

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

مطالعه رفتار هیدرومکانیک توده سنگ درزه دار با هدف طراحی مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام – مطالعه موردی

نگارنده: عادل شوهانی نیا

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان زاده

استاد مشاور

دکتر مهدی نوروزی

تیر ۱۳۹۶

تقدیم به دو وجود مقدس:

آمان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...

موبایشان سپید شد تا ما رو سفید شویم ...

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و رو شکر را همان باشند ...

پدرم

مادرم

سپاس‌گذاری

سپاس از خداوند متعال که این راه را بر من، هموار ساخت تا این پایان نامه را به سرانجام رسانم. از استادان گرانقدر جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر مهدی نوروزی به عنوان استاد مشاور که نگارنده را در راستای به سرانجام رساندن این تحقیق راهنمایی نمودند، کمال تشکر را دارم. همچنین بر خود واجب می‌دانم تا از جناب مهندس ابوالقاسم اصفهانی که مراد مدل‌سازی این تحقیق راهنمایی و یاری نمود تشکر ویژه به عمل آورم. به علاوه از جناب مهندس جواد نصری که باتأمین داده‌های میدانی و برداشت‌های صحرایی از سازه سد کارون ۴، راه را بر من هموار ساخت، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

عادل شوهبانی‌نیا

تیرماه ۱۳۹۶

تعهد نامه

اینجانب عادل شوهانی‌نیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده مهندسی

معادن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان مطالعه رفتار هیدرومکانیک توده‌سنگ

درزه‌دار با هدف طراحی مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام - مطالعه موردی تحت راهنمایی دکتر احمد

رمضان‌زاده و مشاوره‌ی دکتر مهدی نوروزی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون 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 صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

تراوایی توده‌سنگ‌های درزه‌دار از مسائل مهم در مطالعات مهندسی زمین‌گرمایی، معدن، زمین‌شناسی مهندسی و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است. به دلیل عدم وجود تجربه کافی در تعیین سیستم حصار هیدرولیکی مناسب جهت طراحی و ساخت مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام در ایران، این تحقیق در راستای پیشبرد این مهم صورت گرفته است. تراوایی توده‌سنگ‌ها تنها تحت تأثیر خصوصیات هندسی سیستم درزه‌ها نیست، بلکه متأثر از میدان تنش و تغییرات آن نیز می‌باشد. مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت، امکان شناخت مؤثر عوامل کلیدی تأثیرگذار در جانمایی و طراحی سیستم کنترل نشت مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام را فراهم خواهد ساخت. به علت تصمیم کارفرما (شرکت پایانه‌های نفتی) جهت مطالعات ساخت مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری و از آنجا که ساختگاه سد و مغار کارون ۴ در سازند آسماری ساخته شده است، از این ساختگاه به‌منظور انجام این تحقیق استفاده شده است. مطالعه‌ی پیش‌رو خط مشی جهت تعیین روش مناسب به‌منظور مطالعات مشابه در ساختگاه‌های دیگر خواهد بود. در گام نخست، مطالعات صحرایی از ساختگاه سد مذکور شامل برداشت ناپیوستگی‌ها (جهت‌داری، بازشدگی، تداوم و ...) مورد بررسی قرار گرفته و سپس داده‌های برداشته شده توسط نرم‌افزارهای DIPS و EAST-FIT مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و توابع توزیع آماری حاکم بر خصوصیات ناپیوستگی‌های برداشت شده، بدست آمده است. در گام دوم، شبکه شکستگی‌های ناپیوسته ی (DFN) بر اساس داده‌های مذکور به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار المان ناپیوسته ی 3DEC ساخته شده است. در مرحله سوم، المان حجم معرف پایه (REV) تحت شرایط توأمان هیدرومکانیکی تخمین زده شده است. در مرحله چهارم، مقادیر نفوذپذیری بدست آمده توسط روش عددی در دو حالت توأمان هیدرومکانیکی و غیرتوأمان مقایسه شده سپس با مقادیر نفوذپذیری برجا توسط تست لوژن در ساختگاه سد کارون ۴ مقایسه و اعتبارسنجی شده است. در مرحله پنجم، مغار بدون پوشش با ابعاد مرسوم در دنیا، درون بلوک کالیبره شده حفاری گردیده و تحت شرایط توأمان هیدرومکانیک، پایداری مغار مدل‌سازی و تحلیل شده

است. سپس نرخ آب ورودی به درون مغار و همچنین فشار منفذی از طریق ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره‌ی آب زیرزمینی محاسبه شده است. در گام بعد همین مطالعات با تحلیل حساسیت پارامترهای مختلفی از قبیل عمق مغار و سفره آب زیرزمینی انجام و بررسی شده است. در مرحله نهایی، با ایجاد سیستم پرده‌ی آب مصنوعی، گمانه‌های پرده آب در چندین حالت متفاوت (ارتفاع از تاج مغار، فشار آب درون گمانه‌ها) مدل‌سازی و اجرا شده تا تغییرات نرخ آب ورودی به مغار و فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار در حضور پرده آب در مقایسه با عدم وجود پرده آب بدست آید. نرخ آب ورودی به داخل مغار با افزایش عمق قرارگیری مغار کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش ارتفاع سفره‌ی آب زیرزمینی از تاج مغار به دلیل افزایش هد فشار، نرخ آب ورودی به درون مغار افزایش یافته و نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سطح تراز سفره آب زیرزمینی بیشتر از عمق قرارگیری مغار می‌باشد. افزایش نسبت تنش افقی به قائم سبب اتساع برشی درزه‌ها و بازشدگی درزه‌ها شده و در نتیجه فشار منفذی و نرخ آب ورودی به درون مغار افزایش می‌یابد. ایجاد سیستم پرده‌ی آب سبب افزایش محسوس نرخ آب ورودی به مغار شده است. افزایش فشار آب درون گمانه‌های پرده‌ی آب سبب افزایش چشم‌گیر نرخ آب ورودی به مغار شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق قرارگیری مغار و تراز سفره آب زیرزمینی تأثیر کم‌تری نسبت به فشار آب سیستم پرده‌ی آب دارد.

واژه‌های کلیدی:

اندرکنش هیدرومکانیک، المان ناپیوسته ، مغار، ذخیره‌سازی، نفت خام، شبکه شکستگی‌های ناپیوسته ، المان حجم معرف پایه، تراوایی، توده‌سنگ درزه‌دار

فهرست مطالب

فصل اول - کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۱-۲- ضرورت مسئله ۳
- ۱-۳- هدف از انجام پایان نامه ۴
- ۱-۴- سوابق تحقیق ۵
- ۱-۵- روش تحقیق ۶
- ۱-۶- ساختار پایان نامه ۷

فصل دوم - فناوری ذخیره سازی نفت خام در مغارهای سنگی بدون پوشش

- ۲-۱- مقدمه ۱۲
- ۲-۲- تاریخچه ی ذخیره سازی زیرزمینی مواد نفتی ۱۳
- ۲-۳- اهداف و ضرورت های ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام [۱۷] ۱۵
- ۲-۴- الزامات زمین شناسی جهت ذخیره سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش ۱۶
- ۲-۵- شرایط ایده آل توده سنگ برای ذخیره سازی نفت در مغارهای سنگی بدون پوشش ۱۷
- ۲-۶- الزامات کلی در طراحی مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام ۱۸
- ۲-۷- تعیین پارامترهای طراحی ۱۹
- ۲-۱۰- سیستم پرده ی آب ۲۱

۱۱-۲- بستر آب متغیر ۲۶

۱۲-۲- جمع‌بندی ۲۷

فصل سوم - تراوایی و اندرکنش توأمان هیدرومکانیک در توده‌سنگ درزه‌دار

۱-۳- مقدمه ۳۰

۲-۳- جریان سیال در محیط متخلخل ۳۲

۱-۲-۳- روابط حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل ۳۳

۳-۳- جریان سیال در محیط درزه‌دار ۳۴

۱-۳-۳- جریان سیال در یک تک درزه با فرض صفحات صاف و موازی ۳۵

۲-۳-۳- عوامل مؤثر در حرکت سیال درون تک درزه منفرد ۳۷

۳-۳-۳- رفتار اتساعی درزه و تأثیر آن بر آب‌گذری ۳۷

۴-۳- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار ۳۸

۵-۳- نفوذپذیری وابسته به تنش در توده‌سنگ درزه‌دار ۳۹

۶-۳- تحلیل حساسیت تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی و تنش‌های محصور کننده بر نفوذپذیری توده

سنگ درزه‌دار ۴۲

۷-۳- ناهمسانگردی تنش برجا و نفوذپذیری ۴۴

۸-۳- تانسور نفوذپذیری دوبعدی ۴۴

۱-۸-۳- تانسور نفوذپذیری سه‌بعدی ۴۷

۹-۳- جمع‌بندی ۴۹

فصل چهارم - بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه

۱-۴- مقدمه	۵۲
۲-۴- کلیات و زمین‌شناسی سد کارون ۴	۵۲
۳-۴- واحدهای چینه‌شناسی	۵۳
۴-۴- زمین‌شناسی ساختمانی سد کارون ۴	۵۳
۵-۴- نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی	۵۴
۴-۵-۱- آزمایش برش مستقیم بر روی سطوح ناپیوستگی طبیعی [۳۹]	۵۴
۶-۴- آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ	۵۵
۴-۶-۱- آزمایش دیلاتومتري	۵۵
۴-۶-۲- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای	۵۵
۷-۴- پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه سد کارون ۴	۵۶
۸-۴- توصیف هندسی توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی‌های ناپیوسته	۵۶
۹-۴- توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها	۵۸
۴-۹-۱- توزیع جهت‌داری	۵۸
۴-۹-۲- توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر شکستگی‌ها	۵۹
۴-۹-۳- توابع توزیع حاکم بر بازشدگی شکستگی‌ها	۶۰
۴-۹-۴- شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو	۶۰
۱۰-۴- مطالعات میدانی	۶۱
۴-۱۰-۱- تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها	۶۴
۴-۱۰-۲- تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها	۶۶
۴-۱۰-۳- فراوانی و فاصله‌داری شکستگی‌های توده‌سنگ	۶۹
۱۱-۴- جمع‌بندی	۷۲

فصل پنجم - مدل‌سازی عددی تراوایی توده‌سنگ درزه‌دار

۷۴	۱-۵ - مقدمه
۷۴	۲-۵ - مفهوم المان حجم معرف پایه
۷۶	۳-۵ - تولید شبکه شکستگی ناپیوسته ساختگاه سد کارون ۴ در نرم افزار 3DEC
۷۸	۴-۵ - تخمین نفوذپذیری سه بعدی توده سنگ درزه دار ساختگاه سد کارون ۴
۷۸	۱-۴-۵ - تخصیص پارامترهای ژئومکانیکی و هیدرولیکی به مدل عددی در نرم افزار 3DEC
۷۹	۲-۴-۵ - تخمین تنش های افقی
۸۲	۳-۴-۵ - برآورد مؤلفه های نفوذپذیری
۸۲	۱-۳-۴-۵ - تخمین مؤلفه های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای x
۸۳	۲-۳-۴-۵ - تخمین مؤلفه های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای y
۸۴	۳-۳-۴-۵ - تخمین مؤلفه های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای z
۸۴	۴-۳-۴-۵ - برآورد مقادیر نفوذپذیری سه بعدی در حالت اندرکنش توأمان
۸۵	۵-۳-۴-۵ - مقایسه مقادیر نفوذپذیری در حالت اندرکنش توأمان و غیر توأمان
۸۷	۴-۴-۵ - محاسبه و ترسیم بردارهای نفوذپذیری اصلی توسط نرم افزار MATLAB
۸۹	۵-۴-۵ - تخمین المان حجم معرف پایه REV توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴
۹۱	۶-۴-۵ - تخمین نفوذپذیری توسط تست لوژن
۹۳	۵-۵ - جمع بندی

فصل ششم - مدل سازی توأمان مغار ذخیره سازی نفت خام

.....	۱-۶ - مقدمه
۹۶	۲-۶ - ایجاد سفره آب زیرزمینی و اشباع مدل
۹۶	۳-۶ - حفاری مغار درون بلوک درزه دار کالیبره شده
۱۰۰	۴-۶ - سناریوهای مدل سازی توأمان مغار ذخیره سازی نفت خام
۱۰۳	۱-۴-۶ - تخمین فشار منفذی درون ناپیوستگی های متقاطع با مرز مغار
۱۱۱	۲-۴-۶ - تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی (بدون پرده آب)
۱۱۵	۳-۴-۶ - محاسبه نرخ آب ورودی به درون مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی و سیستم پرده ای آب

۱۱۹ ۵-۶- جمع بندی

۱۲۲ ۱-۷- جمع بندی

۱۲۳ ۲-۷- نتیجه گیری

۱۲۵ ۳-۷- پیشنهادات

۱۲۷ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ توزیع مغارهای سنگی ذخیره‌کننده‌ی نفت خام در جهان با توجه به نوع سنگ [۱۹]..... ۱۷
- شکل ۲-۲ فشار آب زیرزمینی باید بیشتر از فشار وارده از طرف محصول باشد [۲۱]..... ۲۱
- شکل ۳-۲ ایجاد پرده‌ی آب با حفاری از طریق تونل‌های کوچک بالای مغارها [۲۵]..... ۲۲
- شکل ۴-۲ چیدمان‌های مرسوم گمانه‌ها در سیستم پرده‌ی آب [۲۷]..... ۲۵
- شکل ۵-۲ چیدمان گمانه‌های آب در توده‌سنگ با توجه به شیب ناپیوستگی‌ها [۲۷]..... ۲۶
- شکل ۱-۳ طرح شماتیکی از آزمایش دارسی [۳۰]..... ۳۳
- شکل ۲-۳ توزیع سهمی‌وار جریان بین دو صفحه صاف و موازی [۲۹]..... ۳۶
- شکل ۳-۳ عوامل مؤثر بر جریان سیال در تک درزه منفرد [۳۲]..... ۳۷
- شکل ۵-۳ تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق از سطح زمین [۷]..... ۴۱
- شکل ۶-۳ ارتباط بازشدگی دهانه درزه و فشار سیال [۷]..... ۴۱
- شکل ۸-۳ شرایط مرزی هیدرولیکی و جهت جریان در راستاهای اصلی و متقاطع [۶]..... ۴۵
- شکل ۹-۳ تانسور نفوذپذیری حداقل و حداکثر توده‌سنگ [۶]..... ۴۷
- شکل ۱۰-۳ شرایط مرزی اعمال‌گرادیان تنش منفذی در مدل سه‌بعدی [۳۶]..... ۴۸
- شکل ۱۱-۳ شرایط مرزی جریان سیال در صفحات دستگاه مختصات [۳۷]..... ۴۹
- شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیایی سد کارون ۴ [۳۹]..... ۵۳
- شکل ۲-۴ روش‌های برداشت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در رخنمون‌ها [۴۰]..... ۵۸
- شکل ۳-۴ روند تولید شبکه شکستگی‌های ناپیوسته با استفاده از روش مونت کارلو [۴۰]..... ۶۱
- شکل ۴-۴ اندازه‌گیری بازشدگی و پرشدگی یکی از درزه‌های برداشت شده از رخنمون سطحی..... ۶۲
- شکل ۵-۴ نمایی از متر نواری جهت اندازه‌گیری فاصله‌داری درزه‌های ساختگاه سد کارون ۴..... ۶۲
- شکل ۶-۴ استریونت دسته درزه‌های غالب و جهت‌داری هر دسته درزه در ساختگاه سد کارون ۴..... ۶۳
- شکل ۷-۴ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۱..... ۶۵
- شکل ۸-۴ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۲..... ۶۵
- شکل ۹-۴ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۳..... ۶۶
- شکل ۱۰-۴ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۱..... ۶۸
- شکل ۱۱-۴ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۲..... ۶۸
- شکل ۱۲-۴ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۳..... ۶۹
- شکل ۱۳-۴ ثوابت a, b و c جهت محاسبه‌ی ضریب C_{13} [۴۵]..... ۷۱
- شکل ۱-۵ نمودار امان حجم معرف پایه جهت تخمین قابلیت هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ درزه‌دار [۵۰]..... ۷۵
- شکل ۲-۵ شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک دسته درزه‌ها..... ۷۶
- شکل ۳-۵ شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک قطر درزه‌ها..... ۷۷
- شکل ۴-۵ شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک بازشدگی درزه‌ها..... ۷۷
- شکل ۵-۵ شرایط مرزی هیدرولیکی مدل عددی [۳۶]..... ۸۱

- شکل ۵-۶ شرایط مرزی هیدرولیکی جهت تخمین نفوذپذیری در مدل عددی [۳۷] ۸۲
- شکل ۵-۷ شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای x [۳۷] ۸۳
- شکل ۵-۸ شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای y [۳۷] ۸۴
- شکل ۵-۹ شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای z [۳۷] ۸۴
- شکل ۵-۱۰ مقادیر تیپیک نفوذپذیری ماده سنگ و خاک‌های مختلف [۵۲] ۸۶
- شکل ۵-۱۱ نمودار مقایسه مقادیر اصلی نفوذپذیری در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان ۸۷
- شکل ۵-۱۲ نمودار سه‌بعدی بردارهای اصلی نفوذپذیری توده سنگ در ابعاد ۱۴ متر ۸۹
- شکل ۵-۱۳ نمودار المان حجم معرف پایه REV ساختگاه سد کارون ۴ ۹۰
- شکل ۵-۱۴ نتایج آزمایش لوژن ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹] ۹۲
- شکل ۵-۱۵ نمودار نفوذپذیری - عدد لوژن متناظر با نتایج نهایی تست لوژن ساختگاه سد کارون ۴ ۹۳
- شکل ۶-۱ فشار منفذی سیال بر اساس هد ناشی از سفره آب زیرزمینی ۹۷
- شکل ۶-۲ گام‌های حفاری مغار در مدل عددی ۹۸
- شکل ۶-۳ کنتور جابجایی در اطراف مغار پس از حفاری کامل ۹۹
- شکل ۶-۴ نمودار نیروهای نامتعادل پس از ۵ گام حفاری مغار ۹۹
- شکل ۶-۵ فشار منفذی در توده سنگ در زده‌دار ناشی از هد سفره آب زیرزمینی ۱۰۰
- شکل ۶-۶ سناریوهای مدل‌سازی عددی ۱۰۱
- شکل ۶-۷ موقعیت سفره آب زیرزمینی نسبت به مغار و عمق قرارگیری در مدل عددی ۱۰۲
- شکل ۶-۸ مغار و گمانه‌های پرده آب در مدل عددی ۱۰۳
- شکل ۶-۹ نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ ۱۰۶
- شکل ۶-۱۰ نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ ۱۰۶
- شکل ۶-۱۱ نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ ۱۰۷
- شکل ۶-۱۲ نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ای آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ ۱۰۹
- شکل ۶-۱۳ نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ای آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ ۱۰۹
- شکل ۶-۱۴ نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ای آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ ۱۱۰
- شکل ۶-۱۵ فشار منفذی درون ناپیوستگی‌ها ناشی از سیستم پرده آب با فشار ۱ بار (مقطع عرضی مغار) ۱۱۰
- شکل ۶-۱۶ مقطع عرضی مغار و سیستم درزه‌داری ۱۱۲
- شکل ۶-۱۷ مقطع طولی مغار و سیستم درزه‌داری ۱۱۲
- شکل ۶-۱۸ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ (بدون سیستم پرده آب) ۱۱۴
- شکل ۶-۱۹ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ (بدون سیستم پرده آب) ۱۱۴
- شکل ۶-۲۰ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ (بدون سیستم پرده آب) ۱۱۵
- شکل ۶-۲۱ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ (در حضور سیستم پرده آب) ۱۱۷
- شکل ۶-۲۲ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ (در حضور سیستم پرده آب) ۱۱۷
- شکل ۶-۲۳ تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ (در حضور سیستم پرده آب) ۱۱۸

