانس، محدوده فرکانس‌های پرنرژی را به گونه‌ای تنظیم نمود که با میراگر ریلی قابل میراشدن باشد.

برای استفاده از میراگر ریلی در FLAC علاوه بر فرکانس مرکزی، نسبت میرایی بحرانی نیز باید مشخص گردد. در مصالح ژئومکانیکی نسبت میرایی بحرانی ( $\xi_{min}$ ) معمولاً ۲ تا ۵ برای زمین و ۲ تا ۱۰ درصد برای پوشش (تحکیمات اولیه) در نظر گرفته می‌شود (Itasca, 2002).

### ۵-۶-۵- پاسخ دینامیکی مخزن به زلزله سطح طراحی MCL

جهت اعمال نیروی برشی زلزله به مدل، ابتداءً با توجه به رابطه ۵-۱۰ پارامترهای مورد نیاز به شرح جدول ۵-۹ آمده است.

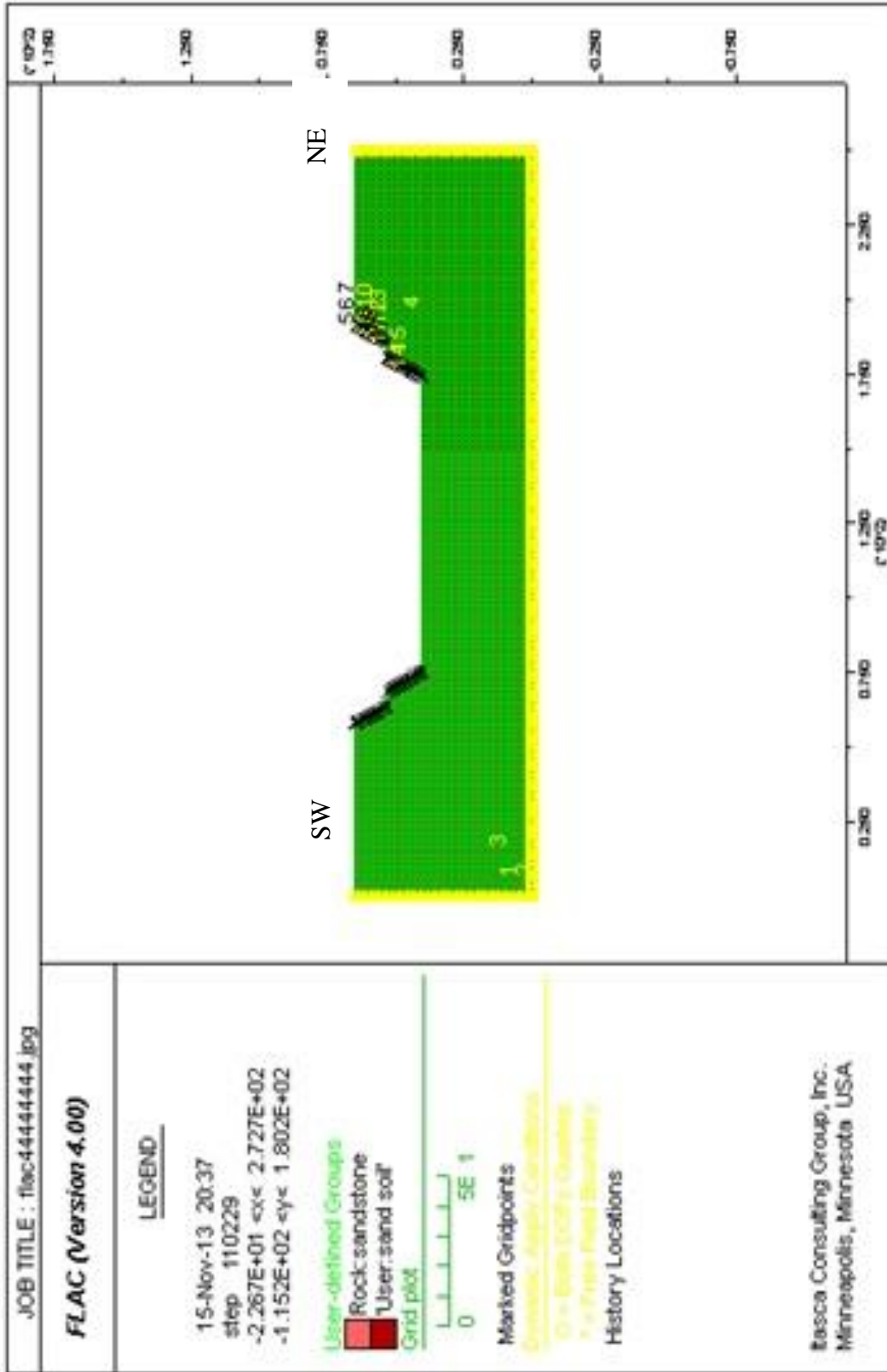
جدول ۵-۹: پارامترهای مورد نیاز جهت اعمال تنش برشی ناشی از نیروی زلزله به مدل

پارامترهای ورودی جهت اعمال تنش	بلوک ۴	بلوک ۶
(Cs) سرعت انتشار موج برشی (m/s)	۵۴۶	۷۲۸
( $\rho$ ) چگالی ( $\text{Kg/cm}^3$ )	۲۷۰۰	۲۷۰۰

با استفاده از مقادیر جدول فوق و مقادیر سرعت که در شکل ۵-۵ آمده است، می‌توان تنش برشی ناشی از نیروی زلزله را با استفاده از رابطه ۵-۱۰ بدست آورد.

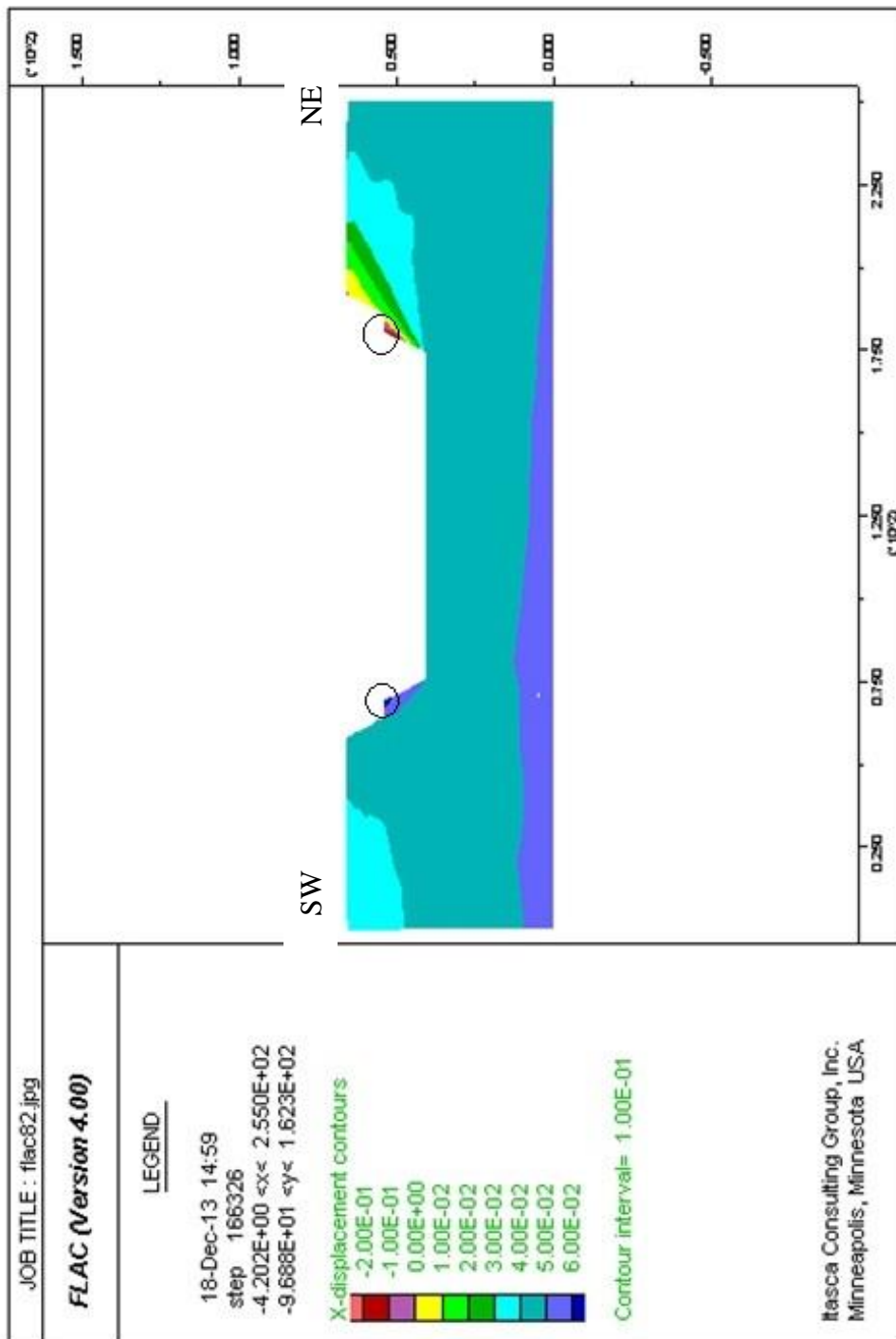
در این بخش پاسخ دینامیکی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد در مقابل زلزله سطح طراحی MCL مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل پایداری مخزن در مقابل بارگذاری زلزله اعمال شده به مدل، نمودارهایی از قبیل تغییرشکل، جابجایی در راستای قائم و جابجایی در راستای افقی را در نواحی مختلف مخزن مورد بررسی قرار خواهیم داد. شکل ۵-۸ مدل نهایی جهت

تحليل ديناميكي را نشان مي دهد.



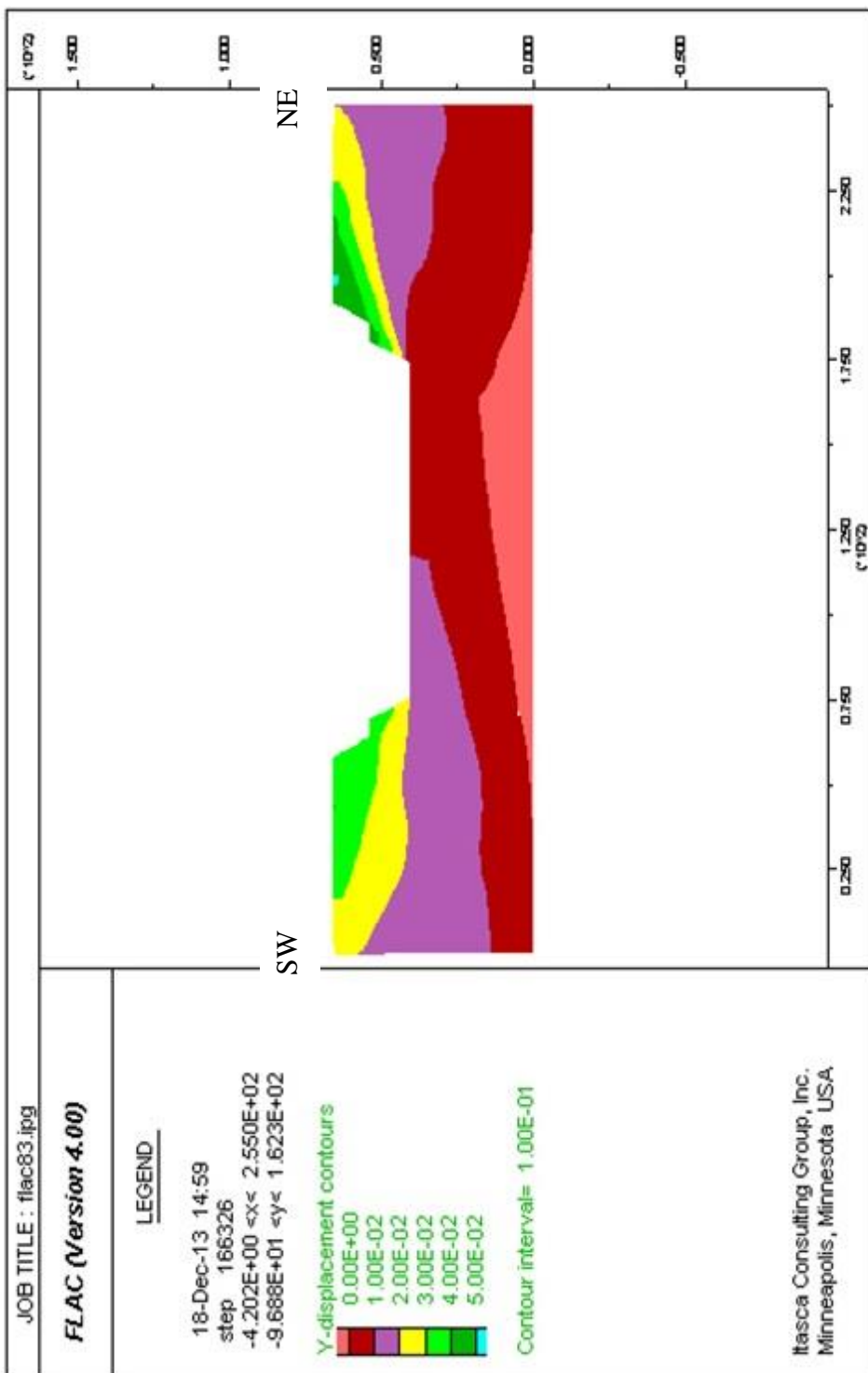
شكل ٨-٥: مدل مورد نظر مخزن جهت انجام تحليل ديناميكي

در ادامه به بررسی وضعیت جابجایی‌های افقی و قائم مخزن و کرنش برشی آن تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله در اشکال ۹-۵، ۱۰-۵ و ۱۱-۵ خواهیم پرداخت.