شکل ۶-۲۴- بردارهای نرخ جریان آب به داخل مغار در مدل عددی..... ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- تاریخچه و محل ساخت فضاهای زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد نفتی [۱۶ و ۱۷]..... ۱۵
- جدول ۲-۲- پارامترهای اساسی پرده‌ی آب در پروژه‌های مغارهای ذخیره‌سازی..... ۲۴
- جدول ۳-۲- مزایا و معایب ذخیره‌سازی با روش بستر آب متغیر [۲۱]..... ۲۷
- جدول ۱-۳- تاریخچه تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ (ژنگ و راتکوئیست، ۲۰۰۳) [۶ و ۷] .. ۳۱
- جدول ۲-۳- تاریخچه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ (رَمندی و همکاران ۲۰۱۶)..... ۳۲
- جدول ۱-۴- نتایج تست‌های آزمایشگاهی به صورت میانگین انواع سنگ ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]..... ۵۴
- جدول ۲-۴- نتایج آزمایش برش مستقیم روی سطوح ناپیوستگی طبیعی [۳۹]..... ۵۴
- جدول ۳-۴- مقدار میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری حاصل از آزمایش دیلاتومتري در سازند آسماری [۳۹]..... ۵۵
- جدول ۴-۴- میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌های ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]..... ۵۵
- جدول ۵-۴- مقادیر نهایی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]..... ۵۶
- جدول ۶-۴- توابع توزیع آماری مرسوم در تولید شبکه شکستگی ناپیوسته [۴۰]..... ۵۸
- جدول ۷-۴- مشخصات هندسی سیستم درزه‌های ساختگاه سد کارون ۴..... ۶۳
- جدول ۸-۴- اولویت‌بندی توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته درزه‌ها..... ۶۴
- جدول ۹-۴- نتایج تحلیل‌های توابع توزیع نرمال حاکم بر طول خط اثر دسته درزه‌ها..... ۶۶
- جدول ۱۰-۴- اولویت‌بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها..... ۶۷
- جدول ۱۱-۴- نتایج تحلیل‌های توابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه‌ها..... ۶۷
- جدول ۱۲-۴- مقادیر سختی برشی و نرمال دسته درزه‌ها [۳۹]..... ۶۹
- جدول ۱۳-۴- ضریب $1/C_{13}$ در مقابل ثابت فیشر K و زاویه‌ی ρ [۴۵]..... ۷۱
- جدول ۱۴-۴- نتایج فراوانی طولی و شدت حجمی دسته درزه‌های توده‌سنگ ساختگاه سد..... ۷۲
- جدول ۱-۵- پارامترهای تخصیص یافته به ماده‌سنگ در مدل عددی [۳۹]..... ۷۹
- جدول ۲-۵- پارامترهای مکانیکی تخصیص یافته به درزه‌ها در مدل عددی [۲۹]..... ۷۹
- جدول ۳-۵- خصوصیات سیال (آب) تخصیص یافته به مدل عددی [۳۸]..... ۷۹
- جدول ۴-۵- روابط تجربی تخمین نسبت تنش افقی به قائم [۵۱]..... ۸۰
- جدول ۵-۵- مقادیر میانگین نسبت تنش افقی به قائم (K) ۸۱
- جدول ۶-۵- مقادیر اینواریانتهای اول تا سوم ماتریس نفوذپذیری بلوک ۱۴ متری..... ۸۸
- جدول ۷-۵- مقادیر برداری حداقل، متوسط و حداکثر نفوذپذیری سه‌بعدی بلوک ۱۴ متری..... ۸۸
- جدول ۱-۶- مشخصات گمانه‌های پرده آب..... ۱۰۳
- جدول ۲-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 1/5$ (بدون پرده آب)..... ۱۰۴
- جدول ۳-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 2$ (بدون پرده آب) ۱۰۵
- جدول ۴-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 2/5$ (بدون پرده آب)..... ۱۰۵
- جدول ۵-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب $(K = 1/5)$ ۱۰۷

- جدول ۶-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب ($K = 2$) ۱۰۸
- جدول ۶-۷- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب ($K = 2/5$) ۱۰۸
- جدول ۶-۸- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی، $K = 1/5$ (بدون پرده آب) ۱۱۳
- جدول ۶-۹- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی، $K = 2$ (بدون پرده آب) ۱۱۳
- جدول ۶-۱۱- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 1/5$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر) ۱۱۶
- جدول ۶-۱۲- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 2$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر) ۱۱۶
- جدول ۶-۱۳- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 2/5$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر) ۱۱۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

واژه‌ی "کوپل هیدرومکانیک" به اندرکنش توأمان پروسه‌ی مکانیکی و هیدرولیکی اطلاق می‌گردد [۱]. ساخت سازه‌های زیرزمینی در توده‌سنگ سبب تغییر در شرایط تنش و در نتیجه تغییر شکل ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر می‌شود. به دلیل سختی ماتریکس سنگ نسبت به ناپیوستگی‌ها، اکثر تغییر شکل‌ها در ناپیوستگی‌ها به صورت جابجایی‌های فشاری و برشی رخ داده و باعث بسته‌شدن، بازشدگی، رشد و حتی تشکیل ناپیوستگی‌های جدید می‌گردد و در نتیجه تغییراتی در ساختار توده‌سنگ و جریان سیال را در پی خواهد داشت [۲]. ماتریکس سنگ در مقابل عبور سیال از خود مقاومت نشان می‌دهد و در نتیجه ناپیوستگی‌ها مجرای اصلی جریان سیال در توده‌سنگ می‌باشند. جریان سیال در توده‌سنگ یکنواخت نبوده و پارامترهای ناپیوستگی از جمله بازشدگی، پایایی، فاصله‌داری و جهت‌داری و شرایط مرزی مانند تغییرات تنش، بارگذاری و باربرداری و غیره تأثیر به‌سزایی بر این تغییرات دارد [۳]. هرچقدر بازشدگی هیدرولیکی ناپیوستگی بزرگتر باشد، نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. تغییر در تنش‌های کششی، فشاری و اتساع سبب تغییر در بازشدگی هیدرولیکی شده و لذا مقدار جریان عبوری سیال نیز به تبع تغییر می‌یابد (بارتون، بندیس و باختر ۱۹۸۵)^۱. به دلیل مشکلات فنی و دشواری روش‌های آزمایشگاهی در مطالعه‌ی شبکه‌ی ناپیوستگی‌ها، امروزه بیشتر تحقیقات در زمینه‌ی اندرکنش توأمان توسط مدل‌های ریاضی و عددی صورت می‌گیرد. این روش‌ها به دو دسته‌ی مدل‌های پیوسته و المان ناپیوسته تقسیم می‌شوند. در روش المان ناپیوسته، تغییر شکل و جریان در توده‌سنگ به صورت صریح مدل‌سازی شده و به راحتی می‌توان جریان آنیزوتروپ و ناهمگن را که ناشی از توزیع تصادفی درزه‌ها و بازشدگی هیدرولیکی می‌باشد، توصیف نمود. افرادی از جمله (مین، جینگ و استفانسون ۲۰۰۴^۲، باغبانان و جینگ ۲۰۰۸^۳، ژائو، جینگ، نِرتِنکس و مورنو

1- Barton, Bandis & Bakhtar

2- Min, Jing & Stephansson

3- Baghbanan and Jing

۲۰۱۱^۱، با تولید شبکه‌ی شکستگی تصادفی بر اساس داده‌های آماری بدست آمده از برداشت‌های صحرایی، به مطالعه‌ی تأثیرات تنش بر جریان سیال و نفوذپذیری در توده‌سنگ پرداخته‌اند [۴]. سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ دارای هندسه‌ی پیچیده‌ای می‌باشد. کمیت و کیفیت پارامترهای هندسی بدست آمده توسط برداشت سطحی بر روی رخنمون‌های توده‌سنگ و لاگ‌های گمانه‌ای (با قطر و عمق محدود) با عدم قطعیت‌های زیادی همراه هستند. جهت کاهش این عدم قطعیت‌ها و توصیف واقع‌گرایانه‌تر سیستم شکستگی‌ها، استفاده از شبکه‌ی شکستگی‌های ناپیوسته (DFN)^۲ با فرض توزیع تصادفی پارامترهای ناپیوستگی توصیه می‌گردد [۵]. تحقیقات صورت گرفته توسط ژانگ و ساندرسون^۳ نشان می‌دهد که روش عددی المان ناپیوسته بکار گرفته شده در نرم‌افزار UDEC و 3DEC [۷] جهت مدل‌سازی جریان سیال و تغییر شکل ناپیوستگی‌های توده‌سنگ و محاسبات کوپل هیدرومکانیک مناسب می‌باشد [۶]. در دهه‌های اخیر تحقیقات و مطالعات چشم‌گیری در زمینه‌ی اندرکنش توأمان هیدرومکانیکی بین جریان سیال و رفتار مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار و همچنین پارامترهای تغییر حالت جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار به صورت تجربی و تحلیلی صورت گرفته است [۳]. پیشرفت در این زمینه باعث شده تا توجه بیشتری به پدیده‌ی اندرکنش توأمان گردد. تحلیل موضوعات کاربردی پیچیده از قبیل شکست در ساختگاه سدها، دفن زباله‌های هسته‌ای، نفوذ آب زیرزمینی درون تونل‌ها و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی سبب گشته تا اندرکنش توأمان هیدرومکانیکی به یه موضوع جدید و مهم در مکانیک سنگ بدل گردد [۷].

۱-۲- ضرورت مسئله

به‌منظور مدل‌سازی‌های عددی نحوه‌ی اندرکنش هیدرومکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار و همچنین مطالعات امکان‌سنجی ساخت سازه‌هایی نظیر مغارهای سنگی بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام، که نیازمند توانایی محاسبه‌ی تراوایی توده‌سنگ درزه‌دار است، ارائه‌ی روشی در راستای این هدف امری

1- Zhao, Jing, Neretnieks & Moreno

3- Discrete Fracture Network

3- Zhang & Sanderson

اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. ارائه‌ی راهکار مناسب به منظور تسهیل توان محاسبه‌ی مقادیر تراوایی توده‌سنگ در شرایط برجا همزمان با در نظر گرفتن میدان تنش‌های موجود و تغییر در شرایط هندسی درزه‌ها، دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. کاربردهای نتایج حاصل از مطالعات مشابه، راه‌گشای حل بسیاری از مسائل مهم طراحی و اجرای حفريات زیرزمینی با کاربردهای مختلف من جمله: ذخیره‌سازی نفت در مغارهای سنگی بدون پوشش با هزینه بسیار کم‌تر از ذخیره‌سازی سطحی در حجم‌های بزرگ مقیاس، تخمین نرخ آب ورودی به تونل‌ها، نفوذپذیری ساختگاه سد، دفن زباله‌های هسته‌ای، تخمین بار هیدرولیکی وارد بر سازه‌های مهندسی، استحصال انرژی زمین گرمایی و غیره می‌باشد.

۱-۳- هدف از انجام پایان‌نامه

اهداف اصلی این تحقیق، مطالعه‌ی تأثیر میدان تنش بر تغییرات تراوایی توده‌سنگ درزه‌دار به روش المان ناپیوسته و همچنین ارزیابی تغییرات تراوایی توده‌سنگ در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان می‌باشد. نهایتاً مقایسه درجه‌ی اهمیت و تأثیرگذاری پارامترهای هندسی سیستم پرده آب و میدان تنش بر میزان تغییرات تراوایی توده‌سنگ درزه‌دار صورت خواهد گرفت. نتایج این تحقیق کاربرد ویژه‌ای در طراحی حفريات زیرزمینی جهت ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای بدون پوشش خواهد داشت. از آنجا که تا کنون در ایران طراحی حفريات زیرزمینی با این کاربرد صورت نگرفته است، در این پایان‌نامه از داده‌های یکی از سدهای جنوب کشور استفاده شده است. به علت تصمیم کارفرما (شرکت پایانه‌های نفتی) به انجام مطالعات جهت ساخت مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری و از آنجا که ساختگاه سد و مغار کارون ۴ در سازند آسماری ساخته شده است، از این ساختگاه به‌منظور انجام این تحقیق استفاده شده است.

۱-۴- سوابق تحقیق

در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، تحلیل اندرکنش توأمان هیدرولیکی و مکانیکی در توده سنگ درزه دار مورد توجه قرار گرفت. حوادثی از قبیل خرابی سدها، زمین لغزش و غیره نتیجه‌ی تأثیر اندرکنش توأمان هیدرومکانیک می‌باشد. به علاوه، استفاده از کامپیوتر در دهه ۱۹۷۰ امکان تحلیل فرآیندهای غیر خطی مانند کوپل تنش-نفوذپذیری در توده سنگ را فراهم آورد. تحقیقات توسط ویلبور و آمادی (۱۹۹۰)^۱ نشان داده است که جریان سیال درون درزه‌ها با تغییر تنش‌های نرمال وارده تغییر می‌نماید و همچنین درزه‌هایی که دیواره‌ی آنها در جهت تنش اصلی حداقل قرار گرفته شده است، حداکثر هدایت هیدرولیکی را دارا می‌باشند. مطالعات گذشته در مورد تأثیر تنش بر آب‌گذری درزه‌ها در توده سنگ با روش المان ناپیوسته انجام شده است. شبکه ناپیوستگی‌های ناپیوسته به صورت گسترده برای محاسبه‌ی نفوذپذیری معادل بکار گرفته شده است. مطالعه‌ی جامع توسط مین و همکاران (۲۰۰۴)^۲ با فرض اتساع درزه‌ها و مدل‌سازی DFN با در نظر گرفتن المان حجم معرف پایه، نقطه‌ی شروعی برای پیشرفت در زمینه‌ی تأثیر تنش بر جریان سیال و نفوذپذیری وابسته به مقیاس در توده سنگ درزه دار می‌باشد. تأثیر شرایط آنیزوتروپی بر تراوایی توده سنگ توسط سان و ژائو (۲۰۱۰)^۳ با روش‌های عددی صورت گرفته است. تحقیقات وسیع‌تری به منظور بررسی تأثیر آنیزوتروپی بر تراوایی، از حالت دو بعدی به سه بعدی توسط سان و همکاران (۲۰۱۱)^۴ انجام شده است و نتایج نشان داده که آنیزوتروپی تأثیر عمده‌ای بر آب‌گذری درزه‌ها دارد. محاسبه و تحقیق در مورد نرخ آب ورودی به درون مغار و همچنین فشار آب منفذی در ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار توسط یو، دنگ، لی و زایا (۲۰۱۳) صورت گرفته است که در این تحقیق این محاسبات به روش

^۱ Wilbur & Amadei

^۲ Min KB et al

^۳ Sun & Zhao

^۴ Sun et al

تفاضل محدود با استفاده از نرم افزار سه بعدی FLAC 3D صورت گرفته است. در نتیجه مقادیر بدست آمده در این روش نمی تواند از صحت و دقت کافی در مقایسه با روش المان ناپیوسته در شرایط حضور ناپیوستگی ها برخوردار باشد. همچنین تأثیر تغییرات فشار آب درون سیستم پرده آب بر فشار منفذی درون ناپیوستگی ها توسط روندی، رحمان نژاد، کریمی نسب و صرافی (۲۰۱۶) با استفاده از روش تفاضل محدود نرم افزار FLAC 3D انجام شده است، که به دلیل حضور مؤثر سیستم درزه داری و عدم استفاده از روش المان ناپیوسته نمی تواند از دقت کافی برخوردار باشد. در این پایان نامه نرخ آب ورودی به درون مغار و همچنین فشار آب منفذی درون ناپیوستگی های متقاطع با مرز مغار با استفاده از روش المان ناپیوسته توسط نرم افزار سه بعدی 3DEC محاسبه شده است.

۱-۵- روش تحقیق

به منظور اطلاع از آخرین یافته ها در کاربرد مدل سازی رفتار توأمان، ابتدا به مطالعات کتابخانه ای و تحقیق در مورد کارهای انجام شده پرداخته شده است. همان طور که در بخش ۱-۳ ذکر گردید، به علت تصمیم کارفرما (شرکت پایانه های نفتی) جهت مطالعات ساخت مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری و از آنجا که ساختگاه سد و مغار کارون ۴ در سازند آسماری ساخته شده است، از این ساختگاه به منظور انجام این تحقیق استفاده شده است. در گام بعد به ارزیابی درزه ها و بدست آوردن دسته درزه ها و ثوابت فیشر توسط نرم افزار DIPS و سپس ارزیابی توابع توزیع متناسب با بازشدگی، فاصله داری و طول خط اثر درزه ها با استفاده از نرم افزار EASY-FIT پرداخته شده است. در مرحله ی بعد مدل های DFN از منطقه با ابعاد مختلف از کوچک تا بزرگ توسط نرم افزار سه بعدی تولید شبکه ناپیوستگی 3DEC ساخته می شود. مدل سازی عددی توده سنگ درزه دار (مدل مرجع) بر اساس شبکه ناپیوستگی ناپیوسته بدست آمده توسط نرم افزار المان ناپیوسته ی 3DEC ساخته خواهد شده و سپس اندازه المان حجم معرف پایه از رفتار توأمان هیدرومکانیکی سنگ تعیین می شود. سپس به کالیبره کردن مدل مرجع پرداخته شده و رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ منطقه مورد مطالعه با توجه

به اندازه REV مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از این مرحله، هندسه‌ای از یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام در نرم‌افزار 3DEC با ابعاد متناسب و مرسوم با این نوع مغارها ساخته شده و پس از قرارگیری در عمق مناسب زیر سطح زمین و تعیین عمق سطح آب زیرزمینی و در صورت نیاز با ایجاد پرده‌ی آب نسبت به مغار، با اعمال شرایط مرزی و خصوصیات توده‌سنگ منطقه‌ی مورد مطالعه و شبکه‌ی شکستگی ناپیوسته‌ی احاطه‌کننده‌ی مغار، دبی آب ورودی به مغار و فشار منفذی درون درزه‌های متقاطع با مرز مغار محاسبه می‌گردد. سپس به تحلیل حساسیت (عمق قرارگیری مغار و همچنین فاصله‌ی سطح آب زیرزمینی نسبت به مغار و سیستم پرده‌ی آب) پرداخته شده و تغییرات دبی آب ورودی به مغار و فشار منفذی درون ناپیوستگی‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در نهایت به جمع‌بندی و مقایسه‌ی نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

مطالب این پایان‌نامه در هفت فصل به شرح زیر تدوین شده است:

- در فصل اول مقدمه‌ای بر جریان سیال و کوپل هیدرومکانیکی در توده‌سنگ درزه‌دار ارائه شده

و سپس

به ضرورت مسئله، هدف انجام پایان‌نامه، سوابق و روش تحقیق پرداخته شده است.

- در فصل دوم به معرفی فناوری مغارهای سنگی بدون پوشش ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری

و سیستم کنترل نشت پرداخته شده است. ابتدا مقدمه‌ای جهت آشنایی با این نوع مغارها

آورده شده و سپس به اهداف، ضرورت‌ها و تاریخچه‌ی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد

هیدروکربوری پرداخته شده است. سپس به اصول ساخت و الزامات طراحی مغارهای بدون

پوشش، روش‌ها و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در

مغارهای بدون پوشش و همچنین سیستم پرده‌ی آب، الزامات زمین شناسی جهت

ذخیره‌سازی، کنترل نشت، تعیین پارامترهای طراحی و شرایط ایده‌آل ذخیره‌سازی مواد

هیدروکربوری در این نوع مغارها پرداخته شده است.

- در فصل سوم به مفهوم تراوایی و اندرکنش توأمان هیدرومکانیکی در توده سنگ درزه دار پرداخته شده است. پارامترهای مؤثر بر آب‌گذری ناپیوستگی‌ها در توده سنگ شامل بازشدگی، طول خطر اثر، عمق و غیره در شرایط اندرکنش توأمان هیدرومکانیکی به منظور ارزیابی نحوه‌ی تأثیر تنش بر تراوایی توده سنگ مورد بحث و بررسی واقع شده است. همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی جهت تخمین ماتریس نفوذپذیری سه‌بعدی در مدل عددی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

- در فصل چهارم به معرفی ساختگاه سد کارون ۴ و وضعیت زمین‌شناسی و ژئومکانیکی این ساختگاه پرداخته شده است. جداول پارامترها و مقادیر بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی و برجای مکانیک سنگی و هیدرولیکی از ساختگاه سد کارون ۴ نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. سپس داده‌های صحرایی برداشت شده از ناپیوستگی‌های ساختگاه به منظور تعیین دسته درزه‌ها، خصوصیات پارامتری و توابع توزیع آماری حاکم بر هریک آورده شده و توسط نرم‌افزارهای DIPS و EASY-FIT مورد تحلیل قرار گرفته و مقادیر فراوانی خطی و شدت حجمی دسته درزه‌ها محاسبه گردیده است.

- در فصل پنجم به مدل‌سازی عددی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ توسط نرم‌افزار المان ناپیوسته ی 3DEC پرداخته شده و پس از ساخت شبکه شکستگی‌های ناپیوسته (DFN) ساختگاه مذکور بر اساس داده‌های بدست آمده از فصل چهارم، وضعیت نفوذپذیری و نرخ آب‌گذری توده سنگ ساختگاه به‌منظور تخمین المان حجم معرف پایه (REV) تحت کوپل هیدرومکانیکی تحلیل و مدل‌سازی شده است. همچنین مقادیر نفوذپذیری بدست آمده در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان مقایسه شده و سپس توسط با مقادیر برجا توسط تست لوژن مقایسه و اعتبارسنجی شده است.

- در فصل ششم، هندسه مغار ذخیره‌سازی بر اساس ابعاد نمونه‌های مشابه در دنیا درون توده سنگ درزه دار مذکور ایجاد و حفاری شده است. سپس شرایط پایداری مغار در حضور

سفره‌ی آب زیرزمینی تحت اندرکنش هیدرومکانیک ارزیابی شده است. در مرحله بعد فشار آب منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع به مرز مغار ناشی از سفره زیرزمینی و سیستم پرده آب بررسی شده است. سپس نرخ آب ورودی به درون مغار از طریق ناپیوستگی‌های توده‌سنگ دربرگیرنده محاسبه شده و تحلیل حساسیت با تغییر تراز سفره‌ی آب زیرزمینی، نسبت تنش افقی به قائم و همچنین عمق مغار صورت گرفته است. در گام آخر، با ایجاد سیستم پرده‌ی آب مصنوعی به‌صورت گمانه‌هایی در بالای تاج مغار، نرخ آب ورودی به داخل مغار محاسبه شده و همچنین فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار نیز تخمین زده می‌شود. تغییرات مقادیر نرخ آب در این شرایط در مقایسه با عدم وجود پرده آب بررسی و تحلیل شده و همچنین تحلیل حساسیت سیستم پرده آب نیز انجام شده است.

- فصل هفتم شامل نتیجه‌گیری کلی و جمع‌بندی مطالب و پیشنهادات به‌منظور مطالعات آینده می‌باشد.