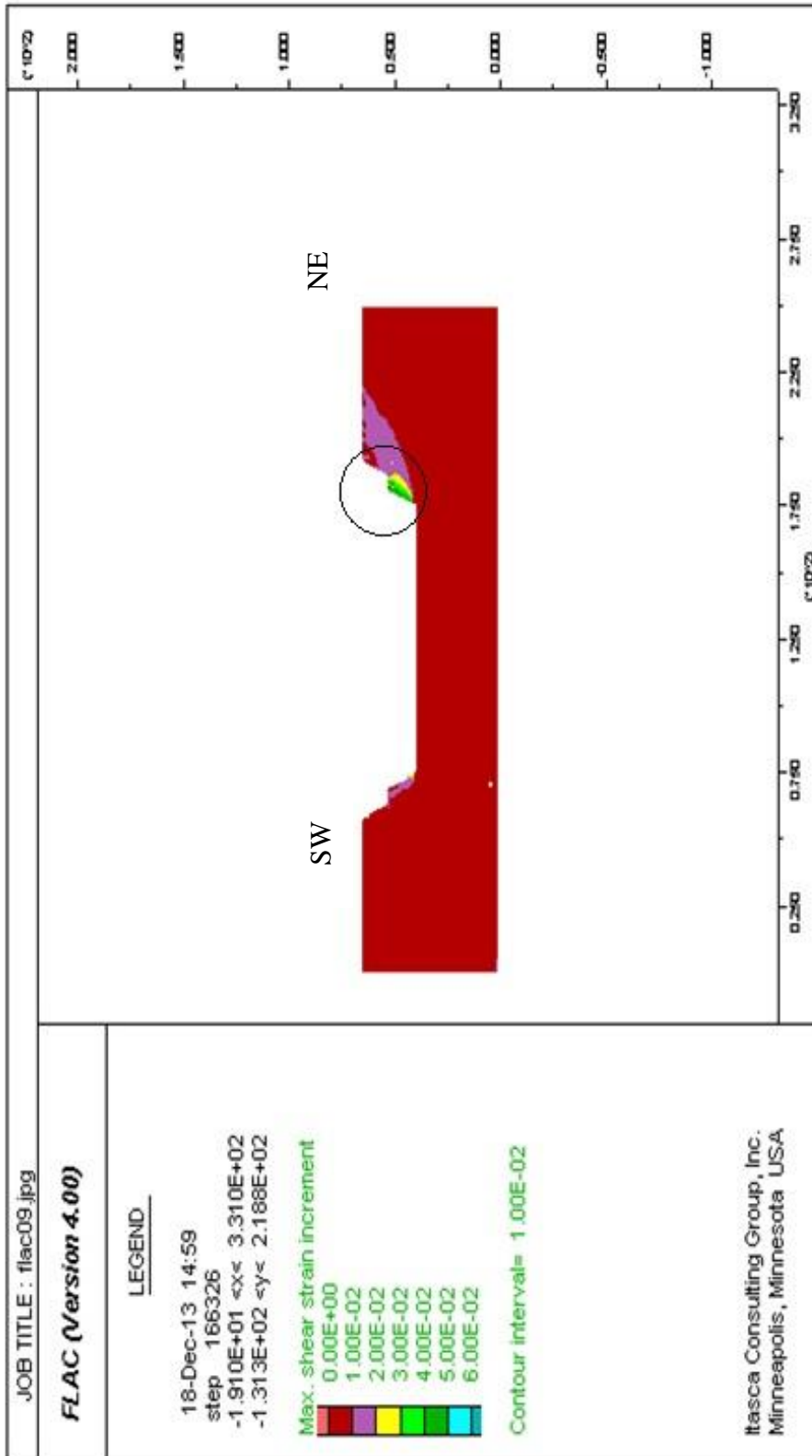


شکل ۹-۵: جابجایی افقی مخزن تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله





شکل ۱-۵: جابجایی قائم مخزن تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله



شکل ۵-۱: کرنش برشی ایجاد شده در مدل تحت اعمال نیروی ناشی از زلزله

با توجه به شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی قائم و افقی مخزن بالادست در نواحی مشخص شده در شکل، جابجایی (نواحی مشخص شده با دایره بر روی شکل ۵-۹) قابل ملاحظه خواهد بود که به ترتیب در بحرانی‌ترین حالت ۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد و همچنین با توجه به کرنش برشی ایجاد شده در مخزن، که مقدار آن در بحرانی‌ترین حالت ۰/۰۶ می‌باشد در نواحی مشخص شده بر روی شکل ۵-۹ ناپایداری خواهیم داشت. اما از آنجا که سیستم نگهداری مخزن سیستم موقت شاتکریت و راک بولت بوده و در آینده سیستم نگهداری دائمی آن نیز نصب خواهد شد، پایداری مخزن بالاتر خواهد رفت.

#### ۵-۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق گسل‌های محدوده طرح شناسایی شده و بر اساس روابط تجربی بزرگی و شتاب ناشی از هر یک از آن‌ها تعیین گردید. طبق این بررسی گسل گرگینه با بزرگی ۷/۳ در مقیاس ریشتر و شتاب  $0/61g$  به عنوان خطرناک‌ترین گسل در محدوده طرح انتخاب گردید. با توجه به پاسخ دینامیکی مخزن به زلزله رخ داده در برخی مناطق مخزن جابجایی‌های قائم و افقی قابل ملاحظه بوده که مقدار آن‌ها به ترتیب در بحرانی‌ترین حالت ۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که این جابجایی‌ها باعث ناپایداری و تغییر شکل پلاستیک این نواحی می‌شود. البته باید متذکر شد که سیستم نگهداری این مخزن موقت بوده و در آینده تحکیمات نهایی و دائمی آن نیز نصب خواهد شد.

## فصل ششم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- نتیجه گیری

تحلیل، طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده سنگ‌ها ساخته می‌شوند ملزوم درک صحیح ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت و تغییرشکل‌پذیری) توده‌سنگ‌ها می‌باشد. با توجه به تقسیم نمودن مخزن از لحاظ ویژگی شیب و پارامترهای ژئومکانیکی به شش ناحیه مختلف، تحلیل پایداری اولیه مخزن به صورت سینماتیکی انجام گرفت و انواع شکست‌های احتمالی موجود در مخزن اعم از شکست واژگونی، صفحه‌ای و گوه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل مبین این است که در ناحیه اول دیواره شیبدار مخزن صرفاً پتانسیل لغزش گوه‌ای بواسطه تقاطع دسته درزه‌های ۵ و ۶ وجود دارد. در حالی که در ناحیه دوم علاوه بر پتانسیل لغزش گوه‌ای بواسطه تقاطع همین دسته درزه‌ها امکان لغزش صفحه‌ای در امتداد دسته درزه ۴ و لغزش واژگونی دیواره سنگی تحت تاثیر دسته درزه ۲ نیز وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ناحیه‌های سوم و چهارم صرفاً امکان لغزش صفحه‌ای در امتداد دسته درزه ۳ وجود دارد. در ناحیه پنجم تحت اثر دسته درزه ۳، امکان شکست صفحه‌ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۵۰ درجه می‌باشد و در ناحیه ششم تحت اثر دسته درزه ۵، امکان شکست صفحه‌ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۴۵ درجه می‌باشد. علاوه بر آن در ناحیه پنجم تحت اثر دسته درزه‌های ۱ و ۶، امکان شکست گوه‌ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۵۵ درجه می‌باشد، در ناحیه ششم نیز تحت اثر دسته درزه‌های ۲ و ۶، امکان شکست گوه‌ای وجود دارد و بیشترین شیب ایمن ممکن برای دیواره تحت این دسته درزه ۴۵ درجه می‌باشد.

با توجه به این که پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ مورد استفاده در مدل‌سازی عددی صورت گرفته حاصل رده‌بندی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ است و از طرفی فرضیاتی مانند فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسانگرد بودن توده سنگ به طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار و نتایج مدل‌سازی دور از انتظار نیست. به همین جهت با تحلیل برگشتی

به کمک نرم افزار FLAC2D مقدار بهینه پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ تعیین می شود. نتایج حاصل از تحلیل برگشتی نشان می دهد که مدول تغییر شکل پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ به ترتیب ۱ گیگاپاسکال، ۱۲۷ کیلوپاسکال و ۳۵ درجه به دست آمد.

در ادامه گسل های محدوده طرح شناسایی شده و بر اساس روش تحلیلی بزرگی مختلف و شتاب ناشی از هر یک از آنها تعیین گردید و طبق این بررسی گسل گرگینه با بزرگی ۷/۳ در مقیاس ریشتر و شتاب ۰/۶۱g به عنوان خطرناکترین گسل در محدوده طرح انتخاب گردید. در نهایت تحلیل دینامیکی مخزن مورد مطالعه به کمک روش عددی تفاضل محدود در قالب نرم افزار نرم افزار FLAC2D صورت گرفته و نتایج حاصل نشان می دهد که پاسخ دینامیکی مخزن به زلزله رخ داده در برخی مناطق مخزن با جابجایی های قائم و افقی و همچنین کرنش برشی قابل ملاحظه همراه است که مقادیر آنها در بحرانی ترین حالت به ترتیب به ۵ سانتی متر، ۲۰ سانتی متر و ۰/۰۶ می رسد. از اینرو موارد مذکور باعث ناپایداری و تغییر شکل پلاستیک بعضی نواحی مخزن می شود. که در آینده نیاز به سیستم نگهداری دائمی دیواره مخزن می باشد.

## ۲-۶- پیشنهادات

جهت ادامه تحقیق انجام مطالعات زیر پیشنهاد می گردند:

- ۱- تحلیل برگشتی داده های ابزار دقیق در مقاطع دیگر مخزن به منظور شناسایی بهتر ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ انجام گیرد.
- ۲- از روش های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک جهت تحلیل برگشتی برای محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اطراف مخزن استفاده شود و نتایج آن با نتایج حاصل از این مطالعه با هم مقایسه شوند.
- ۳- تحلیل پایداری مخزن، به صورت سه بعدی و با نرم افزار FLAC3D یا 3DEC برای مخزن انجام و ماحصل آنها با نتایج این مطالعه مقایسه شوند.

۴- از آنجا که مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد به عنوان مخزن آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا پس از نصب تحکیمات نهایی، و با حضور آب در مخزن به تحلیل پایداری آن در حالت‌های مختلف پرداخته شود.

## فهرست منابع

- آب نیرو، (۱۳۸۸) " مطالعات مرحله اول نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد "
- امامی میبدی، ع، (۱۳۸۶) " روش گروه های کلیدی جهت دار در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه دار "، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن ، دوره دوم ، شماره چهارم، ص، ۶۳-۵۵
- برارپور، م؛ شاکری، آ.، توکلی، ح.، جانعلیزاده، ع.، (۱۳۹۰) " تحلیل دوبعدی اثرات دینامیکی ساختگاه های شیبدار و دره "، کنفرانس بین‌المللی نیروگاه‌های آبی
- برگی، خ، (۱۳۸۲) " اصول مهندسی زلزله .انتشارات دانشگاه تهران "، چاپ چهارم
- بشری، ع ، (۱۳۸۸) "اعتبارسنجی آماری روابط تجربی تعیین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران
- حسینی، م.، افضل آقایی، ا، ر.، (۱۳۹۱) " تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از داده های حاصل از ابزار دقیق "، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره چهاردهم، ص، ۹۰-۸۳
- خدابنده لو، ف.، قاسم پور، ب.، (۱۳۹۰) " راهنمای نرم افزار FLAC ". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر - واحد جهاد دانشگاهی، چاپ سوم،
- درویش زاده، ع.، (۱۳۸۹) "زمین شناسی ایران " ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- سقراط، م.، (۱۳۹۰) "بررسی اثرات ساختگاه در شمال ایران با استفاده از روش تجربی H/V"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
- شیردل، م.، قنبری، ع.، داودی، م.، (۱۳۹۰) " ارزیابی جایگاه روش شبه استاتیک در بررسی پایداری لرزه‌های سازه‌های مختلف "، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
- صفری، ا.، (۱۳۸۰) "تحلیل پایداری شیروانی ساحل راست گتوند علیا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه شاهرود
- ضمیران، س.، (۱۳۸۸) "مدل سازی و تحلیل سازه‌های خاکی و سنگی در FLAC"، نشر نوآور
- قاسم پور، ن.، پناه بر، ب.، (۱۳۸۸) "تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با استفاده از نرم افزار FLAC3D"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر



کرامر، ا. (۱۳۷۸) "ژئوتکنیک لرزه‌ای"، انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ترجمه میرمحمد حسینی، سید مجدالدین، چاپ دوم

مهاب قدس، (۱۳۹۰) "گزارشات زمین‌شناسی مهندسی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد"

مهاب قدس، (۱۳۹۱) "گزارشات ابزار دقیق و تحکیمات اولیه مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد"

مهدوری، س.، فتحی سلمی، ا. (۱۳۸۶) "تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان با استفاده از تحلیل برگشتی"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوم، شماره چهارم، ص، ۳۷-۴۶

موسوی، م. (۱۳۸۷) "ابزاربندی و رفتارنگاری در پروژه های ژئومکانیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

نوریان، ب. (۱۳۸۳) "معرفی روشی جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی واقعی منطقه به کمک روش های عددی"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس

Amusin, B. Z., Shick, V. M., and Lama, R. D., (1992). "Using Back Analysis to Estimate Geotechnical Field Parameters for the Design of Support Systems for Tunnels". *Tunneling and Underground Space Technology*, 7, 281-284.

Baykasoglu, A., Gullu, H., Canakc, H., and Ozbakir, L., (2008). "Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming". *Journal of Expert Systems with Applications*, 35, 329-347.

Bobet, A., (2010). "Numerical Methods in geomechanics". *The Arabian Journal for Sciences and Engineering* 35 (13), 27-48.

Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F., and Yeung, M.R., (2009). "Numerical models in discontinuous media: Review of advances for rock mechanics application". *Journal of geoenvironmental engineering*, 135 (11), 1547-1561.

Chen, S.L., Lee, S.C., and Gui, M.W., (2009). " Effect of Rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels ". *Journal of Tunneling and underground Space Technology* 24, 148-154.

Dhakal, S., (2004). M.Sc.. Thesis., " Empirical relations for earthquake response of

- slopes." *Engineering geology. Depart. Netherlands university.*
- Vardakos, S., (2007). PhD. Thesis., " Back-analysis Methods for Optimal Tunnel Design". *Virginia Polytechnic Institute and State University.*
- Fakhimi, A., Salehi, D., Mojtabai, N., (2004). "Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel project". *Tunneling and Underground Space Technology* 19, 57–67.
- Finno, R., Rechea, A., and Levasseur, B., (2008). "Inverse analysis techniques for parameter identification in simulation of excavation support systems". *Computers and Geotechnics*, 35, 331–345.
- Gatmiri, B. and Nguyen, K., (2007). "Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity". *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 183-188.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., and Zaman, M., (2008). "Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya dam site". *Journal of Engineering Geology*, 96 ,17- 27.
- Hack, R., Alkema, D., Kruse, G, A., Leenders, N., and Luzi, L., (2007). " Influence of earthquakes on the stability of slopes". *Journal of Engineering Geology*,91,4-15.
- Hoek, E., and Brown E.T., (1982). "*Underground Excavation in Rock*" Published for Mining and metallurgy.
- Itasca Consulting Group Inc., (2002). "FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 4.00,: User Manual"
- Jeon, Y.S., and Yang, H.S., (2004). "Development of a back analysis algorithm using Flac". *Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41 (3), 441-442.
- Labuz, F., and Zang, A., (2012). "Statistical analysis of rock mass fracturing". Mohr–Coulomb Failure Criterion, *Rock Mech Rock Eng.* 45(6), 975-979.
- Ling, J., 2003. "A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40 (3), 283–353.

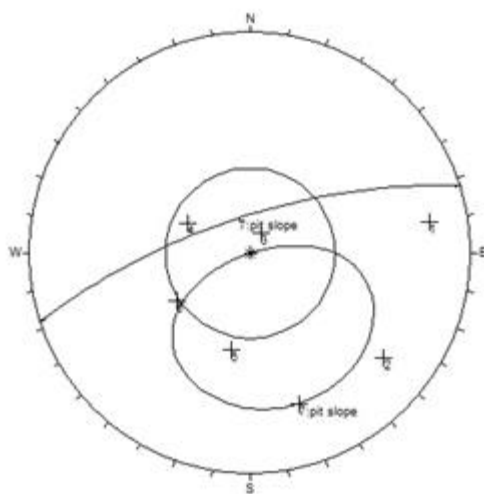
- Marinos, P., and Hoek, E., (2000). "GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation", Proc. Geo. Eng. 2000 Conference, 1422-1442.
- Morales, T., Uribe, E.G., and Uriarte, J. A., (2004). "Geomechanical characterisation of rock masses in Alpine regions". *Journal of Engineering Geology*, 71, 343-362.
- Moreira N., Miranda, T., Pinheiro, M., Fernandes, P., Dias, D., Costa, L., and Sena-Cruz, J., (2013). " Back analysis of geomechanical parameters in underground works using an Evolution Strategy algorithm". *Tunneling and Underground Space Technology*, 33, 143–158.
- Nowroozi, A.A., and Mohajer-Ashjai, A., (1985). "Fault movements and tectonics of eastern Iran: boundaries of the Lut plat." *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 83, 215-237.
- Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shiniji, M., and Shimizu, N., (2001). " Back analysis for observation methods in tunneling engineering". Proceeding of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology, IS-Kyoto, 1, 1188–1165.
- Sakurai, s., and Takeuchi, K., (1983). "Back analysis of measured displacements of tunnels". *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16 (3), 173-180.
- Shang, Y, J., Cai, J.G., Hao, W. D., and Wu, X. Y., (2002). " Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 381–389.
- Sharifzadeh, M., Daraei, R., and Broojerdi, M. S., (2012). "Design of sequential excavation tunneling in weak rocks through findings obtained from displacements based back analysis". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 10-17.
- Singh, M., and Rao, K., (2005)." Empirical methods to estimate the strength of jointed rock masses ". *Engineering Geology*, 77, 127–137.
- Terry, R., and Kyo, H., (2007)." Rock Slope Stability of the VMT ". Published for The Prince William Sound Regional Citizen’s Advisory Council (RCAC).

- Wines, D., and Lilly, P., (2001). " A Comparative Analysis Of Rock Mass Classification Schemes In Part Of The Fimiston Open Pit Operation In Kalgoorlie, Western Australia". *Australian Geomechanics*, 18, 144-156.
- Yazdani, M., Sharifzadeh, M., Kamrani, K., and Ghorbani, M., (2012). "Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 41-48.
- Yazdani, M., Sharifzadeh, M., Kamrani, K., and Ghorbani, M., (2012). "Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 41-48.
- Zhang, L, Q., and Yue Z.Q., (2005). "A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stresses in tunneling – illustrated with a case study." *Journal of Tunneling and Underground Space* 636-649.

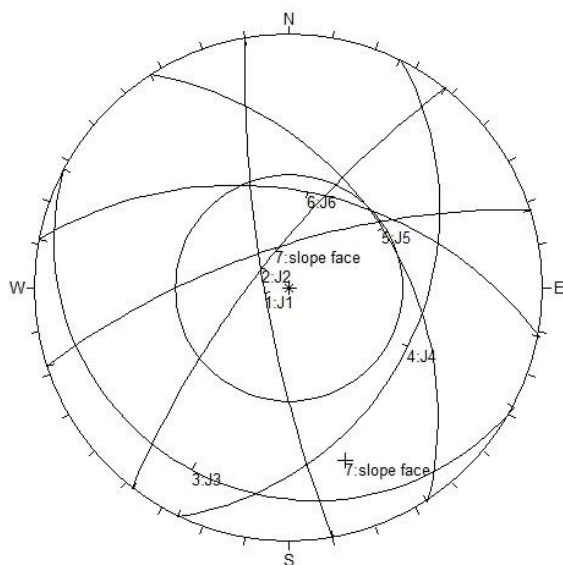
## پیوست الف

### تحلیل سینماتیکی بلوک ۱

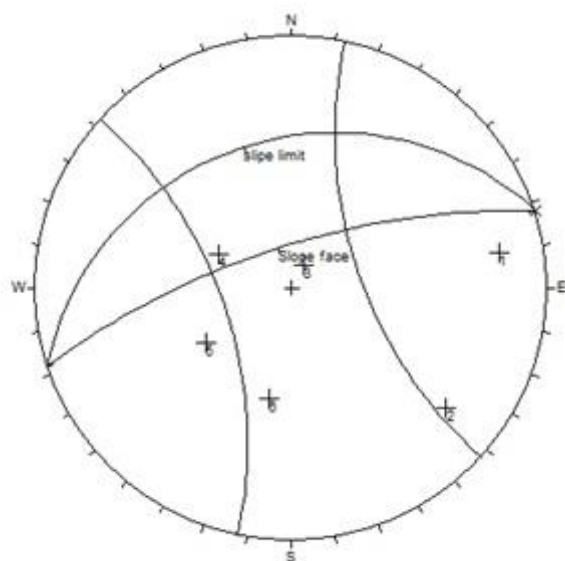
جهت تحلیل سینماتیکی بلوک ۱ با مشخصات مذکور در جدول ۳-۲ به ترتیب پتانسیل شکست‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی بررسی شده و نتایج آن در اشکال نشان داده شده است.