فصل دوم

فناوری ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی بدون پوشش

از جنگ داخلی اسپانیا به بعد، طراحی و اجرای مغارهای ذخیره‌سازی نفت و گاز در بسیاری از کشورها صورت گرفته است. از مهم‌ترین مزایای مغارهای ذخیره‌سازی می‌توان به تأثیرات کمتر زیست محیطی، ایمنی حین عملیات بهره‌برداری، امنیت در مقابل حملات تروریستی، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی اشاره نمود [۸]. مغارهای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری به دو نوع با پوشش^۱ و بدون پوشش^۲ تقسیم می‌شوند. مغارهای پوشش‌دار به دلیل هزینه‌های بسیار بالا و نیاز به فناوری پیشرفته، تنها برای ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این نوع مغارها در مناطقی که به دلیل عدم وجود و یا کفایت سطح آب زیرزمینی امکان ساخت مغارهای بدون پوشش وجود ندارد، نیز استفاده می‌شود. مغارهای ذخیره‌سازی سنگی به طور معمول به صورت فضاهای بزرگ موازی یکدیگر و در یک عمق معین ساخته می‌شوند. این مغارها شبیه تونل‌هایی با مقطع بسیار بزرگ هستند. در این روش، کیفیت سنگ در تعیین هزینه ساخت مغارهای ذخیره‌سازی بیشترین اهمیت را دارد. مغار باید در عمق کافی قرارگیرد تا فشار هیدرولیکی آب در شکستگی‌های سنگ اطراف مغار همیشه بزرگتر از فشار بخار و سیال ذخیره شده در مغار باشد. یکی از پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر در طراحی مغارهای ذخیره‌سازی بدون پوشش، شرایط آب زیرزمینی منطقه می‌باشد [۹]. اصل اساسی در بکارگیری مغارهای بدون پوشش که تحت عنوان سیستم حصار هیدرولیکی تعبیر می‌شود، بر پایه اعمال فشار هیدرولیکی آب زیرزمینی در توده‌سنگ اطراف مغار استوار است [۱۰]. در این روش، با ایجاد جریان پیوسته آب زیرزمینی به سمت مغار از نفوذ و نشت هیدروکربور ذخیره شده به توده‌سنگ اطراف مغار جلوگیری می‌شود [۱۱]. برای ایجاد این حصار هیدرولیکی در اطراف مغارها، فشار واقعی آب زیرزمینی وارد بر تمامی نقاط روی محیط مغار بایستی به اندازه کافی بزرگتر از فشار هیدروکربور ذخیره شده در مغار باشد. برای ایجاد چنین فشار

^۱ Lined Rock Caverns

^۲ Unlined Rock Caverns

هیدرولیکی می‌توان مغارهای زیرزمینی را در عمق کافی زیر سطح آب زیرزمینی جانمایی نمود و یا در بیشتر موارد، به‌طور مصنوعی این فشار هیدرولیکی با استفاده از سیستم پرده آب^۱ تأمین کرد. عمده‌ی مغارهای بدون پوشش برای ذخیره‌سازی هیدروکربور در سنگ‌هایی با کیفیت خوب و یا نسبتاً خوب ساخته می‌شوند. در این روش به‌جای بکارگیری از سیستم عایق‌بندی، از جانمایی مغارها در زیر سطح آب زیرزمینی و ایجاد یک حصار هیدرولیکی در اطراف مغارها برای کنترل نشت استفاده می‌شود [۱۲]. با توجه به اینکه عملیات زیرزمینی مانند سایر فرآیندهای ساخت، باید تحت کنترل، پایش و نگهداری باشد، مغارهای سنگی بدون پوشش نیز از این قاعده مستثنی نخواهند بود [۱۳].

ضرورت به ذخیره‌سازی نفت و فرآورده‌های نفتی، در ابتدا توسط کشورهای وارده کننده محصولات هیدروکربوری مدنظر قرار گرفت. ساخت مغارهای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری برای اولین بار توسط کشورهای اسکاندیناوی انجام شد. طی چهار دهه‌ی اخیر ساخت این مغارها رشد قابل توجهی داشته است. بیش از ۲۰۰ مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در کشورهای فنلاند، نروژ و سوئد از اواسط دهه‌ی ۱۹۶۰ تا کنون به بهره‌برداری رسیده‌اند [۱۴]. در مناطقی مانند زاگرس چین خورده با توجه به شرایط زمین‌شناسی آن که منطقه‌ای پوشیده از سنگ‌های رسوبی با ویژگی‌های متفاوت می‌باشد، این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد. کمربند چین‌خورده‌ی زاگرس، به دلیل گسترش منابع مهم نفتی در آن و مجاورت با خلیج فارس که اغلب پایانه‌های صادراتی و تأسیسات نفتی در سواحل آن قرار دارند از اهمیت بسیار ویژه‌ای نسبت به سایر نقاط ایران برای احداث تأسیسات ذخیره‌سازی برخوردار است [۱۵].

۲-۲- تاریخچه‌ی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد نفتی

اجرای فضا‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد نفتی از دهه‌ی ۱۹۳۰ آغاز شده و کشورهای اسکاندیناوی پیشگام در این عرصه می‌باشند. اولین مغارهای ذخیره‌سازی مواد نفتی در زیر سطح آب زیرزمینی در

^۱ Water Curtain

کشور سوئد به اجرا در آمده است، که بدین منظور دو معدن قدیمی جهت ذخیره‌سازی نفت سنگین در سال‌های ۱۹۴۷ تا ۱۹۵۰ تغییر کاربری داده شده است. در دهه‌های ۵۰ تا ۶۰ میلادی اکثر فضاهای زیرزمینی ساخته شده در کشور سوئد جهت ذخیره‌سازی نفت خام، فرآورده‌های سبک‌تر و ال.پی.جی (گاز مایع) بوده است [۱۶]. طی دهه‌ی ۶۰ میلادی، روش ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در کشور فنلاند مورد توجه قرار گرفت. در سال ۲۰۱۲ بیش از ۵ میلیون متر مکعب نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای ساخته شده در شهر نستیز پروو^۱ فنلاند نگهداری می‌شود. ساخت مغارهای ذخیره‌سازی گاز مایع تحت فشار از اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ در کشور فرانسه آغاز گردید [۱۶]. اغلب این پروژه‌ها در سازندهای زمین‌شناسی دوره کرتاسه یا سنگ آهک و با روش‌های سنتی انجام شده است. از دهه‌ی ۷۰ به بعد، بسیاری از کشورهای اروپایی و دیگر نقاط دنیا از این روش جهت ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری استفاده کرده‌اند. بحران نفت در سال ۱۹۷۳ سبب افزایش ساخت و ساز فضاهای زیرزمینی ذخیره‌ی نفتی در بسیاری کشورها شد. پس از این بحران، ساخت مغارهای بزرگ ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی در کشور عربستان سعودی آغاز گردید که به دلیل سطح پایین آب زیرزمینی، این مغارها از نوع پوشش‌دار فولادی می‌باشند. با پیشرفت فناوری در روش‌های طراحی و اجرای مغارهای ذخیره‌سازی مواد نفتی و همچنین احساس نیاز کشورهای مختلف در حفظ موقعیت استراتژیک و سیاسی، ساخت این فضاها رفته‌رفته افزایش یافته و تا کنون در بسیاری از کشورهای دنیا، این نوع سازه‌ها با اهداف مختلف طراحی و به بهره‌برداری رسیده‌اند. جدول ۱-۲ تاریخچه‌ی ساخت فضاهای زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد نفتی در کشورهای مختلف را نشان می‌دهد [۱۷].

^۱ Neste's Porvoo

جدول ۱-۲ تاریخچه و محل ساخت فضاهاى زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد نفتی [۱۶ و ۱۷]

ردیف	سال (میلادی)	واقعۀ	کشور
۱	۱۹۳۰	ایده ذخیره‌سازی نفت خام در مخازن ایمن در برابر حملات هوایی	سوئد
۲	۱۹۳۸	ابداع فناوری ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی بدون پوشش زیر سطح آب زیرزمینی (هاگرمن)	سوئد
۳	۱۹۴۵ - ۱۹۴۰	ایجاد وقفه در ساخت مغارهای بدون پوشش با مقیاس صنعتی (جنگ جهانی دوم)	سوئد
۴	۱۹۴۰	استفاده از معدن متروکه فلدسپات جهت ذخیره‌سازی نفت خام (بدون پوشش) در جزیره آرچی پلاگو	سوئد
۵	پس از ۱۹۴۰	ساخت تعداد زیادی از مغارهای استوانه‌ای دارای پوشش توسط دو شرکت Sentab & Vagaktiebolaget	سوئد
۶	۱۹۴۰ تا ۱۹۴۵	ساخت تعداد زیادی مغار در سنگ گرانیت برای فرارگیری تانک‌های فولادی مشابه با انواع سطحی	نروژ
۷	۱۹۴۹	ساخت اولین تانک بتنی ذخیره‌سازی بنزین در مغار بدون پوشش زیر سطح آب زیرزمینی	سوئد
۸	۱۹۵۰	ذخیره‌سازی ال.پی.جی و هیدروکربورهای سبک در مغارهای نمکی	آمریکای شمالی
۹	۱۹۵۰	ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای نمکی	انگلیس
۱۰	۱۹۵۱ تا ۱۹۶۰	ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی بدون پوشش	نروژ
۱۱	۱۹۶۰	ذخیره‌سازی ال.پی.جی در مغارهای سنگی	فرانسه
۱۲	۱۹۶۰ تا ۱۹۹۵	ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی بدون پوشش	نروژ
۱۳	۱۹۸۹	ذخیره‌سازی نفت سفید و گازوئیل در مغارهای سنگی بدون پوشش	کره جنوبی
۱۴	۱۹۹۹ تا ۲۰۰۷	ذخیره‌سازی ال.پی.جی در مغارهای سنگی بدون پوشش	نروژ
۱۵	۲۰۰۴	ذخیره‌سازی ال.پی.جی در مغارهای سنگی بدون پوشش	چین

۲-۳- اهداف و ضرورت‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام [۱۷]

ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام در مغارهای سنگی بدون پوشش، مزایای متعددی داشته که در زیر به تعدادی از این موارد اشاره کرد:

- افزایش توان رقابت، قدرت مانور و حفظ استقلال سیاسی کشور

- جلب اعتماد مشتریان، زمینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بلند مدت و تثبیت جایگاه کشور در بازارهای داخلی و جهانی نفت
- کاهش مخاطرات تأمین نفت خام و فرآورده‌های نفتی به دلیل بروز موارد پیش‌بینی نشده
- تقلیل آسیب در زمان بروز حوادث طبیعی همانند زمین‌لرزه و بروز آسیب‌های عملیاتی مانند انفجار و آتش‌سوزی
- لزوم برداشت و انتقال نفت خام و سایر مواد هیدروکربوری از میادین مشترک
- استفاده از ذخایر استراتژیک کشور در زمان وقوع جنگ و خرابکاری و امکان مدیریت بهتر بحران در مواقع لزوم
- ایجاد فرصت مناسب برای بازسازی زیرساخت‌ها، پالایشگاه‌ها، خطوط انتقال موجود و ساخت تأسیسات جدید برای شبکه‌ی پخش و انتقال کشور
- امکان افزایش ظرفیت پالایشگاه‌ها و تأسیسات پتروشیمی کشور
- آزادسازی بخش زیادی از سطح اشغال شده توسط مخازن سطحی و مدفون به خصوص در مناطق شهری

۲-۴- الزامات زمین‌شناسی جهت ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای

بدون پوشش

چندین نکته اساسی به‌منظور تعیین شرایط زمین‌شناسی جهت ساخت مغارهای سنگی بدون پوشش وجود دارد که در زیر به صورت خلاصه ارائه شده است [۱۸]:

- نوع توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار نباید دارای کانی‌هایی باشد که در تماس با اکسیژن و محصول نفتی ذخیره شده سبب تشکیل مواد شیمیایی جدید شده و باعث ناپایداری دیواره‌ی مغار و رسوب شوند.
- وجود سفره‌ی آب زیرزمینی مناسب

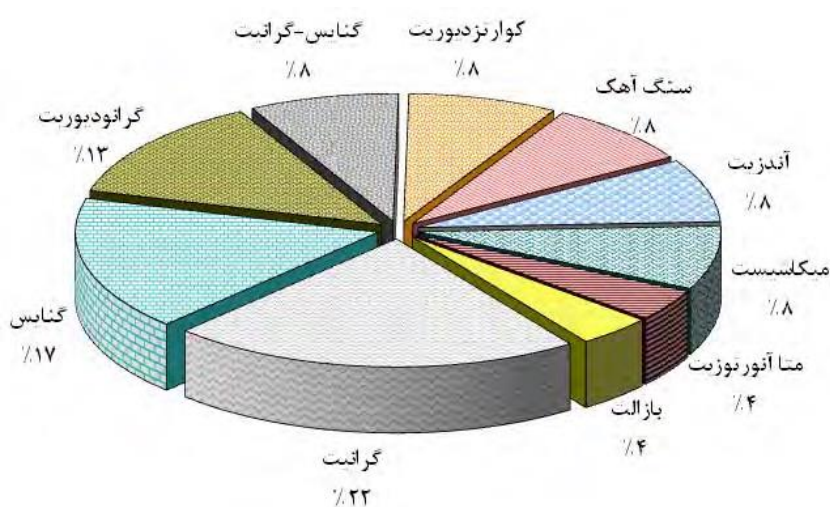
- کیفیت توده سنگ می‌بایست تا حدی خوب باشد که امکان حفاری مغار به روش سنتی فراهم

بوده و همچنین موارد زیر امکان‌پذیر باشد:

❖ پایداری طولانی مدت مغار

❖ امکان کنترل آب زیرزمینی با پیش تزریقی در توده سنگ با نفوذپذیری کم

اگرچه توده سنگ دربرگیرنده‌ی مغارهای سنگی از تنوع زیادی برخوردار است اما آمار حاکی از آن است که ساخت این فضاها اغلب در محیط‌های سنگی از جنس گرانیت و گنایس بیشتر از سایر موارد بوده است [۱۹] (شکل ۱-۲). موارد ذکر شده جهت ذخیره‌سازی مواد نفتی در مغارهای سنگی بدون پوشش که در آن‌ها از هیچ‌گونه لاینینگ فولادی، بتنی و پی‌وی‌سی استفاده نشده (حتی جهت مقاوم‌سازی و پایداری مغار) و توده سنگ وظیفه‌ی نگهداری ماده هیدروکربوری و همچنین جلوگیری از نشت آن‌را بر عهده دارد.



شکل ۱-۲ توزیع مغارهای سنگی ذخیره‌کننده‌ی نفت خام در جهان با توجه به نوع سنگ [۱۹]

۲-۵- شرایط ایده‌آل توده سنگ برای ذخیره‌سازی نفت در مغارهای سنگی

بدون پوشش

شرایط ایده‌آل مقاومتی و نفوذپذیری توده سنگ در برگیرنده‌ی مغار به شرح زیر می‌باشد [۲۰]:

- وجود سنگ بکر با مقاومت بالا (مدول تغییر شکل پذیری بیشتر از ۵۰۰۰ مگاپاسکال، مقاومت برشی بیشتر از ۰/۱ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۱۳۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال).
- وجود توده سنگ با نفوذپذیری کم (دارای هدایت هیدرولیکی کمتر از 10^{-5} متر بر ثانیه) در شرایط متوسط این مقدار در حدود 10^{-8} متر بر ثانیه می باشد.

۲-۶- الزامات کلی در طراحی مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام

وجود سطح آب زیرزمینی ثابت و یا پرده ای آب مصنوعی در بالای تاج مغار جهت ساخت مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام، امری الزامی می باشد. فشار آب در مقطع بالایی مغار نباید کمتر از مجموع فشار بخار تولید شده توسط محصول ذخیره شده به علاوه ی ۲۰ متر ستون آب اضافی به منظور حاشیه اطمینان در عدم نشت باشد. همچنین شفت سرویس دهی باید در مقابل نشت گاز عایق بندی گردد. مقطع بالایی مغار که در آن لوله های ورود و خروج محصول، لوله های پمپ آب، تراز سنج، تجهیزات نمونه گیری، ابزارهای پایش و تجهیزات تصفیه قرار می گیرند را به عنوان ناحیه ی "EX" نام گذاری می نمایند [۲۱]. آب های خروجی باید قبل از پمپاژ مجدد به داخل مغار، تصفیه شوند. مقطع بیرونی در بالای مغار باید فضای کافی برای تعمیر و نصب پمپ در شرایط ضروری را داشته باشد. همچنین وجود فضای کافی جهت پاکسازی برف در فصل زمستان نیز باید مد نظر قرار گیرد. لوله های ورودی و خروجی محصول ذخیره شده باید به گونه طراحی و نصب شوند تا ترکیبی بهینه از میزان آب و نفت پمپاژ شود. همچنین بر اساس نوع محصول ذخیره شده، پاکسازی لجن^۱ هر از گاهی مورد نیاز می باشد [۲۱]. جهت خروج نفت از مغار، افزایش حرارت نفت الزامی می باشد. مقطع بالای مغار همیشه بخار نفت (ترکیبات فرار نفتی^۲) وجود دارد [۲۱]. اغلب مغارهای ذخیره سازی نفت خام دارای عرض ۱۵ تا ۲۵ متر، ۳۰ تا ۳۵ متر ارتفاع و تا ۱ کیلومتر طول می باشند [۲۲]. محدوده ی

^۱ Wax

^۲ VOC (Vol.atile oil components)

تقریبی برای احداث تأسیسات ذخیره‌سازی ۱۰۰ تا ۱۲۰ هزار متر مربع (۳۰۰ * ۴۰۰ متر) می‌باشد. عمق مغارهای سنگی در دنیا بین ۵۰ تا ۲۰۰ متر متغیر می‌باشد [۲۱].

۲-۷- تعیین پارامترهای طراحی

موقعیت مغارهای سنگی معمولاً در مرحله‌ی طراحی و بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده طی فاز برداشت و مطالعات صورت گرفته، تعیین می‌شود. اگرچه بعضی مواقع طی ساخت تونل و برخورد با شرایط واقعی توده‌سنگ، تغییر مکان ساخت مغارها نیز ممکن است رخ دهد. به منظور انتخاب مناسب محل قرارگیری مغار، توجه به موارد زیر الزامی می‌باشد: الف) نوع سنگ و خصوصیات مکانیک سنگی ب) ویژگی ناپیوستگی‌ها از قبیل فراوانی، فاصله‌داری و بازشدگی ج) تنش‌های برجا د) شرایط آب زیرزمینی [۲۱]. روش طراحی کلی سازه‌های زیرزمینی در نروژ بر اساس اظهارات سلمر-اولسون و بروچ (۱۹۸۲)^۱، که جهت طراحی مغارهای ذخیره‌سازی به‌کار می‌رود، در زیر خلاصه شده است [۱۴]:

۱. انتخاب محل ساخت مغار: مهم‌ترین و اولین گام در طراحی بوده و همه‌ی تلاش‌ها باید در

راستای انتخاب صحیح محل قرارگیری مغار انجام شوند.

۲. جهت قرارگیری محور طولی مغار: این کار به منظور کمینه کردن مشکلات پایداری مغار و

جلوگیری از گسیختگی ساختاری صورت می‌گیرد.

۳. شکل مغار: شکل مناسب مغار سبب توزیع یکنواخت و مناسب تنش‌ها در اطراف سازه

خواهد شد.

۴. ابعاد مغار: تعیین ابعاد مغار عموماً تجربی بوده و بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی ناحیه

موردنظر، نوع سنگ، کاربرد و حجم مورد نیاز جهت ذخیره‌سازی و همچنین ملاحظات

اقتصادی و عملیاتی صورت می‌گیرد.

^۱ Selmer-Olson & Broch

۲-۸- موارد ایمنی در ذخیره‌سازی

ذخیره‌سازی مواد نفتی در مغارهای زیرزمینی با اهداف مختلفی انجام می‌شود. مواد نفتی سنگین از قبیل نفت خام دیگر سوخت‌ها، با افزایش حرارت از طریق لوله‌های تعبیه شده به درون مغار منتقل و ذخیره می‌شوند. امروزه تقریباً انواع فرآورده‌های نفتی درون مغارهای نزدیک به هم ذخیره شده تا از خروج گاز (بخار نفت) به سطح زمین جلوگیری گردد. برای مواد نفتی دارای $1/5$ بار^۱ فشار (۱۵ متر ستون آب) و یا کمتر، عمق قرارگیری مغار باید حدود (۱۵ + ۲۰ متر) زیر سطح آب زیرزمینی باشد. مواد نفتی قابل اشتعال به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۱]:

- کلاس A: سیال با نقطه‌ی اشتعال کمتر از ۲۳ درجه سانتی‌گراد (بنزین و نفت خام)
- کلاس B: سیال با نقطه‌ی اشتعال بین ۲۳ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد (سوخت موتور جت)
- کلاس C: سیال با نقطه‌ی اشتعال بیشتر از ۵۵ درجه سانتی‌گراد (نفت سیاه)

۲-۹- شرایط مرزی و اصول ذخیره‌سازی مواد نفتی در مغارهای سنگی بدون

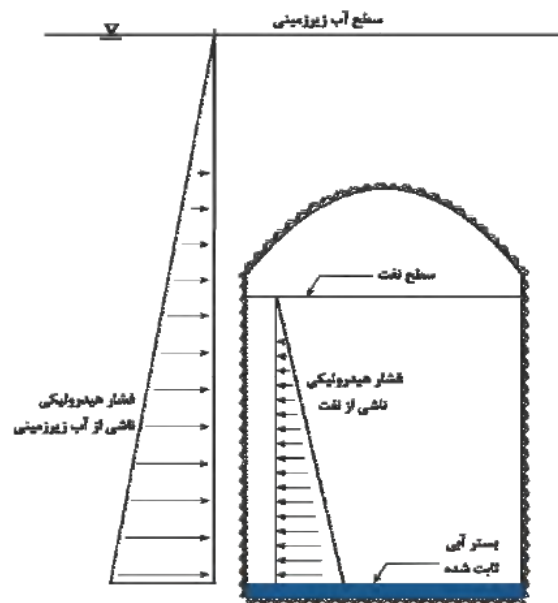
پوشش

موارد زیر از جمله الزامات شرایط ذخیره‌سازی مواد نفتی در مغارهای سنگی بدون پوشش می‌باشد [۲۱]:

- محصول ذخیره شده باید نسبت به آب سبک‌تر باشد (دارای وزن مخصوص کمتر از ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب)
- محصول ذخیره شده در آب نامحلول باشد
- سطح آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد نظر، ثابت باشد
- کیفیت و تراوایی توده‌سنگ برای ساخت مغار با ابعاد مورد نظر مناسب باشد

^۱ Bar

در شکل ۲-۲، طرحی شماتیک از فشار اطراف مغار ذخیره‌سازی از طرف محصول و فشار ناشی از آب زیرزمینی نشان داده شده است.

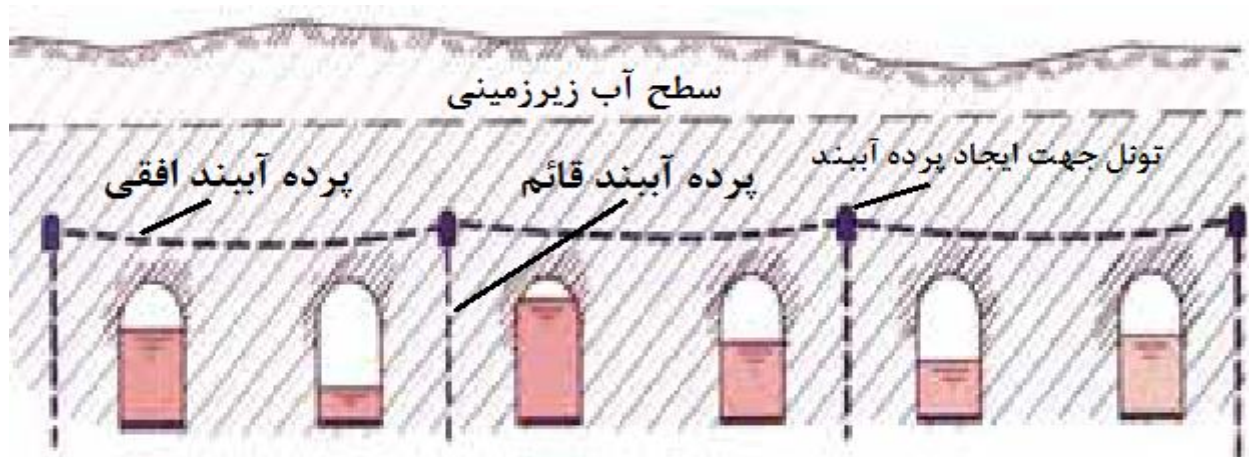


شکل ۲-۲- فشار آب زیرزمینی باید بیشتر از فشار وارده از طرف محصول باشد [۲۱]

۲-۱۰- سیستم پرده‌ی آب^۱

در صورتی که مغار در عمق چندین متری زیر سطح آب زیرزمینی قرار گیرد و فشار درون مغار نزدیک به فشار اتمسفر باشد، معمولاً آب زیرزمینی به درون مغار نفوذ خواهد کرد. از آنجا که مغارها تحت فشار نگهداری می‌شوند، لذا وجود آب زیرزمینی در سطحی بالاتر از تاج مغار جهت جلوگیری از نشت گاز الزامی می‌باشد [۲۵].

^۱ Water Curtain System



شکل ۲-۳- ایجاد پرده‌ی آب با حفاری از طریق تونل‌های کوچک بالای مغارها [۲۵]

بدین منظور پرده‌های آب افقی (سقفی)^۱ و یا مایل^۲ از درون تونل در بالای سطح مغار به صورت گمانه‌های موازی حفاری شده و طول این گمانه‌ها برای تزریق آب معمولاً ۳۰ تا ۱۰۰ متر می‌باشد (شکل ۲-۳). فشار وارده از طریق این پرده‌ها مقداری (حدود چندین متر) از فشار سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده و ثابت نگه‌داشته می‌شود [۲۵]. همچنین ایجاد پرده‌های آب قائم بین مغارهای مجاور به منظور جلوگیری از نشت محصول به دیگر مغارها الزامی می‌باشد (شکل ۲-۴). در صورتی که در هریک از مغارها نوع محصول ذخیره شده متفاوت باشد، می‌بایست از نشت این محصول‌ها به مغارهای مجاور جلوگیری شود اما اگر همه‌ی مغارها دارای یک نوع محصول واحد باشند، نشت بین مغارهای مجاور مانعی نخواهد داشت. همان‌طور که از شکل ۲-۳ پیداست، در هر جفت از این مغارها محصولی متفاوت با دیگر مغارها ذخیره‌سازی شده است و به منظور جلوگیری از نشت این محصول‌ها به مغارهای مجاور، پرده‌های آب قائم (دیواری)^۳ از درون تونل‌های کوچک بالای مغارها و از سطح زمین ایجاد شده است [۲۵]. فاصله‌ی گمانه‌های حفر شده از یکدیگر، به نفوذپذیری توده‌سنگ و همچنین تجربه‌ی طراح وابسته است. گمانه‌های پرده‌ی آب باید حدود ۲۰ متر بالاتر از تاج مغار حفاری شوند.

^۱ Roof Water Curtain

^۲ Tilting

^۳ Wall Water Curtain

یکی از روش‌های ساده به منظور بررسی تراز آب زیرزمینی، حفاری تعدادی گمانه در بالای مغار و محاسبه‌ی دستی سطح تراز آب در هریک از این گمانه‌ها می‌باشد. با بررسی‌های منظم می‌توان روند تغییرات سطح آب زیرزمینی را به صورت سالیانه و دراز مدت محاسبه نمود. در صورتی که سطح آب زیرزمینی بیش از حد افت کند، احتمال نشت نفت و گاز ذخیره شده در مغار به بیرون وجود داشته و تعمیر سیستم پرده آب بسیار مشکل خواهد بود [۲۶]. نکات کلیدی جهت طراحی سیستم پرده‌ی آب برای مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت در جدول ۲-۲ آورده شده است. به عنوان مثال، در یکی از پروژه‌های ذخیره‌سازی نفت خام در کشور چین، حجم ذخیره‌سازی $10^6 \times 3$ مترمکعب بوده که شامل ۴ دسته مغار دوتایی (۸ مغار) که هریک از این مغارها دارای ۲۴ متر ارتفاع، ۱۹ متر عرض می‌باشد. تعداد ۵ تونل پرده‌ی آب در ارتفاع ۲۵ متری بالای تاج مغارها حفاری شده است که مساحت سطح مقطع هریک از این تونل‌ها $6 \times 6/5$ متر می‌باشد. گمانه‌های آب حفر شده از درون این تونل‌ها دارای طول ۶۰ متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند [۲۶].

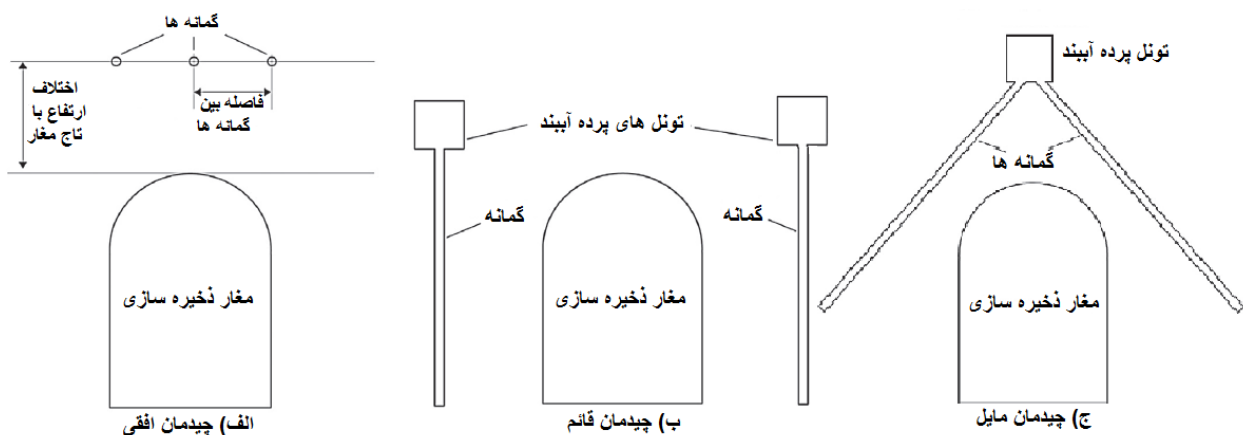
جدول ۲-۲ پارامترهای اساسی پرده‌ی آب در پروژه‌های مغارهای ذخیره‌سازی^۱

نام پروژه	محصول ذخیره‌سازی	حجم 10^6 $\times m^3$	نوع سنگ	پارامترهای گمانه‌های پرده‌ی آب		
				جهت یابی گمانه‌ها	ارتفاع گمانه‌ها نسبت به تاج مغار (متر)	طول (متر)
k-1، کره	بنزین	۰/۲۳۱	گرانیت	افقی	۱۵	۱۰۰ تا ۱۲۰
U-2، کره	نفت خام	۴/۲۹۳	دیوریت	افقی	۲۰	۱۱۰
شانتو، چین	ال.پی.جی	۰/۲۰۶	گرانیت	افقی	۲۰	۱۰۰
ژوهای، چین	ال.پی.جی	۰/۴	گرانیت	افقی	۳۱/۲	۳۲ تا ۷۹
جورونگ، سنگاپور	نفت خام	۱/۴۷	سنگ رسوبی	افقی و قائم	۱۵ متر از سقف و ۳۰ متر از دیواره‌ها	۵۰

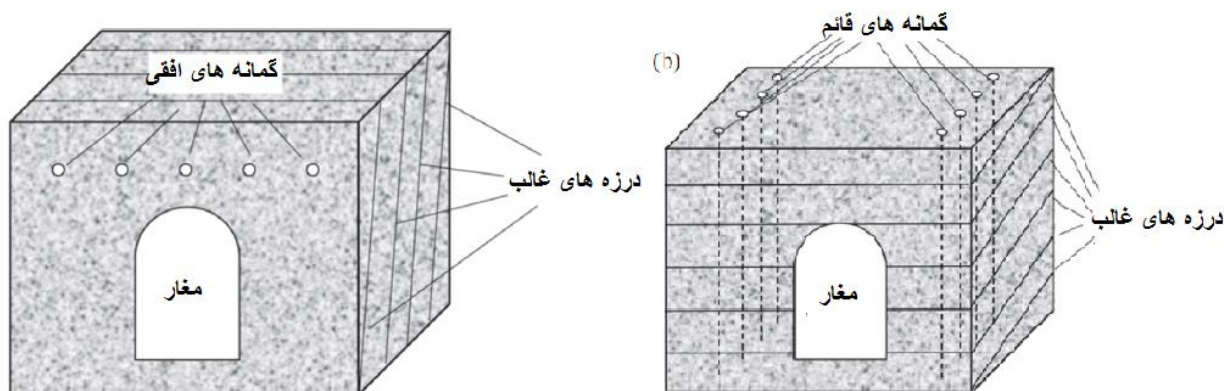
فاصله‌ی بین گمانه‌های افقی (سقفی) ۱۰ متر و فاصله‌ی بین گمانه‌های قائم (دیواری) ۲۰ متر می‌باشد. در جدول ۲-۲ پارامترهای اساسی جهت تعیین مشخصات سیستم پرده‌های آب در چندین پروژه‌ی کشورهای مختلف نشان داده شده است [۲۶]. همان‌طور که از جدول ۲-۲ پیداست، فاصله‌ی بین گمانه‌های آب بین ۷ تا ۲۰ متر و اختلاف ارتفاع آن‌ها نسبت به تاج مغار بین ۱۲ تا ۳۰ متر می‌باشد. در حالت تئوریک، قرارگیری گمانه‌های آب عمود بر درزه‌های غالب توده‌سنگ بهترین حالت ممکن خواهد بود. اما در عمل، چندین روش ساده برای جهت‌یابی و حالت قرارگیری گمانه‌ها وجود دارد که ممکن است از این تئوری پیروی نکنند (شکل ۲-۴) [۲۷]. در این شکل ۳ نوع چیدمان

^۱ Hong, Li & Lu

مختلف گمانه‌ها در سیستم پرده‌ی آب نشان داده شده است: افقی (سقفی)، قائم (دیواری) و مایل. در بعضی پروژه‌ها ۲ نوع از این روش‌ها به منظور بازدهی بهتر به‌طور همزمان بکار برده می‌شوند [۲۷]. توده‌سنگ‌هایی که شیب ناپیوستگی‌های غالب در آن زیاد باشد (بیشتر از ۶۰ درجه)، استفاده از چیدمان افقی گمانه‌ها سبب افزایش اتصالات هیدرولیکی در راستای محور گمانه‌ها شده و شرایط مطلوبی را فراهم می‌آورد (شکل ۲-۵، الف). بالعکس در توده‌سنگ‌هایی که شیب ناپیوستگی‌های غالب آن کم باشد (کمتر از ۳۰ درجه) استفاده از چیدمان قائم گمانه‌ها سبب افزایش اتصالات هیدرولیکی در راستای محور گمانه‌ها شده و حالت بهینه می‌باشد (شکل ۲-۵، ب). در توده‌سنگ‌هایی که شیب ناپیوستگی‌های غالب در آن مابین ۳۰ و ۶۰ درجه است، از چیدمان مایل و یا ترکیبی از آن‌ها برای بدست آوردن هدایت هیدرولیکی بهینه و جلوگیری از نشت استفاده می‌شود [۲۷].



شکل ۲-۴ چیدمان‌های مرسوم گمانه‌ها در سیستم پرده‌ی آب [۲۷]



الف) شیب زیاد ناپیوستگی ها و چیدمان افقی گمانه ها

ب) شیب کم ناپیوستگی ها و چیدمان قائم گمانه ها

شکل ۲-۵ چیدمان گمانه های آب در توده سنگ با توجه به شیب ناپیوستگی ها [۲۷]

۲-۱۱- بستر آب متغیر

همان طور که ذکر شد، اولین مغارهای ذخیره سازی مربوط به مواد نفتی کلاس C بوده اند. لذا گاز تولید شده توسط این مواد دارای نقطه ای اشتعال بیش از ۵۵ درجه بوده و در نتیجه جزء محصولات غیر قابل اشتعال تلقی می گردند. زمانی که مغارهای ذخیره سازی مواد کلاس A ساخته شدند، به منظور جلوگیری از انفجار و آتش سوزی می بایست از ورود هوا به درون مغار هنگام خروج محصول به سطح زمین جلوگیری شود. بدین منظور روش "بستر آب متغیر" ابداع گردید. در این روش سطح محصول ذخیره شده در بالای مغار ثابت نگه داشته شده و سپس همزمان با خروج محصول، آب با نرخی یکسان با نرخ خروج محصول به درون مغار پمپ می شود. مزایا و معایب روش بستر آب متغیر در جدول ۲-۳ آورده شده است. معایب این روش نسبت به روش بستر آب ثابت بیشتر بوده و لذا از این روش در ذخیره سازی استفاده نمی گردد [۲۱].

جدول ۳-۲ مزایا و معایب ذخیره‌سازی با روش بستر آب متغیر [۲۱]

مزایا	معایب
هیچگونه گازی از مغار خارج نشده و هوا نیز به داخل مغار وارد نمی‌شود	صرف انرژی زیاد جهت پمپ آب به داخل و بیرون
انجام عملیات در فشار معادل اتمسفر، الزامی به قرارگیری مغار در عمق زیاد نسبت به آب زیرزمینی نیست	مدیریت و نگهداری مغارهایی با حجم محصول بالا نیاز به آب زیادی داشته و پر هزینه است
	سطح زیاد تماس بین آب و محصول

۲-۱۲- جمع‌بندی

در این فصل فناوری مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام من جمله تاریخچه، اهداف و ضرورت‌ها، مزایا و معایب استفاده و ساخت این مغارها بررسی شد. همچنین الزامات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی جهت ساخت مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام مورد بررسی قرار گرفت. الزامات کلی در طراحی این مغارها و همچنین به‌طور مختصر به تعیین پارامترهای طراحی نظیر محل، شکل و ابعاد مغار مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به بررسی شرایط مرزی و اصول ذخیره‌سازی مواد نفتی در مغارهای بدون پوشش پرداخته شد. در فصل بعد به ارزیابی رفتار اندرکنش هیدرومکانیکی در توده‌سنگ درزه‌دار پرداخته خواهد شد و همچنین در فصل پنجم ساخت هندسه و ابعاد مغار و شرایط سفره آب زیرزمینی در مدل‌سازی عددی بر اساس پیشنهادات و استانداردهای جهانی اشاره شده در فصل دوم بنا شده است.

فصل سوم

تراوایی و اندرکنش توانان هیدرومکانیک در توده سنگ درزه دار

۳-۱ مقدمه

اندرکنش توأمان در توده‌سنگ درزه‌دار از مباحث مهم در سنگ و هیدروژئولوژی می‌باشد. توده‌سنگ درزه‌دار شامل سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها می‌باشد که مجرای اصلی عبور سیال را ناپیوستگی‌ها تشکیل می‌دهند. مقدار بازشدگی درزه‌ها وابسته به تنش بوده و تغییر در تنش نرمال سبب افزایش و یا کاهش بازشدگی شده و تغییر در تنش برشی، اتساع را در پی خواهد داشت. لذا تراوایی توده‌سنگ درزه‌دار وابسته به تنش می‌باشد [۷]. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در مهندسی معدن، نفت و ژئوتکنیک در زمینه‌ی کاربرد اندرکنش هیدرومکانیک در تحلیل جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار صورت گرفته است. رشد تحقیقات در این راستا به دلیل افزایش آگاهی و ظرفیت‌های مدل‌سازی پدیده اندرکنش توأمان می‌باشد [۲۸]. از اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ مطالعات اولیه روی حرکت جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار آغاز گردید که تا به امروز با عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌هایی روبرو بوده است. مطالعات انجام شده روی اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و آزمایش‌های صورت گرفته توسط نرتنیکس^۱ ۱۹۸۵، بورک و همکاران ۱۹۸۵، نولته و همکاران^۲ ۱۹۸۹، میچی و همکاران^۳ ۱۹۹۶، بارتن و همکاران^۴ ۱۹۸۵، جونز و همکاران^۵ ۱۹۹۹ نشان داد [۶] که از تمامی درزه‌های موجود در توده‌سنگ تعداد کمی از آن‌ها در انتقال سیال نقش اصلی را ایفا می‌نمایند که به آن‌ها مسیر اصلی جریان سیال گفته می‌شود. از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به آزمایش‌های اساکي و همکاران^۶ در سال ۱۹۹۹، اولسون و بارتن در سال ۲۰۰۱، جینگ^۷ و بارتن در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد [۷]. عوامل مؤثر در بحث حرکت سیال در توده‌سنگ شامل خواص درزه‌های سنگی و مشخصات مکانیک سنگی پروژه می‌باشد. وجود درزه و شکاف در محیط و تأثیر آن بر تراوایی و تغییر شکل یکی از عوامل کلیدی در طراحی‌های مهندسی می‌باشد.

1- Nertenics

2- Nolt et al

3- Mitchi et al

4- Barton et al

5- Jones et al

6- Esaki et al

7- Jing

جدول ۳-۱- تاریخچه تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ (ژنگ و راتکوئیست، ۲۰۰۳) [۶ و ۷]

سال	محققان	موضوع مطالعه
۱۹۶۸	اسنو ^۱	مطالعات اولیه بر تانسور نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار
۱۹۸۵	اودا ^۲	برآورد تانسور نفوذپذیری توده‌سنگ
۱۹۹۱	دارلوفسکی ^۳	برآورد تانسور نفوذپذیری توده‌سنگ توسط معادلات لاپلاس
۱۹۹۳	پریست، هربرت و درشوئتز ^۴	استفاده از توابع توزیع چگالی احتمال در شبیه‌سازی عددی توده‌سنگ و برآورد تانسور نفوذپذیری
۱۹۹۳	داگان و گلهار ^۵	برآورد تانسور نفوذپذیری معادل در فضای سه‌بعدی
۱۹۹۹	ژاو و همکاران ^۶	شبیه‌سازی مخازن نفتی
۲۰۰۰	ناکاشیما و همکاران ^۷	برآورد تانسور نفوذپذیری با استفاده از روش المان مرزی
۲۰۰۱	ماکورات، اولسون و بارتن ^۸	اثر تغییر شکل نرمال و برشی بر روند جریان سیال از درزه و تانسور نفوذپذیری
۲۰۰۱	هادسون و همکاران ^۹	دفن زباله‌های اتمی
۲۰۰۱	لی و همکاران ^{۱۰}	تولید شبکه شکستگی ناپیوسته با رویکرد ریاضی و برآورد تانسور نفوذپذیری
۲۰۰۲	پارک ^{۱۱}	برآورد تانسور نفوذپذیری در فضای سه‌بعدی

1- Snow

2- Oda

3- Darlofsky

4- Priest, Herbert & Dershoitz

5- Dagan & Gelhar

6- Zhao and et al

7 -Nakashima et al

8 -Makurat, Olsson and Barton

9 -Hudson et al

10 -Lee et al

11 -Park

جدول ۳-۲- تاریخچه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ (رَمندی و همکاران ۲۰۱۶)

۲۰۰۴	کی بوک مین ^۱	مطالعه‌ی آب‌گذری توده‌سنگ محل دفن زباله‌های اتمی
۲۰۰۷	پویا و فوچه ^۲	برآورد تانسور نفوذپذیری و تعیین بیضوی‌های نفوذپذیری
۲۰۰۸	باغبانان	بررسی رفتار نفوذپذیری وابسته به تنش در توده‌سنگ خرد شده
۲۰۰۸	شریف‌زاده و همکاران	برآورد تانسور نفوذپذیری در پی سد رودبار لرستان
۲۰۱۴	زیمِرن و همکاران ^۳	برآورد تانسور نفوذپذیری توده‌سنگ خرد شده در فضای سه‌بعدی
۲۰۱۵	فیگوئردو و همکاران ^۴	تغییر در نفوذپذیری توده‌سنگ بر اثر کوپل هیدرومکانیک
۲۰۱۵	گووی‌ما و همکاران ^۵	ارزیابی آنیزوتروپیک نفوذپذیری توده‌سنگ در فضای دوبعدی
۲۰۱۶	تانگ و مک‌دونوف ^۶	ارتباط بین تخلخل و نفوذپذیری توسط روابط تئوری
۲۰۱۶	چن و همکاران ^۷	نفوذپذیری در توده‌سنگ‌های تغییر شکل‌پذیر با توجه به اندرکنش توأمان بین اصطکاک و صدمات ناشی از آن
۲۰۱۶	رَمندی و همکاران ^۸	آنالیز دیجیتالی سنگ جهت برآورد دقیق نفوذپذیری

مثالی از این ناپایداری‌ها حین حفاری در ساختگاه سد تری گورجز^۹ در چین می‌باشد (ژنگ و همکاران ۱۹۹۹). در جداول ۳-۱ و ۳-۲ تاریخچه‌ی مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی نفوذپذیری توده‌سنگ نشان داده شده است.