شکل الف ۱: شکست صفحه‌ای بلوک ۱

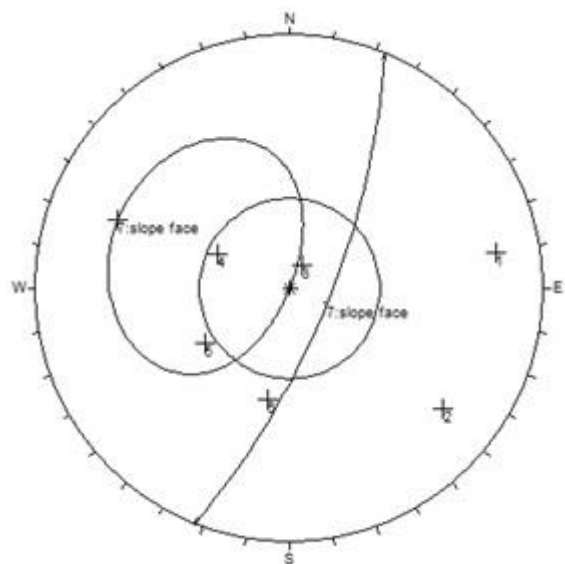


شکل الف ۲: شکست گوه‌ای بلوک ۱

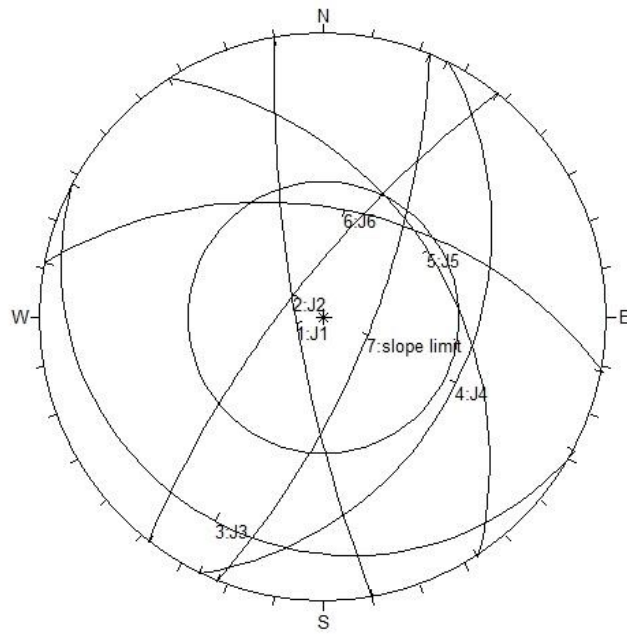


شکل الف ۳: شکست واژگونی بلوک ۱

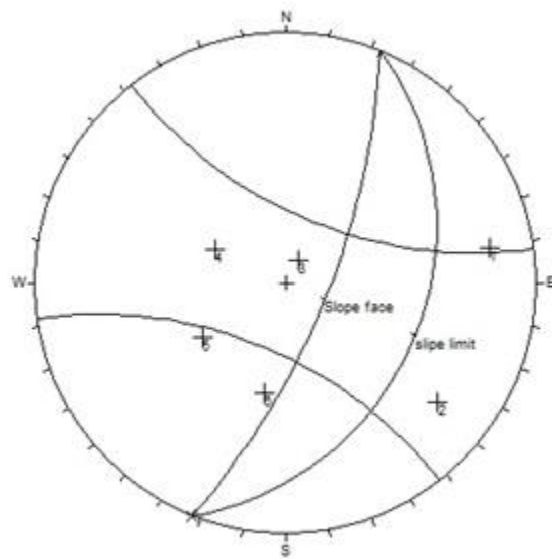
تحلیل سینماتیکی بلوک ۲



شکل الف ۴: شکست صفحه‌ای بلوک ۲

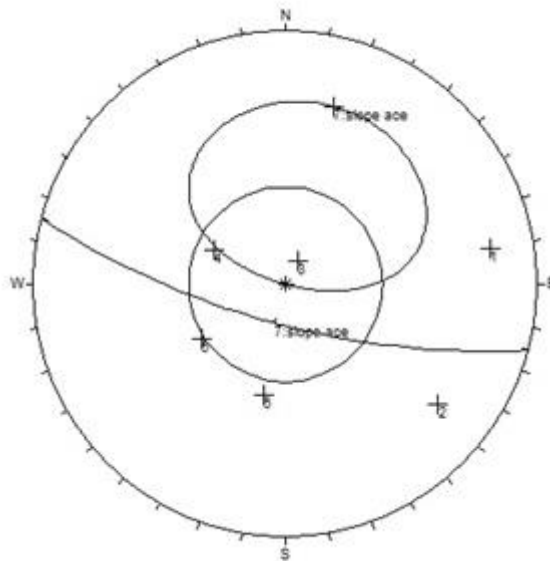


شکل الف ۵: شکست گوه‌ای بلوک ۲

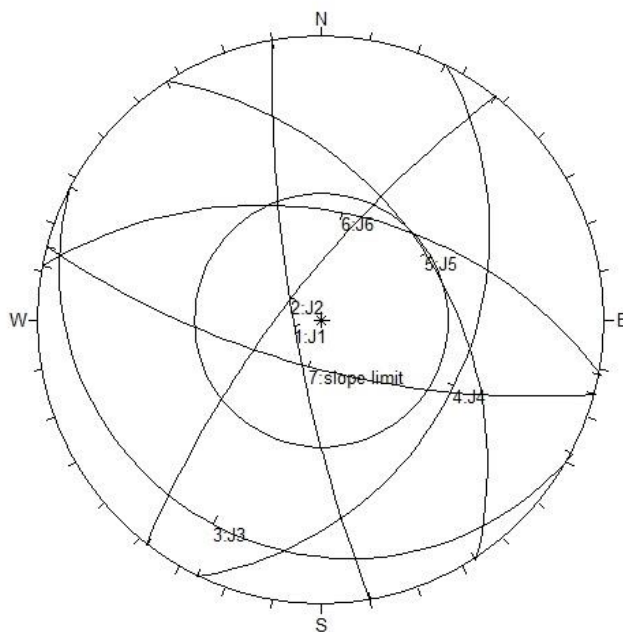


شکل الف ۶: شکست واژگونی بلوک ۲

تحلیل سینماتیکی بلوک ۳

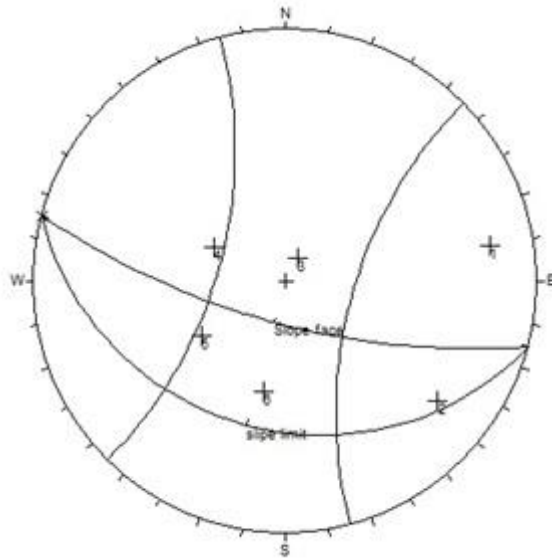


شکل الف ۷: شکست صفحه‌ای بلوک ۳



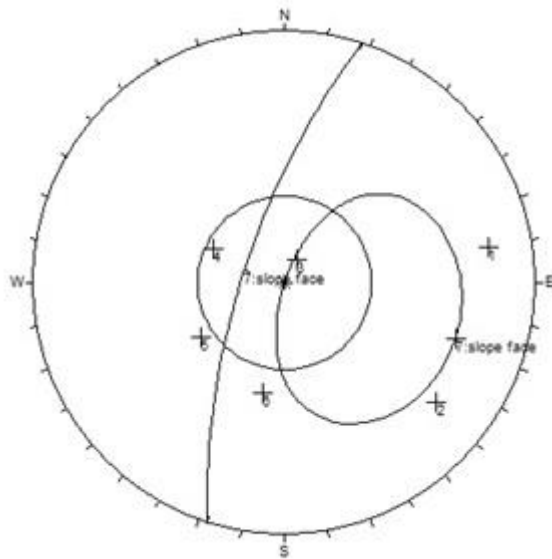
شکل الف ۸: شکست گوه‌ای بلوک ۳



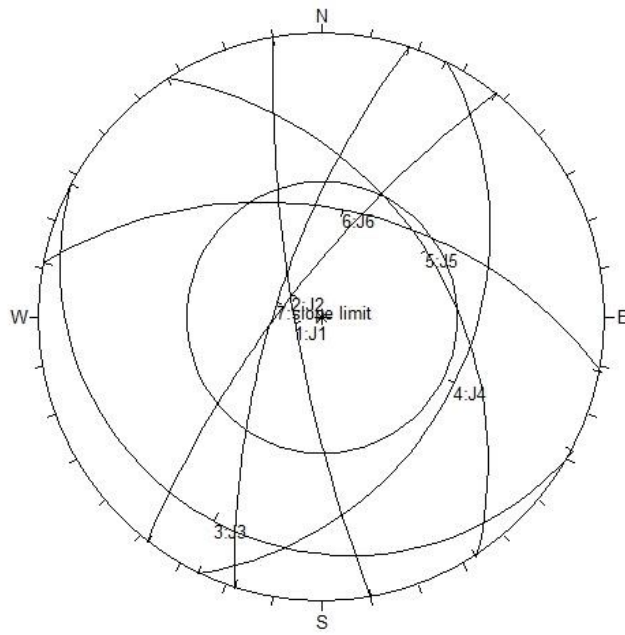


شکل الف ۹: شکست واژگونی بلوک ۳

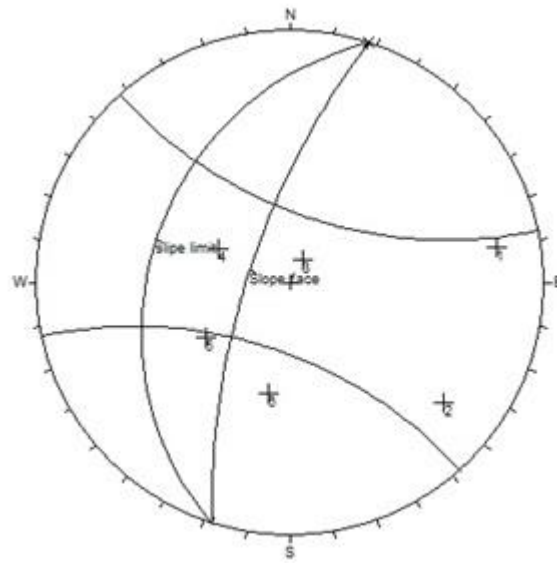
تحلیل سینماتیکی بلوک ۵



شکل الف ۱۰: شکست صفحه‌ای بلوک ۵



شکل الف ۱۱: شکست گوه‌ای بلوک ۵



شکل الف ۱۲: شکست واژگونی بلوک ۵