۳-۲- جریان سیال در محیط متخلخل

در محیط متخلخل همانند خاک، منافذ به‌صورت یکنواخت توزیع شده و خصوصیات آن وابسته به پارامترهای سیال، قطر، دانه‌ها و تخلخل محیط می‌باشد. روابط حاکم بر جریان سیال در یک محیط متخلخل پیوسته بر پایه قوانین بقاء جرم و بقاء حرکت می‌باشد [۲۹].

1 -Ki-Bok Min

2 -Pouya & Fouché

3 -Zimmerman

4 -Figueiredo et al

5 -Guowei Ma et al

6 -Tang & McDonough

7 -Chen et al

8 -Ramandi et al

9- Three Gorges Dam

۳-۲-۱- روابط حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل

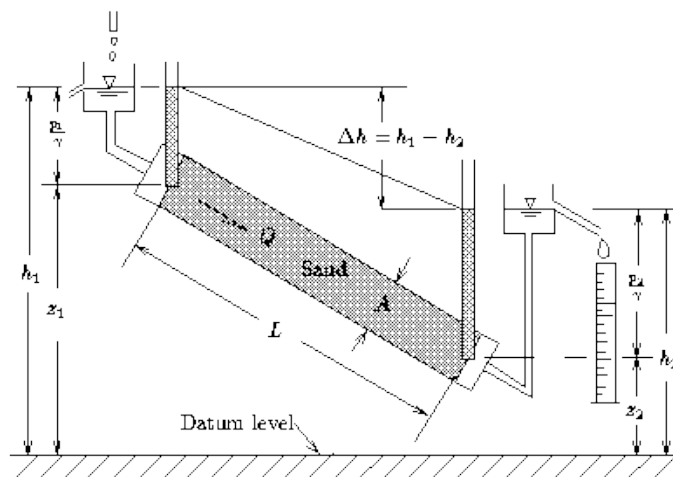
قانون حرکت سیالات لزج در محیط متخلخل، قانون دارسی نام دارد و به صورت زیر نوشته می شود [۲۹]:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}, v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (۱-۳)$$

که در رابطه‌ی (۱-۳)، v_i و k_i ($i = x, y, z$) به ترتیب مولفه‌های سرعت جریان و نفوذپذیری محیط متخلخل در جهت i می‌باشند.

$$h = Z + \frac{p}{g \rho_f} \quad (۲-۳)$$

در رابطه‌ی (۲-۳)، h نشان دهنده‌ی هد هیدرولیکی، ρ_f چگالی سیال و Z ارتفاع سیال از یک سطح مبنای دلخواه است [۲۹]. در شکل ۱-۳ نحوه‌ی انجام آزمایش دارسی که با عبور جریان از یک ستون شیب‌دار دارای مواد متخلخل و همگن نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- طرح شماتیکی از آزمایش دارسی [۳۰]

معادله‌ی دارسی برای محیط‌های ناهمسان‌گرد به شکل زیر می‌باشد:

$$v = - \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{Bmatrix} \quad (3-3)$$

شکل برداری معادله به صورت زیر است:

$$v = -k \cdot \text{Grad}(h) \quad (4-3)$$

در رابطه‌ی (۴-۳)، k تانسور نفوذپذیری می‌باشد [۲۹]

۳-۳- جریان سیال در محیط درزه‌دار

به منظور بررسی جریان سیال در محیط درزه‌دار می‌بایست ابتدا جریان سیال در تک درزه به عنوان بخشی از یک شبکه ناپیوستگی در توده‌سنگ درزه‌دار بررسی گردد. اکثر مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در تحلیل هیدرومکانیکی جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از نمونه‌های دارای یک تک درزه بوده است. پام‌روی و رابینسون^۱ در سال ۱۹۶۷ برای اولین بار آزمایش‌های خود را روی نمونه‌های مصنوعی با سه دسته درزه متقاطع انجام دادند. جریان سیال در یک مسیر برای اولین بار به عنوان نمونه در یک لوله یا کانال توسط لومیز^۲ در سال ۱۹۵۱ صورت گرفت. در این مطالعات تغییر شکل‌پذیری ناشی از تنش در نظر گرفته نشده بود، در حالی که تغییرات ناشی از تنش اعمالی بر روی مسیر هدایت جریان می‌تواند نرخ جریان را تا حد زیادی دست‌خوش تغییر قرار دهد [۳۱].

1 -Pomeroy & Robinson

2 -Lomize

مطالعات آزمایشگاهی دیگری بر روی خواص سیال در یک شکستگی منفرد توسط لومیز در سال ۱۹۵۱ و لوئیز^۱ در سال ۱۹۶۸ انجام گرفت. نوزیل و تریسی^۲ در سال ۱۹۸۱ و تسانگ و براون^۳ در سالهای ۱۹۸۴ و ۱۹۸۷ دریافتند که جریان سیال در یک تک درزه تابع عوامل متعددی می‌باشد [۳۱].

۳-۳-۱- جریان سیال در یک تک درزه با فرض صفحات صاف و موازی

جریان سیال از داخل درزه منفرد با فرض صفحات صاف و موازی مرسوم‌ترین مدل بکار رفته برای شبیه‌سازی می‌باشد. یک تک درزه سنگی با فرض دو سطح صاف و بازشدگی e ، از معادله‌ی ناویر-استوکس بدست می‌آید که به مدل صفحات موازی^۴ یا قانون دارسی در مکانیک سیالات معروف است [۲۹].

$$\begin{cases} v_x = \frac{g}{2\theta} \frac{\partial h}{\partial x} \left[z^2 - \left(\frac{e}{z} \right)^2 \right] \\ v_y = \frac{g}{2\theta} \frac{\partial h}{\partial y} \left[z^2 - \left(\frac{e}{z} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (5-3)$$

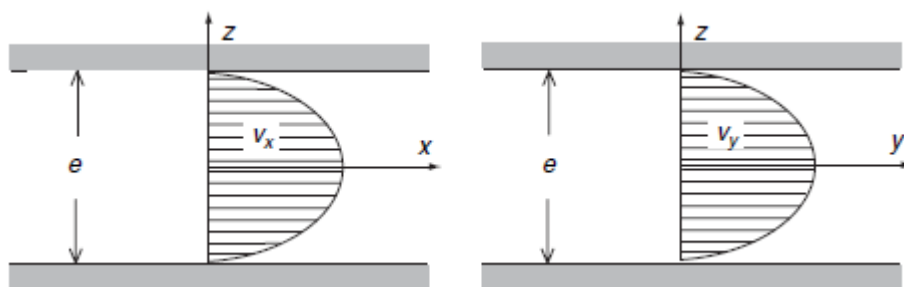
روابط (۵-۳) به معادلات استوکس معروف می‌باشند. با این فرض که سیال از داخل دو صفحه‌ی موازی و صاف به صورت آرام، پایدار و خطی جریان دارد (شکل ۳-۲)، از معادلات خطی استوکس بدست می‌آیند

1 -Louis

2 -Neuzil & Tracy

3 -Tsang & Brown

4 -parallel phase model



شکل ۳-۲- توزیع سهمی‌وار جریان بین دو صفحه صاف و موازی [۲۹]

در این معادله، فاصله بین دو صفحه موازی به بازشدگی درزه معروف است که آن را با e نشان می‌دهند. نرخ جریان سیال عبوری از یک درزه از رابطه‌ی ۳-۶ که به قانون مکعب معروف است، بدست می‌آید [۲۹].

$$Q = \frac{a^3 l}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_0} \quad (۳-۶)$$

در رابطه‌ی (۳-۶)، Q نرخ جریان (مترمکعب بر ثانیه)، a بازشدگی درزه (متر)، l طول خط اثر درزه (متر)، μ لزجت دینامیکی سیال و ΔP افت فشار در راستای جهت جریان است. در نتیجه قابلیت هدایت هیدرولیکی درزه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$K = k \frac{\gamma}{a} \quad (۳-۷)$$

در اکثر مسائل مهندسی می‌توان با تقریب از قانون مکعب استفاده نمود، زیرا جریان به دلیل سرعت پایین در محیط‌های سنگی در محدوده‌ی لایه‌ای رفتار کرده و لذا می‌توان از این قانون بهره جست. با این وجود به منظور آگاهی از امکان و یا عدم امکان استفاده از قانون مکعب، باید به این موضوع توجه داشت که عدد رینولدز در چه بازه‌ای قرار دارد. برای دانستن این مطلب عدد رینولدز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید: [۲۹]

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (۳-۸)$$

در این رابطه ρ چگالی سیال، V سرعت جریان در شکستگی، D طول شکستگی و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال می‌باشد.

۳-۳-۲- عوامل مؤثر در حرکت سیال درون تک درزه منفرد

در محیط درزه‌دار، شکستگی‌ها بهترین مسیر جریان برای عبور سیال از درون توده‌سنگ به‌شمار می‌آیند. در بررسی جریان سیال درون توده‌سنگ عوامل بسیاری تأثیر گذارند. بازشدگی درزه، زبری سطح دیواره‌های درزه، سطح تماس دیواره‌های درزه، ناهمواری و پیچ و خم سطح درزه، قابلیت گذردهی سیال، سختی دیواره‌های درزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۳) [۳۲].



شکل ۳-۳- عوامل مؤثر بر جریان سیال در تک درزه منفرد [۳۲]

۳-۳-۳- رفتار اتساعی درزه^۱ و تأثیر آن بر آب‌گذری

رفتار اتساعی درزه عبارت است از روراندگی سطح درزه به‌واسطه‌ی زبری سطح درزه تحت تنش نرمال کم و به‌واسطه‌ی اعمال تنش برشی که عموماً باعث افزایش بازشدگی درزه می‌شود. مقدار اتساع درزه بر میزان نفوذپذیری معادل توده‌سنگ مؤثر است. چنانچه مکانیسم اتساعی درزه در تحلیل

1 -Dilation

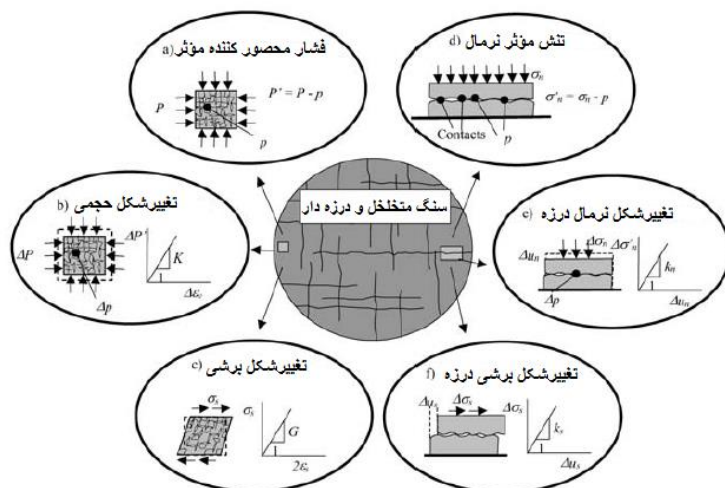
هیدرومکانیکی در نظر گرفته شود، مشخص می‌گردد که در اثر اتساع درزه مقدار بیشتری جریان سیال از درزه عبور می‌کند زیرا اتساع سبب افزایش بازشدگی مؤثر درزه شده است [۳۳].

۳-۴- رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ درزه دار

در مباحث مهندسی سنگ اصطلاح توأمان هیدرومکانیک که با علامت اختصاری $H-M^1$ نشان داده می‌شود، به اندرکنش‌های فیزیکی بین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی در توده سنگ اطلاق می‌شود. طرح شماتیکی از این فرآیندها در شکل ۳-۴ به تصویر کشیده شده است [۷]. اعمال نیرو یا تنش به یک محیط اشباع از آب موجب فشرده شدن ذرات تشکیل دهنده‌ی محیط و در نتیجه کاهش حجم خواهد شد. اگر نیروی وارده به‌طور ناگهانی اعمال شود، آب موجود در منافذ برای خروج از محیط زمان کمی داشته و در نتیجه فشرده شدن محیط سبب افزایش فشار آب خواهد شد. به این نوع از فرآیندهای هیدرومکانیکی، "فرآیندهای هیدرومکانیکی زهکشی نشده" گفته می‌شود. از سوی دیگر اگر نیروی اعمالی با سرعت کمتری به محیط وارد شود، آب موجود در محیط بدون تحمل فشردگی به بیرون جریان می‌یابد که به این نوع از فرآیندهای هیدرومکانیکی، "فرآیندهای هیدرومکانیکی زهکشی شده" گفته می‌شود. در این نوع فرآیندها بر خلاف نوع زهکشی نشده، کاهش در فشار آب منفذی به رخ دادن پدیده‌ی تحکیم و نشست در محیط مورد نظر کمک می‌کند. این نوع از فرآیندهای هیدرومکانیکی، به‌طور کلی تحت عنوان فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم^۲ شناخته می‌شود [۷].

1 -Hydro-mechanical coupling

2 -Direct Hydro-mechanical coupling



شکل ۳-۴- نمایی از توده سنگ متخلخل و درزه دار [۷]

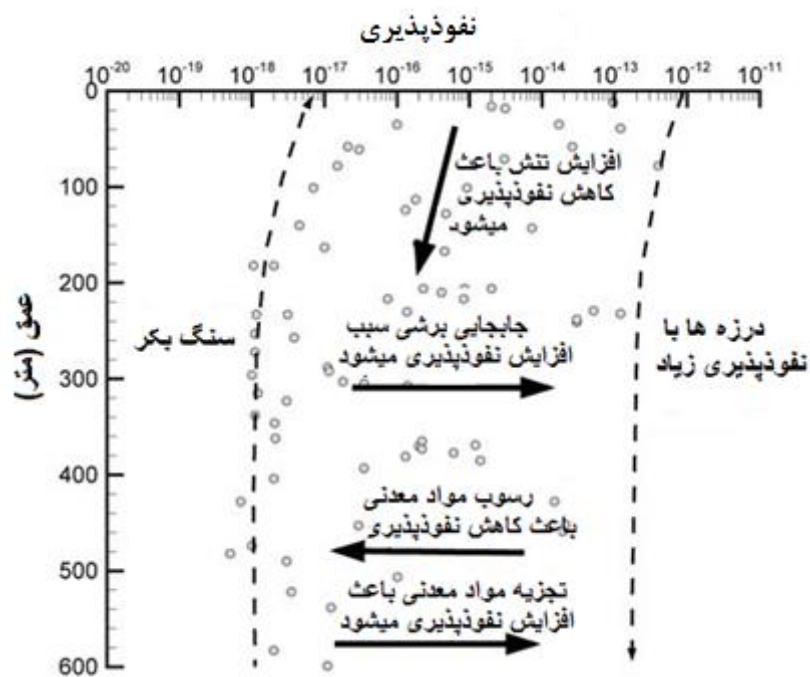
فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم غالباً در خاک‌ها و سنگ‌هایی با نفوذپذیری و مقاومت کم دیده می‌شوند. این در حالی است که فرآیندهای هیدرومکانیکی در سنگ‌های شکسته، از نوع غیرمستقیم بوده و اثراتی از قبیل تغییر در نفوذپذیری توده سنگ در اثر تغییر در هندسه شکستگی‌ها به همراه آن وجود خواهد داشت. به همین علت بررسی تغییرات نفوذپذیری در اثر تنش وارده به محیط و همچنین تأثیر تنش‌های ناشی از جریان در توده سنگ مبحث اصلی فرآیندهای توأمان بین تنش و نفوذپذیری محسوب می‌شود. پس از بررسی این رفتار در ضریب تنش‌های مختلف به محاسبه مقادیر نفوذپذیری معادل، پرداخته شده است [۷].

۳-۵- نفوذپذیری وابسته به تنش در توده سنگ درزه دار

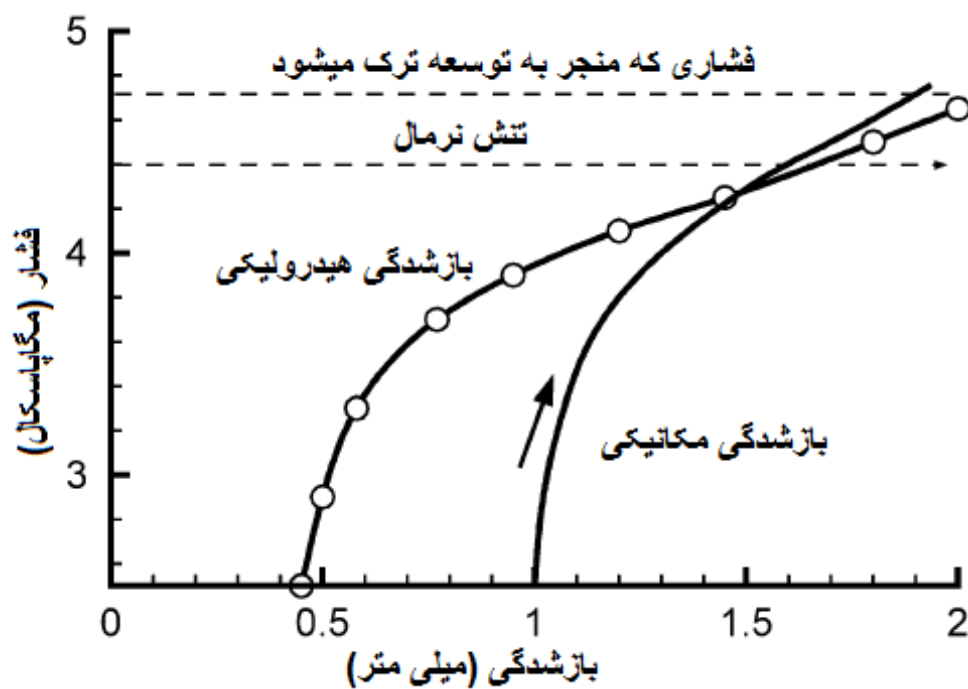
همان‌طور که پیش از این گفته شد، برای دستیابی به درک بهتری از جریان سیال در توده سنگ درزه دار در مرحله‌ی اول باید به جریان سیال درون درزه و شکاف‌های سنگ پرداخت. در این بخش به مهم‌ترین عامل که نقش کلیدی در انتقال سیال در توده سنگ، را ایفا می‌کند، یعنی نفوذپذیری پرداخته شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر نفوذپذیری توده سنگ، می‌بایست نفوذپذیری تعدادی از درزه‌هایی که در انتقال سیال بحرانی‌تر می‌باشند را مورد بررسی قرار داد. یکی از الزامات شبیه‌سازی

هیدرومکانیکی در توده سنگ درزه دار، در نظر گرفتن نفوذپذیری وابسته به تنش است. در شکل ۳-۵ رابطه‌ی بین نفوذپذیری و تنش به تصویر کشیده شده است. در سنگ‌های سخت با بافت کریستالی که حتی شاید بتوان نفوذپذیری را در آن‌ها نادیده انگاشت، جریان سیال از مسیر درزه‌های بحرانی و غالباً از درون شبکه‌ای از شکستگی‌ها انتقال می‌باید. انتقال جریان سیال در شبکه‌ای از شکستگی‌های توده سنگ نه تنها به خواص هندسی درزه‌ها بلکه به وضعیت تنش حاکم بر توده سنگ نیز بستگی دارد. در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت این موضوع در مکانیک سنگ، مطالعات مختلفی در مورد موضوعات مرتبط با نفوذپذیری توده سنگ و اهمیت آن در مهندسی سنگ انجام گرفته است، که در ادامه به آن اشاره شده است. تغییرات نفوذپذیری توده سنگ در اطراف فضایی که به تازگی حفاری شده است، یکی از موضوعات مورد توجه در سال‌های اخیر بوده است. تحقیقات انجام شده نشان داد که تغییرات اعمالی در زون اغتشاش اطراف فضای زیرزمینی که به تازگی حفر شده است، نفوذپذیری توده سنگ اطراف فضای زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پوش^۱ در سال ۱۹۸۹ و کلسال^۲ در سال ۱۹۸۴، در مورد اثر به هم خوردگی در زون اغتشاش ناشی از آتش‌کاری و تأثیر آن روی نفوذپذیری توده سنگ اطراف تونل تحقیق نمودند و متوجه شدند که نفوذپذیری اطراف تونل تحت تأثیر اتساع درزه‌های اطراف تونل قرار دارد [۷]. تحقیقات شن^۳ و بارتن در سال ۱۹۹۷ نشان داد که نفوذپذیری توده سنگ به هندسه سیستم درزه‌ها و شرایط تنش برجا وابسته است. در نگاه اول این‌طور به نظر می‌رسد که با افزایش عمق نفوذپذیری کاهش می‌باید. در حقیقت نفوذپذیری در اعماق کم به تنش وابسته است و تغییرات بیشتری را از خود نشان می‌دهد. در تحقیقات صورت گرفته در سنگ‌های کریستالی مشخص شد که تغییرات شدید نفوذپذیری در توده سنگ از عمق ۱۰۰ تا ۳۰۰ متری از سنگ بستر اتفاق می‌افتد. علت وابستگی تنش و نفوذپذیری در اعماق کم از ارتباط غیرخطی تنش نرمال و بازشدگی دهانه درزه است (شکل ۳-۶) [۷].

1 -Push
2 -Kelsal
3 -Shen



شکل ۳-۵- تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق از سطح زمین [۷]



شکل ۳-۶- ارتباط بازشدگی دهانه درزه و فشار سیال [۷]

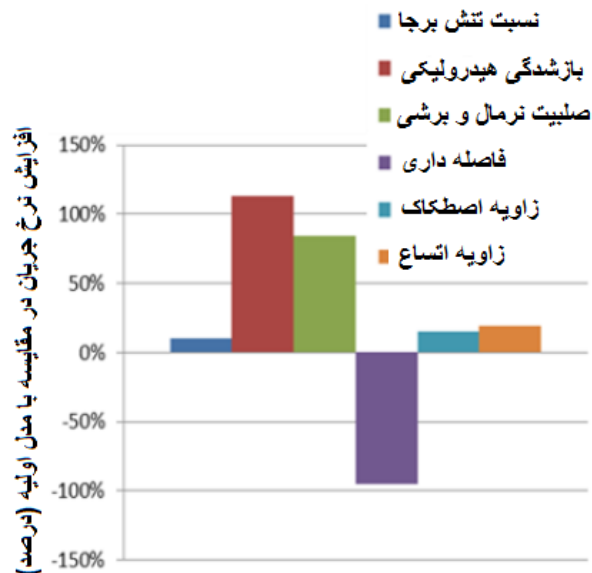
کاهش بازشدگی هیدرولیکی با افزایش عمق در تحقیقات اسنو در نتیجه‌ی تحلیل خروجی آزمایش‌های پمپاژ در سال ۱۹۶۸ مشخص شد. بر اساس نتایجی که در تحقیقات وی بدست آمد، مشخص شد که بازشدگی هیدرولیکی در ترک‌های نزدیک به سطح زمین از ۲۰۰ به ۵۰ میکرومتر در عمق ۶۰ متری کاهش می‌باید. ایجاد درزه‌های بحرانی در توده‌سنگ بیشتر در نقاط گسله و برشی اتفاق می‌افتد [۷]. مین در سال ۲۰۰۴ روابط تجربی را برای تخمین نفوذپذیری وابسته به تنش در توده‌سنگ درزه‌دار گسترش داد که در این روابط تأثیر بسته‌شدگی نرمال و اتساع برشی درزه در نظر گرفته شده است [۳۴]. همچنین ژوو و شارما^۱ در سال ۲۰۰۸ مدل تحلیلی جدیدی را برای تخمین نفوذپذیری وابسته به تنش توده‌سنگ، گسترش دادند. در این مدل اتساع پس از قله‌ی برش بر رفتار هیدرولیکی درزه‌ها در نظر گرفته شده است [۳۴].

۳-۶- تحلیل حساسیت تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی و تنش‌های محصور کننده بر نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار

به دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی که در نتایج اندازه‌گیری‌ها و تشخیص ویژگی‌های توده‌سنگ وجود دارد، انجام مطالعاتی روی تأثیر این عدم قطعیت‌ها در نرخ جریان عبوری از درزه‌های سنگی اجتناب‌ناپذیر است. این موضوع، بسیاری از محققان را بر آن داشته تا با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اثرگذار بر نفوذپذیری توده‌سنگ، درک بهتری از رفتار آب‌گذری توده‌سنگ درزه‌دار بدست آورند.

شریف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۱ با تحلیل رفتار هیدرومکانیکی سنگ پی سد گتوند با استفاده از کد 3DEC و انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای تأثیرگذار بر نوع جریان آب عبوری از پی این سد به این نتیجه رسیدند که افزایش بازشدگی درزه و نسبت تنش اعمالی به توده‌سنگ، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر نرخ جریان عبوری از توده‌سنگ دارا می‌باشند. همچنین تأثیر

فاصله‌داری به صورت معکوس عمل کرده به‌طوری که با افزایش فاصله‌داری نرخ جریان در توده‌سنگ کاهش می‌یابد. شکل ۷-۳ نتایج بدست آمده از این مطالعات را نشان می‌دهد [۳۵].



شکل ۷-۳- افزایش نرخ جریان عبوری از توده‌سنگ با افزایش ۵ درصدی هریک از پارامترهای ورودی مدل [۳۵]

جعفری و باباداغلی^۱ در سال ۲۰۰۹ تأثیر پارامترهایی که در ساخت شبکه‌ی شکستگی نقش دارند (طول خط اثر، چگالی شکستگی، جهت‌داری و بازشدگی درزه‌ها و بعد فرکتال سیستم درزه‌ها) را بر نفوذپذیری مدل‌های دوبعدی شبکه شکستگی ناپیوسته مورد مطالعه قرار دادند. در تحلیل حساسیت‌های انجام گرفته مشخص شد که بعد فرکتال بیشترین تأثیر را بر نفوذپذیری مدل‌ها در مقایسه با دیگر پارامترهای شبکه‌ی شکستگی دارد. همچنین در بین چهار پارامتر نام‌برده، چگالی و طول خط اثر درزه‌ها بیشترین اثر را بر نفوذپذیری مدل‌ها دارند. با کاهش چگالی و طول خط اثر درزه‌ها از یک مقدار مشخص، بازشدگی (هدایت هیدرولیکی) درزه‌های تکی اثرگذارترین پارامتر شبکه در نفوذپذیری مدل‌ها می‌باشند [۳۵]. ایوارس^۲ در سال ۲۰۰۶، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC به مطالعه‌ی تأثیر عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی بکار گرفته شده در مدل‌سازی عددی جریان

1 -Jafari & Babadagoli

2 -Ivars

آب ورودی به یک تونل پرداخت. او با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی در نرم افزار، میزان تغییرات نرخ جریان آب ورودی به یک تونل دایره‌ای سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داد [۳۵].

۳-۷- ناهمسانگردی تنش برجا و نفوذپذیری

ارتباط بین نفوذپذیری و تنش، پیش از این مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین ارتباط بین تنش برجا و نفوذپذیری در نتیجه‌ی مشاهداتی که از ناهمسانگردی تنش و نفوذپذیری حاصل شده بود، بدست آمد. این موضوع برای اولین بار در تحقیقات اولسون و کارلسون^۱ در سال ۱۹۷۹ مورد توجه قرار گرفت. در مطالعات آن‌ها که بر روی نفوذپذیری سنگ گرانیات در پروژه مغار نیروگاهی زیرزمینی در جاکتن سوئد و در عمق ۲۵۰ متری زمین بود، ناهمسانگردی بین نفوذپذیری در سنگ درزه‌دار و ارتباط آن با ناهمسانگردی تنش برجا مشخص شد. با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در این پروژه ضریب ناهمسانگردی تنش ۲ بدست آمد. تغییرات در مقادیر نفوذپذیری به دلیل وجود ناهمسانگردی در مقدار میدان تنش برجا می‌باشد. در مطالعاتی دیگر که بروی مخزن شکافدار نفتی اکوفیسک^۲ واقع در عمق ۲/۹ کیلومتری در دریای شمال توسط تفل و فریل^۳ در سال ۱۹۹۵ انجام شد، مشخص شد که تغییرات نفوذپذیری به تغییرات تنش در طول زمان بستگی ندارد. همان‌طور که در بخش قبل نیز شرح داده شد، حساس بودن نفوذپذیری نسبت به تنش در اعماق ۱۰۰ الی ۳۰۰ متری اتفاق می‌افتد و در اعماق بیشتر دهانه‌ی درزه‌ها در اثر تنش ناشی از وزن طبقات بسته می‌شود و یا حتی بازشدگی آن‌ها به حد نفوذپذیری پسماند کاهش می‌یابد [۷].

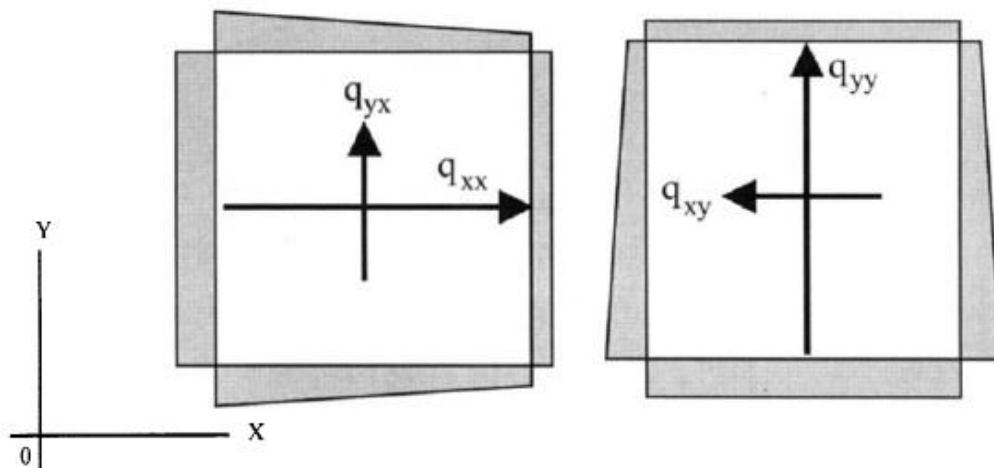
۳-۸- تانسور نفوذپذیری دوبعدی

چنانچه توده‌سنگی مطابق شکل ۳-۸ با شرایط مرزی ارائه شده در نظر گرفته شود، مقدار جریان سیال در جهت‌های اصلی صفحه دوبعدی xy از روش‌های تحلیلی و عددی قابل محاسبه است [۶].

1 -Carlsson

2 -Ekofisk

3 -Teufel & Ferrill



شکل ۳-۸- شرایط مرزی هیدرولیکی و جهت جریان در راستاهای اصلی و متقاطع [۶]

با توجه به شرایط مرزی ارائه شده در شکل ۳-۸، موارد زیر باید مدنظر قرار گیرند:

q_{xx} مقدار نرخ جریان سیال در جهت x و گرادیان فشار اعمالی در راستای x

q_{yx} مقدار نرخ جریان سیال در جهت y و گرادیان فشار اعمالی در راستای x

q_{yy} مقدار نرخ جریان سیال در جهت y و گرادیان فشار اعمالی در راستای y

q_{xy} مقدار نرخ جریان سیال در جهت x و گرادیان فشار اعمالی در راستای y

مقدار نرخ جریان سیال عبوری در هر صفحه از رابطه‌ی ۳-۹ قابل محاسبه است [۶]:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta P \quad (۳-۹)$$

در رابطه‌ی بالا Q بردار نرخ جریان سیال عبوری از مقطع مورد نظر، k نفوذپذیری یا ضریب هدایت هیدرولیکی، ΔP بردار گرادیان فشار اعمال شده در مرز موردنظر و A سطح مقطعی که جریان سیال از آن عبور می‌نماید (در حالت دوبعدی) و همچنین در حالت سه‌بعدی این پارامتر معادل سطح مقطع صفحه‌ای است که جریان از آن عبور می‌کند. چنانچه q را معادل متوسط نرخ جریان عبوری از سطح

مقطع واحد در نظر گرفته شود (رابطه ۳-۱۰)، آن‌گاه رابطه‌ی داری را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۳-

۱۱ بازنویسی نمود [۶].

$$q = Q/A \quad (۳-۱۰)$$

$$q = k. \Delta P \quad (۳-۱۱)$$

باید توجه داشت که نرخ جریان سیال عبوری از مقطع برحسب مترمربع بر ثانیه است. با توجه به شکل ۳-۹ می‌توان برای گرادین فشار راستاهای عمود برهم (p_x و p_y) رابطه‌ی ۳-۱۲ را به‌صورت رابطه‌ی ۳-۱۳ بازنویسی کرد [۶]:

$$\begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} \\ q_{yx} & q_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_x & 0 \\ 0 & \Delta P_y \end{bmatrix} \quad (۳-۱۲)$$

و به این ترتیب با توجه به رابطه ۳-۱۲ نفوذپذیری دوبعدی از رابطه ۳-۱۳ قابل محاسبه است.

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} \\ q_{yx} & q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\Delta P_x & 0 \\ 0 & 1/\Delta P_y \end{bmatrix} \quad (۳-۱۳)$$

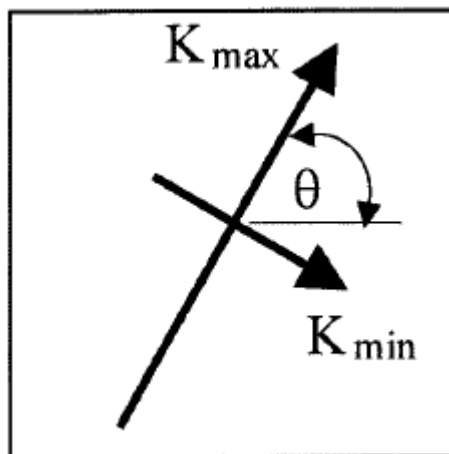
مؤلفه‌های ماتریس رابطه‌ی ۳-۱۳ را مؤلفه‌های اصلی نفوذپذیری در صفحه دوبعدی می‌نامند. با توجه به این مؤلفه‌ها می‌توان مقادیر حداقل، حداکثر و جهت آن‌ها را از روابط ۳-۱۴ تا ۳-۱۵ محاسبه کرد [۶]:

$$k_{\max} = \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} + \frac{|k_{xy}|}{\sin 2\theta} \quad (۳-۱۴)$$

$$k_{\min} = \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} - \frac{|k_{xy}|}{\sin 2\theta} \quad (۳-۱۵)$$

$$2\theta = \tan^{-1} \frac{-2k_{xy}}{k_{xx} - k_{yy}} \quad (۳-۱۶)$$

در روابط بالا θ زاویه‌ای است که k_{max} با جهت مثبت محور X به صورت پادساعتگرد می‌سازد. در شکل ۹-۳ نیز حداقل و حداکثر نفوذپذیری و جهت آن‌ها به صورت شماتیک به تصویر کشیده شده است [۶].



شکل ۹-۳- تانسور نفوذپذیری حداقل و حداکثر توده‌سنگ [۶]

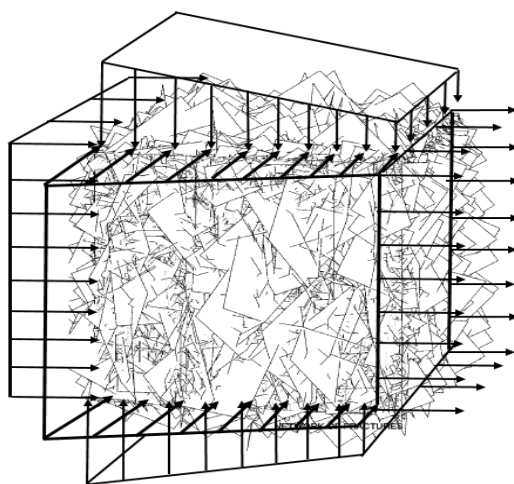
ژانگ و سندرسون برای برآورد تانسور نفوذپذیری دوبعدی در سال ۱۹۹۴، با اعمال شرایط مرزی که پیش از این به آن اشاره شد، با استفاده از روابط تحلیلی که تشریح شد مقدار نفوذپذیری یک توده‌سنگ درزه‌دار با سیستم درزه‌های متعامد محاسبه کردند و نتایج محاسبات خود را با شبیه‌سازی عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار UDEC مقایسه نمودند. نتایج مقایسه نشان داد که جواب‌های بدست آمده از روش تحلیلی با مقادیر خروجی از مدل‌های عددی با خطایی حدود ۵/۲٪ باهم اختلاف دارند که این خود بیانگر دقت قابل قبول روش المان ناپیوسته برای برآورد مقدار نفوذپذیری معادل توده‌سنگ درزه‌دار است [۶].

۳-۸-۱- تانسور نفوذپذیری سه‌بعدی

ماتریس نفوذپذیری 2×2 رابطه‌ی ۳-۱۳ را می‌توان در فضای سه‌بعدی توسعه داد و به ماتریس 3×3 رابطه‌ی ۳-۱۷ برای برآورد مؤلفه‌های نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار در حالت سه‌بعدی رسید.

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta P_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Delta P_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\Delta P_z} \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

در این ماتریس K_{ij} بیانگر مؤلفه‌های نفوذپذیری است. اندیس i بیانگر جهت مؤلفه نفوذپذیری و اندیس j بیانگر جهت اعمال گرادیان فشار منفذی است. شرایط مرزی اعمال گرادیان فشار منفذی برای برآورد نفوذپذیری در شرایط سه‌بعدی در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است [۳۶].



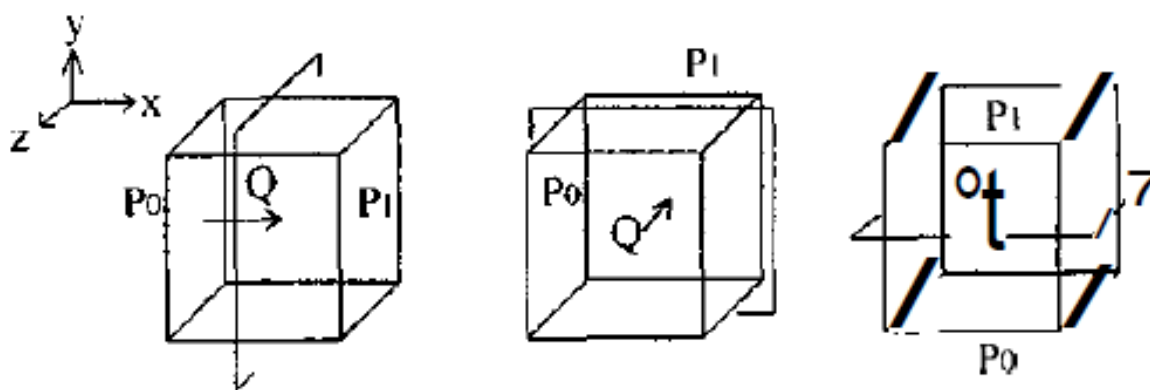
شکل ۳-۱۰- شرایط مرزی اعمال گرادیان تنش منفذی در مدل سه‌بعدی [۳۶]

برای برآورد نفوذپذیری در حالت سه‌بعدی با توجه به شرایط مرزی ترسیم شده در شکل ۳-۱۰، می‌بایست ابتدا فشار منفذی ثابتی در دو وجه مکعب مورد تحلیل در نظر گرفته شود به‌طوری که در وجهی که جریان از آن وارد مدل می‌شود فشار منفذی مثبت و در وجه خروجی فشار منفذی کمتر از فشار در وجه ورودی باشد. به بیانی دیگر با این کار جریان سیال در مدل از یک سمت به سمتی دیگر حرکت خواهد نمود. حال با توجه به شبیه‌سازی در فضای سه‌بعدی، باید برای بدست آوردن ۹ مؤلفه نفوذپذیری در سه صفحه‌ی اصلی دستگاه مختصات به‌طور جداگانه این کار صورت گیرد که نمونه‌ای از

اعمال این شرایط مرزی در مدل سه‌بعدی در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است [۳۷]. همچنین با توجه

به جهت حرکت سیال، گرادیان فشار منفذی در دو وجه دیگر مکعب که با صفحه‌ی حرکت جریان زاویه ۹۰ درجه می‌سازند، اعمال می‌شود.

در شکل ۱۱-۳، P_0 و P_1 به ترتیب فشار منفذی سیال در وجه ورودی و فشار صفر در وجه خروجی بوده و Q جهت عبور سیال و نرخ خروجی از وجه مورد نظر است.



شکل ۱۱-۳- شرایط مرزی جریان سیال در صفحات دستگاه مختصات [۳۷]

۹-۳- جمع‌بندی

در فصل سوم روابط و اصول حاکم بر مکانیزم جریان سیال در تک درزه منفرد و توده‌سنگ درزه‌دار مورد بحث واقع گردید. همچنین عوامل مؤثر بر جریان سیال در توده‌سنگ من جمله خصوصیات ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها بر جریان سیال از ناپیوستگی‌های توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت. تمامی عوامل مؤثر بر جریان سیال اثر مستقیم در مقدار مؤلفه‌های نفوذپذیری توده‌سنگ دارد. به علاوه، به بررسی انواع فرآیندهای توأمان در توده‌سنگ درزه‌دار پرداخته شد. مکانیزم عملکرد و روابط محاسباتی توسط نرم‌افزار 3DEC در فصل پنجم و ششم بر مبنای مطالب توضیح داده شده در فصل سوم می‌باشند.