## پیوست ب

### ب-۱ گسل‌های اصلی

#### • گسل سروآباد

این گسل با راستای شمال غربی - جنوب شرقی و درازای تقریباً ۶۷ کیلومتر بین پاره‌های گسیخته شده مروارید و مریوان قرار گرفته است و در واقع بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس را تشکیل می‌دهد. این گسل در بخشی از مسیر خود از آبادیهای کرآباد و سروآباد عبور کرده و در راستای خود سنگهای افیولیتی را قطع کرده است. سازوکار این گسل از نوع راستگرد بوده و در امتداد آن می‌توان جابجایی یک سیستم آبراهه را به میزان تقریباً ۴۷ کیلومتر مشاهده کرد. این گسل از فاصله ۲۳ کیلومتری جنوب ساختگاه محور سد آزاد عبور می‌نماید و مرز زون ساختاری سنندج سیرجان و زاگرس را تشکیل می‌دهد (مهتاب قدس، ۱۳۹۰).

#### • گسل گرگینه

این گسل با راستای شمال غربی - جنوب شرقی در فاصله ۶/۲ کیلومتری غرب و شمال غربی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد عبور می‌کند. طول آن حدود ۸۵ کیلومتر بوده و سازوکار آن به طور دقیق مشخص نیست. عملکرد این گسل به لحاظ ریخت شناسی به صورت یک دره قابل پیگیری است. بواسطه عملکرد آن سنگهای به سن کرتاسه و پالئوسن بریده شده است. مدرکی دقیق دال بر فعالیت لرزه ای آن تاکنون ارائه نگردیده است. اطلاعات فوق، همگی نشان‌دهنده قدیمی بودن این گسل می‌باشد.