فصل چهارم

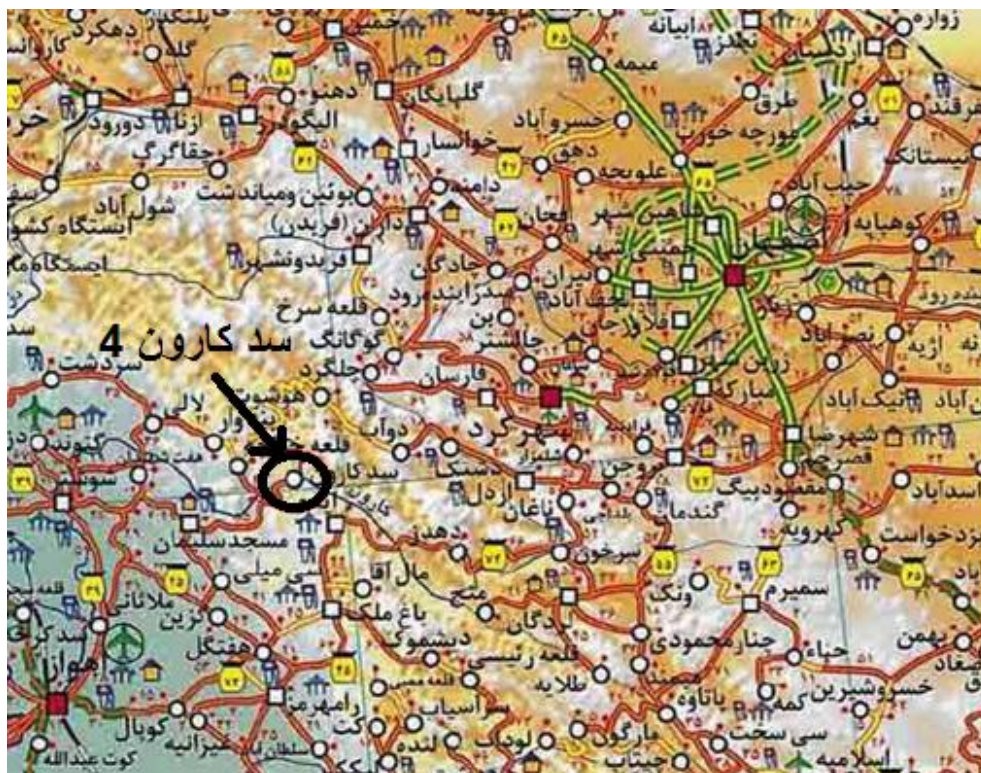
بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ ساختمانه

۴-۱- مقدمه

مهم‌ترین مسئله در طراحی و امکان‌سنجی ساخت مغارهای ذخیره‌سازی بدون پوشش نفت خام، حضور سفره‌ی آب زیرزمینی دائم در منطقه مورد نظر است. لذا به دلیل وجود سفره آب زیرزمینی مناسب در ساختگاه سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی، این مطالعه نیز در ساختگاه یکی از سدهای جنوب کشور صورت گرفته است. به علت تصمیم کارفرما (شرکت پایانه‌های نفتی) جهت مطالعات ساخت مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری و از آنجا که ساختگاه سد و مغار کارون ۴ در سازند آسماری ساخته شده است، از این ساختگاه به منظور انجام این تحقیق استفاده شده است. در این فصل به مطالعه و بررسی شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختگاه سد کارون ۴ پرداخته خواهد شد. همچنین خصوصیات و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و توده سنگ منطقه‌ی مورد مطالعه در مقیاس‌های آزمایشگاهی و برجا مورد ارزیابی و محاسبه قرار گرفته است.

۴-۲- کلیات و زمین‌شناسی سد کارون ۴

ساختگاه سد کارون ۴ در استان چهارمحال بختیاری و در فاصله‌ی ۱۸۵ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد و در ۳۵ کیلومتری جنوب غرب لردگان و در مختصات جغرافیایی به طول $5^{\circ} 24'$ ، 50° و عرض $31^{\circ} 35'$ ، $53''$ واقع گردیده است (شکل ۴-۱). مناسب‌ترین راه دسترسی به محل سد، جاده آسفalte ایزده-شهرکرد می‌باشد. سازندهای زمین‌شناسی اصلی در ساختگاه سد کارون ۴ شامل آسماری و پابده بوده که متشکل از آهک، آهک متخلخل، آهک مارنی، مارن آهکی و همچنین مارن می‌باشد. تفکیک و پهنه‌بندی نواحی علاوه بر در نظر گرفتن لایه‌ها و شرایط سنگ‌شناسی، بر اساس مقادیر RQD، نتایج آزمایش‌های لوژان، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیک سنگی و نیز داده‌های صحرایی بدست آمده، صورت پذیرفته است [۳۹].



شکل ۴-۱- موقعیت جغرافیایی سد کارون ۴ [۳۹]

۴-۳- واحدهای چینه‌شناسی

توده‌سنگ‌های ساختمانی این سد از واحدهای سازند آسماری و پابده تشکیل شده‌اند. بر مبنای شرایط زمین‌شناسی، سازند آسماری در محل سد کارون ۴ به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌گردد. با توجه به تفاوت خصوصیات زمین‌شناسی، بخش تحتانی به سه زیر بخش به نام‌های AS1، AS2، AS3 تقسیم می‌شود [۳۹].

۴-۴- زمین‌شناسی ساختمانی سد کارون ۴

محل سد بر روی یال جنوب غربی تاقدیس کوه سفید واقع شده است. این تاقدیس نامتقارن بوده و پهلوی جنوب غربی آن پرشیب‌تر از یال شمال شرقی است. در این یال شیب لایه‌بندی حدود SW

۶۵-۷۰ و امتداد آن ۴۰-۵۰ NW می‌باشد. سنگ‌ها عموماً درزه‌دار بوده و میزان بازشدگی با افزایش عمق کاهش می‌یابد. پرشدگی کلسیتی و رسی نیز در درزه‌ها دیده می‌شود [۳۹].

۴-۵- نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی

در جدول ۴-۱ نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های سنگی به صورت میانگینی از انواع مختلف سنگ‌ها آورده شده است:

جدول ۴-۱- نتایج تست‌های آزمایشگاهی به صورت میانگین انواع سنگ ساختمانی سد کارون ۴ [۳۹]

پارامتر	میانگین	انحراف معیار (درصد)
چگالی طبیعی (ton/m ³)	۲/۵	٪ ۳/۷۴
چگالی اشباع (ton/m ³)	۲/۵۵	٪ ۲/۹۲
تخلخل (٪)	۶/۴۲	٪ ۶۳/۷۶
مقاومت فشاری نامحصور طبیعی (مگاپاسکال)	۷۳/۷	٪ ۸/۳۹
مقاومت فشاری نامحصور اشباع (مگاپاسکال)	۶۰/۳	٪ ۵۸/۸۶
مدول الاستیک طبیعی (گیگاپاسکال)	۳۱/۱۵	٪ ۶۸/۱۶
مدول الاستیک اشباع (گیگاپاسکال)	۲۶/۸۸	٪ ۷۵/۲۱
مقاومت کششی طبیعی (مگاپاسکال)	۷/۳۴	٪ ۴۰/۸۵
مقاومت کششی اشباع (مگاپاسکال)	۶/۷۲	٪ ۶۶

۴-۵-۱- آزمایش برش مستقیم بر روی سطوح ناپیوستگی طبیعی [۳۹]

آزمایش برش مستقیم روی ۸ نمونه ناپیوستگی صورت گرفته و در جدول ۴-۲ نتایج مقدار میانگین این آزمایش‌ها آورده شده است:

جدول ۴-۲- نتایج آزمایش برش مستقیم روی سطوح ناپیوستگی طبیعی [۳۹]

رطوبت (٪)	نوع ناپیوستگی	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱/۴۲	درزه	۰/۶۵	۳۸/۱

۴-۶- آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ

در زیر به دو آزمایش برجای جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری در شرایط اولیه و پس از بهره‌برداری پرداخته شده است: [۳۹]

۴-۶-۱- آزمایش دیلاتومتری

به منظور محاسبه‌ی مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در مقیاس بزرگ، از این آزمایش استفاده می‌گردد. این آزمایش در گمانه‌هایی با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و با مقادیر بارگذاری سه مرحله‌ای به ترتیب ۳، ۵ و ۸ مگاپاسکال به صورت پله‌ای صورت گرفته است. نتایج آزمایش دیلاتومتری و مقدار مدول تغییر شکل‌پذیری کل، در جدول زیر آورده شده است [۳۹]:

جدول ۴-۳- مقدار میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری حاصل از آزمایش دیلاتومتری در سازند آسماری [۳۹]

مدول تغییر شکل‌پذیری (گیگاپاسکال)	انحراف استاندارد	نوع سنگ
۵/۸	۲/۵۶	آهک-مارنی و مارن-آهکی

۴-۶-۲- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

ساختار توده‌سنگ‌های ساختگاه سد کارون ۴ ترکیبی از سنگ‌های آهکی و آهک مارنی به‌همراه انواع ناپیوستگی‌ها بوده و لذا استفاده از روش بارگذاری صفحه‌ای مناسب می‌باشد. میانگین کل نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در جدول ۴-۴ آورده شده است [۳۹]:

جدول ۴-۴- میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌های ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]

مدول تغییر شکل‌پذیری اولیه (گیگاپاسکال)	مدول تغییر شکل‌پذیری در شرایط بهره‌برداری (گیگاپاسکال)
۶	۹/۱

۴-۷- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴

مقادیر نهایی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ که با استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی، برجا و برداشت‌های صحرایی بدست آمده است، در جدول ۴-۵ آورده شده است [۳۹].

جدول ۴-۵- مقادیر نهایی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]

مدول تغییر شکل پذیری اولیه (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۵/۸	۰/۲۷	۰/۶۵	۳۸/۱

۴-۸- توصیف هندسی توده سنگ درزه دار با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی‌های ناپیوسته

خصوصیاتی که وضعیت هندسه‌ی یک شکستگی در توده سنگ درزه دار را توصیف می‌کند عبارت‌اند از: جهت‌داری، فاصله‌داری، شکل، طول خط اثر، بازشدگی، دانسیته و موقعیت مرکز شکستگی که در ادامه تشریح می‌گردند [۴۰]:

جهت‌داری: زاویه و جهت شیب ناپیوستگی، جهت‌داری آن شکستگی را مشخص می‌کند و برای تعیین تعداد دسته‌درزه‌های توده سنگ با استفاده از تصاویر استریوگراف به کار می‌روند.

فاصله‌داری: فاصله‌داری، فاصله دو شکستگی مجاور از یک دسته درزه یکسان که جهت‌داری آن‌ها از تابع توزیع یکسانی تبعیت می‌کند.

شکل: شکل ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های توده سنگ اساساً نامعلوم بوده و از شکل خاصی تبعیت نمی‌کنند، معمولاً برای ساده‌سازی در روند محاسبات به شکل دایره‌ای و مستطیلی و یا چندضلعی صفحه‌ای فرض می‌شود.

طول خط اثر: هر شکستگی در رخنمون دیواره‌های سنگی به صورت یک خط مشاهده می‌شود و این خط، خط اثر ناپیوستگی و طول آن را طول خط اثر نامیده می‌شود [۴۰].

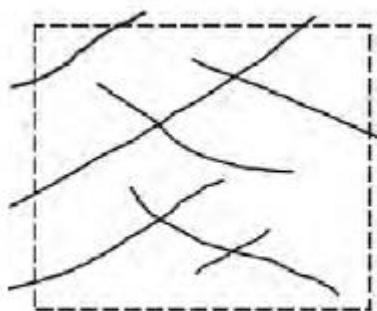
اندازه: اندازه شکستگی‌ها عموماً نامعلوم و مستقیماً نمی‌توان با استفاده از برداشت سطحی و اطلاعات گمانه‌ها بدست آورد. عملاً فرض بر این است طول خط اثر و اندازه شکستگی‌ها از یک تابع توزیع یکسان تبعیت می‌کنند.

بازشدگی: عبارت است از فاصله دو صفحه شکستگی اندازه‌گیری بازشدگی مستقیماً در محل سخت است و استفاده از روش فتوگرامتری دوبعدی فقط برای سطوح شکستگی فرسایش یافته قابلیت کاربرد دارد.

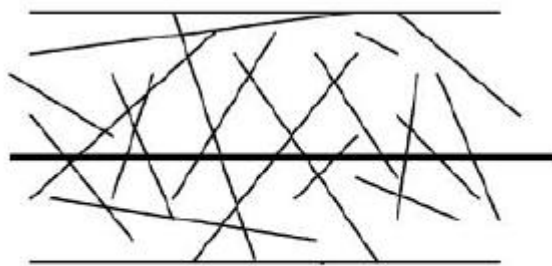
دانشیته: دانشیته شکستگی‌ها در یک دسته شکستگی، به‌صورت تعداد متوسط شکستگی‌ها در واحد حجم توده‌سنگ تعریف می‌گردد.

موقعیت مرکز شکستگی‌ها: محل مرکز شکستگی هندسی آن است که تا حد زیادی مجهول بوده و مستقیماً از برداشت سطحی و یا مغزه حفاری نمی‌توان آن را تعیین کرد [۴۰].

متغیرهای بالا مجموعه پارامترهایی هستند که در برداشت صحرایی با استفاده از پیمایش صحرایی با برداشت رخنمون اندازه‌گیری می‌شوند. واضح است که تا حد زیادی عدم قطعیت در خواص هندسی ناپیوستگی‌ها به‌ویژه در جهت‌داری، شکل و اندازه آن‌ها همراه است. این عدم قطعیت‌ها باعث می‌شود به‌جای نمایش صریح و قطعی ناپیوستگی‌ها، از توزیع تصادفی به‌عنوان نمایش ریاضی آن‌ها استفاده شود. شبیه‌سازی مدل‌های شبکه شکستگی ناپیوسته که در آن شبکه شکستگی می‌تواند ناهمگنی طبیعی خود را داشته باشد، یکی از مؤثرترین رویکردهای تحلیل جریان سیال در توده‌سنگ‌های شکسته است [۴۰]. برداشت زمین‌شناسی پارامترهای شکستگی توده‌سنگ با روش‌های برداشت خطی، پنجره و یا پیمایش گمانه‌های حفرشده در منطقه انجام می‌گیرد (شکل ۴-۳). روش برداشت خطی متداول‌ترین روش جهت ثبت خصوصیات هندسی شکستگی‌ها است، روش خط برداشت چگالی شکستگی‌ها را کمتر تخمین زده و این محدودیت به استفاده از روش برداشت پنجره منجر شده است. در این روش یک سطح مربع، مستطیل و یا دایره‌ای انتخاب شده و تمام شکستگی‌هایی که کل یا قسمتی از آن‌ها در داخل پنجره واقع شوند، ثبت می‌شوند [۴۰].



ب) روش برداشت پنجره



الف) روش خط برداشت

شکل ۴-۲- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در رخنمون‌ها [۴۰]

۴-۹- توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها

برای شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی لازم است. برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها محققان مختلف توابع توزیع احتمالی که با انطباق واقعی پراکندگی پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده‌سنگ را توصیف می‌کنند، تعیین کرده‌اند. توزیع آماری این پارامترهای هندسی در جدول ۴-۶ درج شده است [۴۰].

جدول ۴-۶- توابع توزیع آماری مرسوم در تولید شبکه شکستگی ناپیوسته [۴۰]

پارامتر هندسی	تابع توزیع
شیب و جهت شیب	فیشر، آرنولد
طول خط اثر	لاگ‌نرمال، نمایی منفی و توانی
موقعیت مرکز شکستگی	پواسون

۴-۹-۱- توزیع جهت‌داری

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها معمولاً از توزیع فیشر تبعیت می‌کند که این توزیع دارای پارامتری به نام ضریب فیشر^۱ است. در واقع ضریب فیشر میزان پراکندگی داده‌های مربوط به جهت‌داری را نسبت به میانگین آن‌ها تعیین می‌کند. از این‌رو، هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد جهت‌داری ناپیوستگی‌ها

1 - Fisher Coefficient

بیشتر به میانگین داده‌های جهت‌داری نزدیک می‌شود و بالعکس باکم شدن این ضریب، پراکندگی بیشتری در جهت‌داری ناپیوستگی‌ها وجود دارد. لذا با کاهش ضریب فشر پراکندگی جهت‌داری افزایش می‌یابد و ناپیوستگی‌های یک دسته از حالت موازی بودن فاصله می‌گیرند، در نتیجه احتمال اینکه وضعیت‌هایی در ناپیوستگی‌ها ایجاد شود که به موجب آن برخوردی بین آن‌ها رخ دهد، افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش ضریب فشر ناپیوستگی‌ها به سمت موازی شدن با یکدیگر پیش می‌روند و این امر سبب کاهش اتصال بین آن‌ها می‌شود [۵].

۴-۹-۲- توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر شکستگی‌ها

در زمینه‌ی توابع توزیع آماری طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌های توده‌سنگ مطالعات مختلفی انجام گرفته است. مک ماهن^۱ ۱۹۷۵، بارتن ۱۹۷۷، انیشتین و همکاران^۲ ۱۹۷۹، دریافتند که طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌ها از تابع توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کنند [۴۱]. رابرتسون^۳ ۱۹۷۱، پریست و هادسون ۱۹۸۱ و لافونته^۴ در سال ۱۹۹۹، اعلام کردند که طول خط اثر درزه‌های توده‌سنگ از تابع توزیع نمایی منفی پیروی می‌کند [۴۲]. باغبانان در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر تنش روی خواص هیدرومکانیکی توده‌سنگ پرداخت و اعلام نمود که طول خط اثر و فاصله‌داری شکستگی‌های منطقه سلافیلد^۵ انگلستان از تابع توزیع توانی پیروی می‌کند. لذا مهم‌ترین توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها، توابع توزیع لاگ‌نرمال، نمایی منفی و توانی است [۴۲]. به‌منظور تحلیل و برازش توابع توزیع مذکور در این پایان‌نامه از نرم‌افزار Easy-Fit استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت برازش توابع توزیع انتخابی به کاربر این امکان را می‌دهد که بر اساس سلسله روش محاسباتی توزیع‌های مدنظر کاربر را از لحاظ کاربردی رتبه‌بندی نموده و بهترین توزیع را پیشنهاد می‌دهد.

1 -Mc mahen
2 -Einstein et al
3 -Robertson
4 -Laphonte
5 -Sellafield

۴-۹-۳- توابع توزیع حاکم بر بازشدگی شکستگی‌ها

با مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تعیین توابع توزیع احتمال بازشدگی تا به حال مشخص شده است که این پارامتر از دو تابع توزیع احتمال لاگ‌نرمال و توزیع توانی پیروی می‌کند. این توابع توزیع در مطالعات گیل^۱ ۱۹۷۹، بارتن و حکمی ۱۹۹۰، پیراک و نولته^۲ ۱۹۹۷ مورد توجه قرار گرفته است [۴۳]. علاوه بر موارد اشاره شده در مطالعات حکمی و لارسون^۳ ۱۹۹۶، اورون و برکویتز^۴ ۲۰۰۱ و شریف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۰۴ اثر تابع توزیع نرمال بروی بازشدگی درزه‌ها را مورد توجه قرار دادند. همچنین برازش تابع توزیع توانی روی بازشدگی درزه‌ها نیز در مطالعات انجام شده توسط دروزی و همکاران^۵ ۲۰۰۱، مورزنکو و همکاران^۶ ۲۰۰۴ دیده شده است [۴۲].

۴-۹-۴- شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت‌کارلو

در مطالعات مختلف مهندسی سنگ برای توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ از شبیه‌سازی تصادفی مونت‌کارلو بر پایه‌ی شبکه شکستگی‌های ناپیوسته استفاده می‌گردد. شبیه‌سازی مونت‌کارلو فرآیندی است که هندسه‌ی شبکه‌ی شکستگی‌ها را با نمایش خواص نظیر موقعیت، اندازه، جهت‌داری و بازشدگی به صورت تصادفی و تابعی از چگالی احتمال بیان می‌کند [۴۰]. شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای کاهش عدم قطعیتی که به واسطه‌ی ناشناخته بودن هندسه سیستم شکستگی‌ها به وجود می‌آید، یک ابزار کارآمد بوده و کمی‌سازی تغییرات پارامترها را توسعه می‌دهد. این ابزار مخصوصاً برای مهندسی فضاهاى زیرزمینی در توده‌سنگ درزه‌دار مفید می‌باشد. فلوچارت شبیه‌سازی شبکه‌ی شکستگی‌های توده‌سنگ درزه‌دار برای یک برنامه کامپیوتری در شکل ۴-۳ نشان داده شده است [۴۰].

1 -Gale

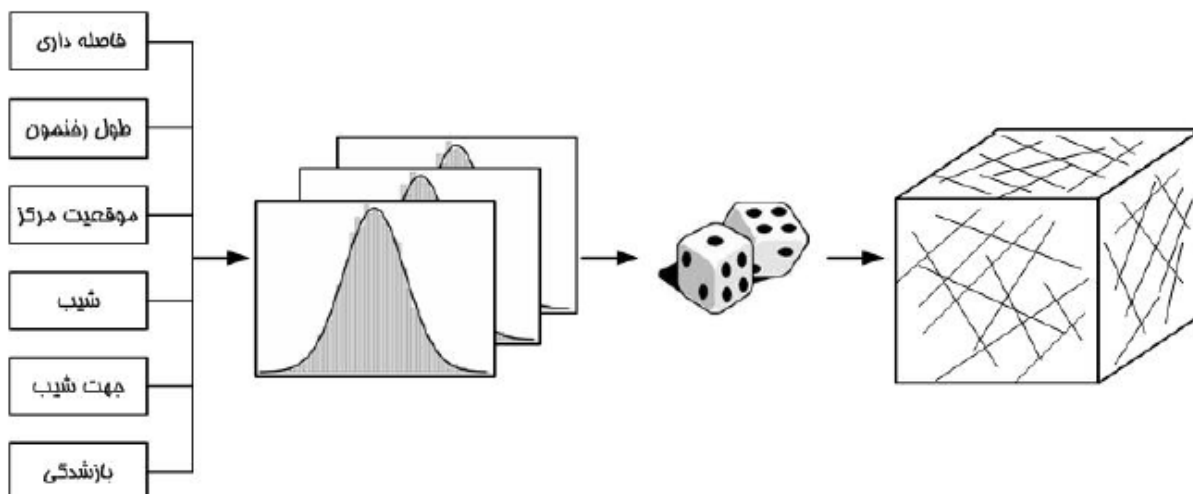
2 -Pirak

3 -Larsson

4 -Berkoyitz

5 -Deruizy et al

6 -Morzenko et al



شکل ۴-۳- روند تولید شبکه شکستگی‌های ناپیوسته با استفاده از روش مونت کارلو [۴۰]

۴-۱۰- مطالعات میدانی

در این مطالعه عملیات برداشت سطحی درزه‌ها به روش خطی صورت گرفته است. در این روش اصولاً از یک خط برداشت (متر یا نوار) که بر روی رخنمون‌های صاف سنگ قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. درزه‌هایی متقاطع با خط برداشت ثبت شده و خصوصیات این درزه‌ها من جمله شیب، جهت شیب، بازشدگی، پایایی (طول خط اثر) و پرشدگی یادداشت می‌گردد. از آنجا که به منظور محاسبه شدت درزه‌ها توسط برداشت سطحی به امتداد خط برداشت نیاز است، لذا تعیین و یادداشت امتداد خط برداشت امری مهم می‌باشد. به منظور استخراج پارامترهای هندسی مورد نیاز جهت تهیه مدل شبکه ناپیوسته‌ی شکستگی بر اساس برداشت‌های صحرایی از ساختگاه سد کارون ۴، در مجموع ۲ برداشت خطی عمود بر هم صورت گرفته است. خط برداشت با طول کلی ۴۸۰ متر، که در کل تعداد ۵۵۷ درزه برداشت شده و در این میان تعداد ۴۴۴ درزه درون ۳ دسته درزه‌ی اصلی قرار گرفته‌اند. سپس خصوصیات درزه‌های برداشت شده در قالب دسته درزه‌های اصلی تفکیک و ویژگی‌های مورد نیاز برای هر دسته درزه تعیین می‌شود. خصوصیات مورد نیاز برای هر دسته درزه شامل: تعداد دسته درزه‌های اصلی، تعداد درزه‌ی هر دسته درزه، تابع توزیع طول خط اثر، تابع توزیع بازشدگی، جهت‌داری، ثوابت

فیشر، فراوانی طولی و شدت حجمی می‌باشد که در ادامه مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۴-۵ و ۴-۶) [۴۴].