#### • گسل ساتیله

این گسل با راستای غالب شمال غربی - جنوب شرقی در فاصله ۳۲ کیلومتری شمال شرقی مخزن بالادست نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد واقع شده است. طول آن پیرامون ۸۵ کیلومتر بوده و سازوکار آن معکوس است. این گسل در امتداد خود سنگهایی به سن کرتاسه بالایی و پالئوسن و

اؤسن را بریده است. ردیابی گسل ساتیله بر روی تصاویر هوایی و ماهواره ای امکان پذیر ولی بر روی زمین بسیار دشوار است. به هرحال مدرکی دقیق دال بر فعالیت لرزه ای آن تاکنون ارائه نگردیده است. با توجه به مشخصات ذکر شده برای این گسل می توان آنرا گسلی قدیمی در نظر گرفت ولی با توجه به درازای قابل ملاحظه اش می توان آنرا بعنوان یک گسل اصلی در نظر گرفت.

## ب ۲ گسل های فرعی

### • گسل F<sub>1</sub>

این گسل در فاصله ۳۵۰ متری از دیواره شمالی مخزن به طول تقریبی حدود یک کیلومتر، با امتداد شمال غرب- جنوب شرق بر روی نقشه زمین شناسی مخزن منعکس شده است. در بررسی های صحرایی در محدوده انتهایی دره به سمت بالادست، آثار گسلش قابل ملاحظه است، که احتمالاً می تواند مربوط به عملکرد این گسل باشد.

### • گسل F<sub>2</sub>

گسل معکوس F<sub>2</sub> در حوالی کیلومتر ۳۵۰+۰ با راستای شمال شرق- جنوب غرب و به طول تقریبی کمتر از ۲ کیلومتر در محدوده جنوبی مخزن قابل مشاهده می باشد. بررسی های صحرایی. شیب گسل به سمت شمال غرب و نزدیک به قائم ارزیابی شده است.

### • گسل F<sub>3</sub>

گسل F<sub>3</sub> در دره مجاور ضلع شمالی محدوده مخزن با امتداد شمال شرق- جنوب غرب بر روی نقشه زمین شناسی نشان داده شده است. طول گسل حدود ۲۰۰ متر تخمین زده شده است. به دلیل پوشیدگی سنگ بستر رخنمونی از این گسل در منطقه مشاهده نشده ولی بررسی های صحرایی نشان دهنده به هم ریختگی لایه های سنگی در بخش هایی از مسیر گسل فوق در رخنمون های سنگی می باشد.

#### • گسل F4

گسل احتمالی F4 در دره مجاور ضلع شمال غربی محدوده مخزن با امتداد شمال غرب- جنوب شرق است. طول احتمال گسل حدود ۲۲۰ متر است. در این گسل نیز مانند گسل F3، به هم ریختگی لایه های سنگی در بخش هایی از مسیر آن دیده می شود.

#### • گسل F5

گسل F5 با شیب ۸۳ و جهت شیب ۲۶۰ با فاصله حدود ۷۰۰ متر از محدوده مخزن سد آزاد با تونل آب برنیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد تلاقی دارد. بررسی های صحرایی و مطالعات تصاویر ماهواره ای نشان می دهد که طول گسل حداقل ۲۰۰ متر می باشد.

#### • گسل F6

این گسل منطبق بر دره ایجاد شده در محدوده مسیر تونل آب بر با راستای شمال غرب- جنوب شرق می باشد. بر اساس تغییرات ایجاد شده در عوارض سطحی، طول احتمالی این گسل به حدود ۲۳۰ متر می رسد.

#### • گسل F7

گسل F7 منطبق بر دره ایجاد شده در مسیر تونل با راستای شمال غرب- جنوب شرق می باشد، طول گسل با توجه به مشاهدات صحرایی حدود ۲۵۰ متر برآورد شده است. با توجه به پوشیدگی مسیر گسل با مواد روباره، امکان تشخیص آن در سطح وجود ندارد ولی به دلیل ویژگی های یکسان واحدهای سنگی در این منطقه، حضور دره ای با این عمق که راستای لایه بندی را قطع می نماید، می تواند نشان دهنده حضور چنین گسلی باشد.

#### • گسل F8

گسل F8 در محدوده شرقی شهرک جدید بنی در و منطبق بر دره ایجاد شده است. با توجه به مشاهدات صحرایی طول گسل در حدود ۳۸۰ متر برآورد شده است. به دلیل پوشیدگی سنگ بستر

رخنمونی از این گسل در منطقه مشاهده نشده ولی بررسی های صحرائی نشان دهنده به هم ریختگی لایه های سنگی در بخش هایی از مسیر گسل فوق در رخنمون های سنگی می باشد.

• گسل F<sub>9</sub>

گسل معکوس F<sub>9</sub> با راستای شمال شرق-جنوب غرب در دره ایجاد شده در شمال غربی مخزن ایجاد شده است. با توجه به مشاهدات صحرائی، طول تقریبی گسل در حدود ۶۰۰ متر برآورد شده است. بررسی های صحرائی نشان دهنده وجود زون خرد شده ای کمتر از یک متر را تأیید می کند. شیب گسل به سمت شمال غرب و نزدیک به قائم ارزیابی شده است.

• گسل F<sub>10</sub>

گسل F<sub>10</sub> در فاصله در حدود ۲۰۰ متری شمال غربی نیروگاه ایجاد شده است. با توجه به مشاهدات صحرائی طول تقریبی گسل در حدود ۳۰۰ متر برآورد شده است.

## **Abstract**

For analyzing, designing and forecasting of structure proceeds which construct in or on the rock masses, need rock mass geomechanical properties understanding like resistance, flexibility, cohesion and friction angle.

In this research first due to numerous joint set existences in upper reservoir pumped storage power plant of Azad dam place and also dip of different slope geometry, probability failure types in reservoir have been identified. Then instrument data in northeast reservoir origin (faulty area about 400 meters) has been studied and also back analysis technic utilizing, rock mass geomechanical parameters such as deformation module, cohesion and friction angle  $\phi$  values of their 1Gpa, 127Kpa and 35 degree determined. Reservoir parameter which obtained with doing back analyzing can used as input parameters to stability analysis, support system optimum to stability analysis, support system optimum designing, deforming of support system safety and etc. In next step from analysis method for danger evaluation has been used. According to analysis done kargine fault with 7.3 in Richter scale as dangerous fault in study area was recognized. Finally whit dynamic analyses of mentioned reservoir, displacement and strain of slope different points of probability earthquake occurrence have been studied. The results of the dynamic analysis shows in the part of Northeast upper reservoir (faulty zone, which is the most critical zone in reservoir area) Horizontal displacement in the direction vertical the bench of the slope in a second stair of the critical points 20 cm and vertical displacement 5 cm appears is reached by Investigating the graph of shear strain in some parts of the second stair, the strain 0/06 Reaches, According to the this results in some parts of the reservoir will be Instability.

**Key words:** Slope stability, Numerical method, Back Analysis, Dynamic Analysis, Upper reservoir of Azad Dam





**Shahrood University**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**Slope stability analysis for upper reservoir pumped-storage power plant using numerical analysis (case study-Azad dam)**

**A thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of  
Master of Science in Mining exploration Eng.**

**Houshang Golbaghi**

Supervisors:

**Dr. Ali Moradzadeh**

**Dr. Mohammad esmaeilnia omran**

Advisor:

**Mohammad Reza Shahverdiloo**

March 2014