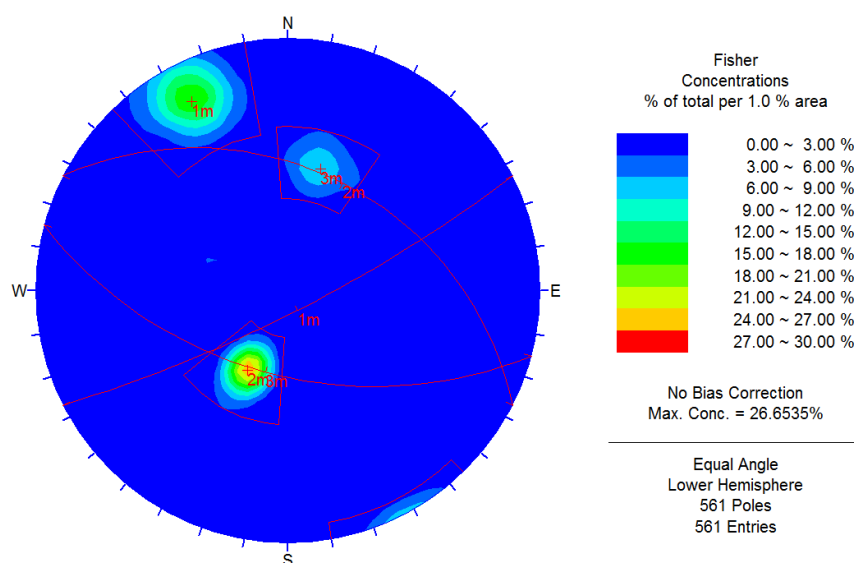


شکل ۴-۴- اندازه‌گیری بازشدگی و پرشدگی یکی از درزه‌های برداشت شده از رخنمون سطحی



شکل ۴-۵- نمایی از متر نواری جهت اندازه‌گیری فاصله‌داری درزه‌های ساختمانه سد کارون ۴

پس از تحلیل داده‌های برداشت شده در نرم‌افزار DIPS نتایج بدست آمده در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. همچنین مشخصات دسته درزه‌های برداشت شده در جدول ۴-۷ آورده شده است.



شکل ۴-۶- استریونت دسته درزه‌های غالب و جهت‌داری هر دسته درزه در ساختگاه سد کارون ۴

جدول ۴-۷- مشخصات هندسی سیستم درزه‌های ساختگاه سد کارون ۴

دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	تعداد درزه‌ها	متوسط بازشدگی درزه (cm)	ثابت فیشر K	متوسط طول خط اثر (cm)
۱	۸۰	۱۵۳	۱۵۹	۰/۷۱	۱۰۲/۷۲	۳۳۲/۶
۲	۳۹	۲۷	۱۹۹	۰/۶۳	۱۵۲/۶۷	۳۹۰/۵
۳	۵۳	۱۹۵	۸۶	۰/۷۷	۱۰۰/۹۷	۳۳۱

پس از تفکیک دسته درزه‌ها و تعیین درزه‌های غالب و با توجه به داده‌های حاصله از برداشت‌های خطی، نوع و اولویت توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر و بازشدگی درزه‌ها برای هر دسته درزه به‌طور ناپیوسته با استفاده از نرم‌افزار EASY-FIT بدست آمده که نتایج آن در ادامه ارائه شده است:

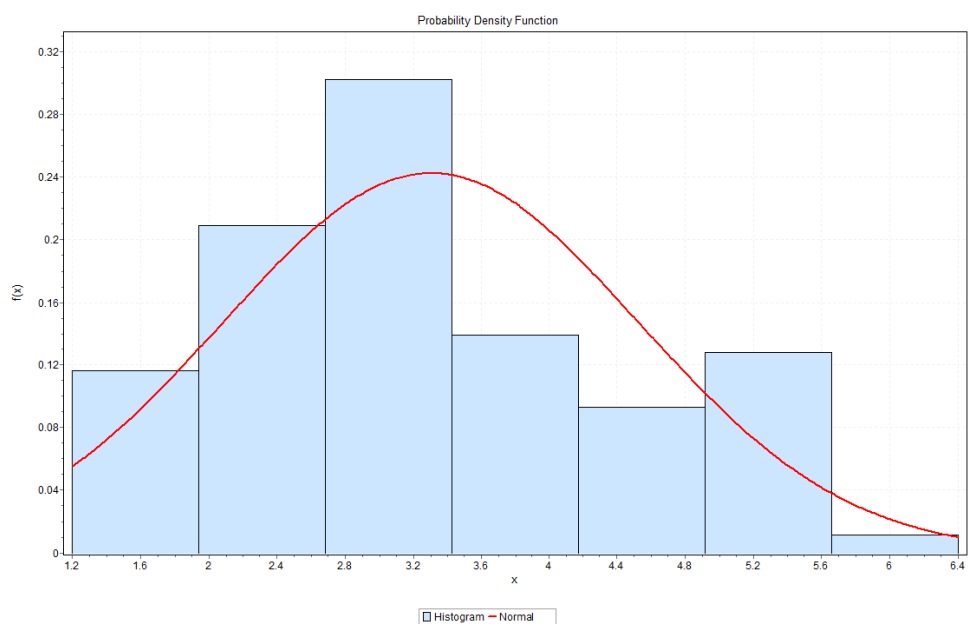
۴-۱۰-۱- تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها

پس از تحلیل و محاسبه توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها حاصل از برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه توسط نرم‌افزار EASY-FIT، نتایج بدست آمده در جدول ۴-۸ ارائه شده است.

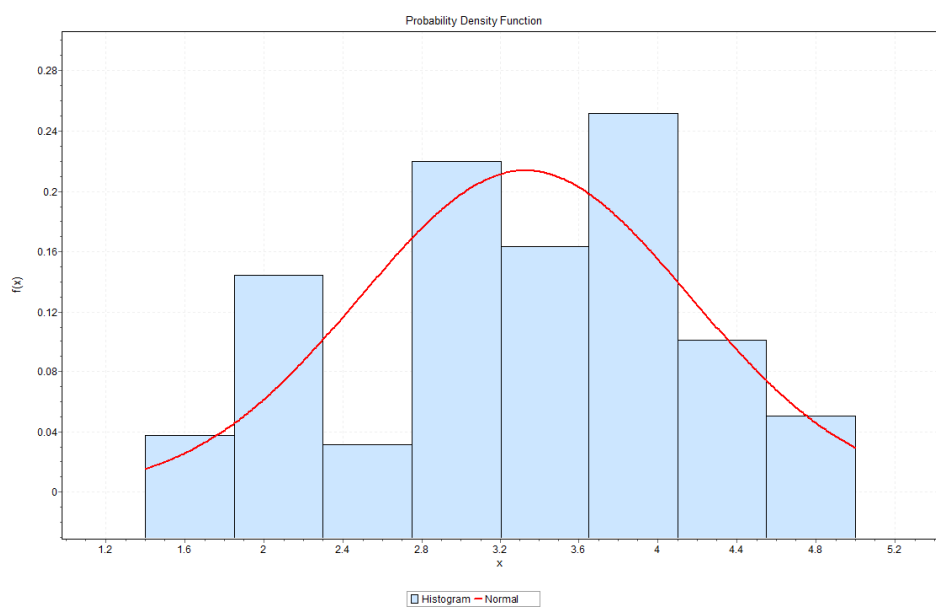
جدول ۴-۸- اولویت‌بندی توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته درزه‌ها

اولویت‌بندی توابع توزیع آماری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دسته درزه	۱	نرمال	لاگ‌نرمال (3p)	لاگ‌نرمال	توان	نمایی (2p)
	۲	نرمال	لاگ‌نرمال (3p)	لاگ‌نرمال	توان	نمایی (2p)
	۳	نرمال	لاگ‌نرمال	لاگ‌نرمال (3p)	توان	نمایی (2p)

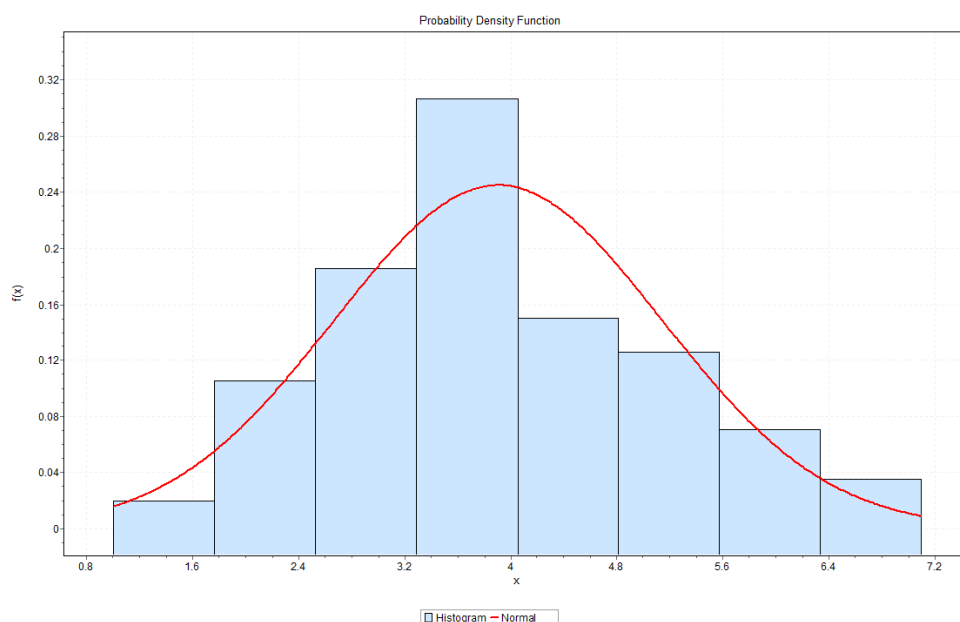
همان‌طور که از نتایج جدول ۴-۸ پیداست، بهترین تابع توزیع آماری منطبق بر طول خط اثر درزه‌ها، تابع توزیع نرمال می‌باشد. توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها منطبق با توابع توزیع مرسوم در منابع معتبر بوده که در جدول ۴-۶ نیز به آن اشاره شد. در شکل‌های ۴-۸، ۴-۹ و ۴-۱۰ منحنی برازش تابع توزیع طول خط اثر برای هر سه دسته درزه نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- برآزش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۱



شکل ۴-۸- برآزش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۲



شکل ۹-۴- برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۳

پارامترهای آماری حاصل از این تحلیل‌های در جدول ۹-۴ آورده شده است:

جدول ۹-۴- نتایج تحلیل‌های توابع توزیع نرمال حاکم بر طول خط اثر دسته درزه‌ها

دسته درزه	میانگین (متر)	انحراف معیار (متر)
۱	۳/۳۲	۰/۸۴
۲	۳/۹	۱/۲۴
۳	۳/۳	۱/۲۳

۴-۱۰-۲- تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها

پس از تحلیل آماری داده‌های مربوط به طول خط اثر درزه‌ها، به اولویت‌بندی و تحلیل داده‌های برداشت شده مرتبط با مقدار بازشدگی درزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار EASY-FIT پرداخته می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۱۰-۴ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۱۰-۴ پیداست، بهترین تابع توزیع حاکم بر بازشدگی درزه‌ها، تابع توزیع لاگ‌نرمال می‌باشد. با مقایسه این نتایج با توابع توزیع مرسوم ذکر شده در جدول ۶-۴، می‌توان به درستی این نتایج پی برد.

جدول ۴-۱۰- اولویت‌بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها

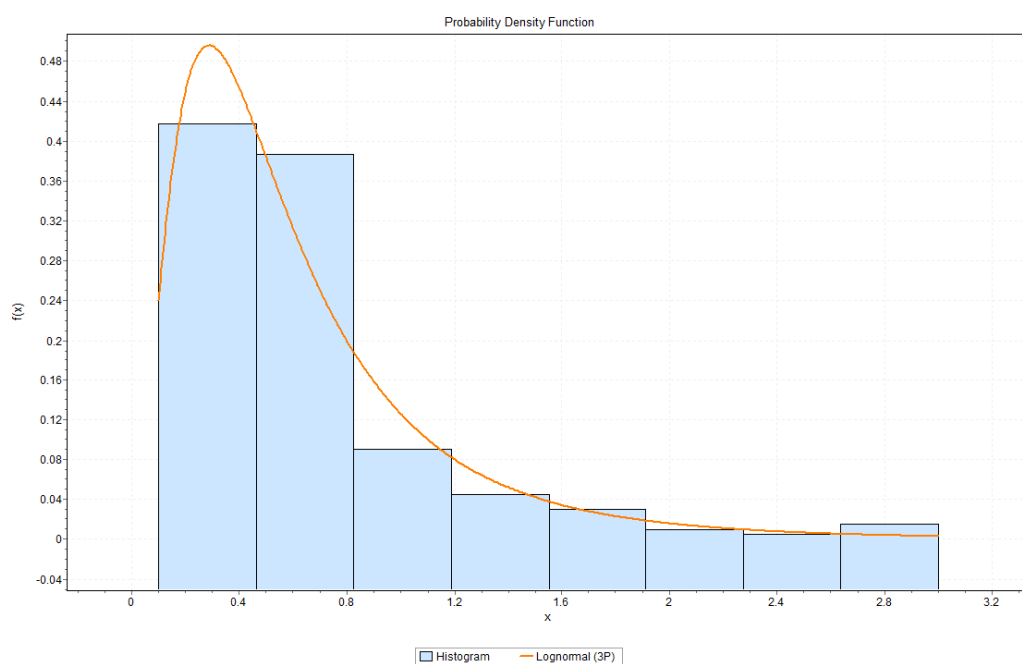
رتبه توابع توزیع آماری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دسته درزه	۱	لاگ‌نرمال (3p)	لاگ‌نرمال	نمایی (2p)	نرمال	توان
	۲	لاگ‌نرمال (3p)	لاگ‌نرمال	نمایی (2p)	نرمال	نمایی
	۳	لاگ‌نرمال (3p)	نمایی (2p)	لاگ‌نرمال	نرمال	توان

پارامترهای آماری حاصل از تحلیل صورت گرفته بر توابع توزیع حاکم بر بازشدگی درزه‌ها در جدول ۴-۱۱ آورده شده است:

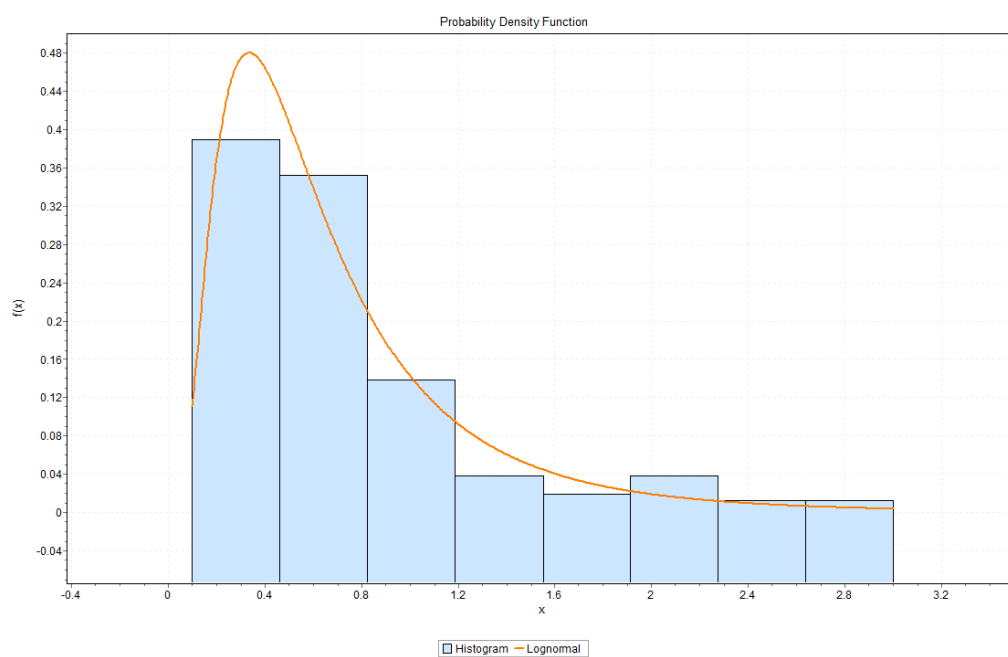
جدول ۴-۱۱- نتایج تحلیل‌های توابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه‌ها

دسته درزه	میانگین (سانتی‌متر)	انحراف معیار (سانتی‌متر)
۱	۰/۷	۰/۵۶
۲	۰/۶۳	۰/۵۳
۳	۰/۷۶	۰/۶۸

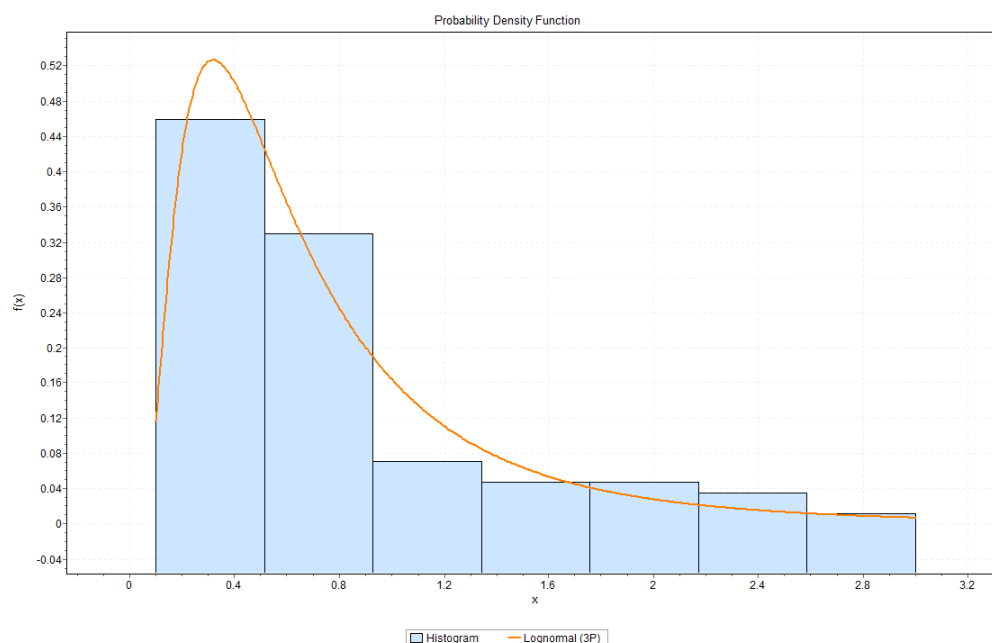
در شکل‌های ۴-۱۱، ۴-۱۲ و ۴-۱۳ منحنی برازش تابع توزیع بازشدگی برای هر سه دسته درزه نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰- برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۱



شکل ۴-۱۱- برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۲



شکل ۴-۱۲: برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۳

در جدول ۴-۱۲ مقادیر سختی برشی و نرمال هر یک از دسته درزه‌ها بر اساس تست‌های آزمایشگاهی و برجا صورت گرفته آورده شده است [۳۹]:

جدول ۴-۱۲: مقادیر سختی برشی و نرمال دسته درزه‌ها [۳۹]

دسته درزه	سختی نرمال (Mpa/m)	سختی برشی (Mpa/m)	زاویه اتساع (درجه)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (مگاپاسکال)
۱	۷/۱۸	۱/۰۲	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۷۵
۲	۷/۲۵	۱/۰۵	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۶۴
۳	۴	۰/۶۷	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۶۹

۴-۱۰-۳- فراوانی و فاصله‌داری شکستگی‌های توده‌سنگ

به منظور تولید شبکه‌ی شکستگی‌های ناپیوسته توده‌سنگ با بکارگیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو لازم است تعداد شکستگی‌های موجود در هر دسته درزه مشخص باشد. تعداد درزه‌ها وابسته به شدت حجمی و حجم مدل مورد نظر است. برای محاسبه‌ی فراوانی شکستگی‌های توده‌سنگ با توجه به موجود بودن اطلاعات برداشت‌های زمین‌شناسی، بایستی ابتدا فراوانی درزه‌ها (رابطه‌ی ۴-۱) در واحد طول پیمایش برداشت خطی تعیین شده و سپس با استفاده از ضرایب و روابط موجود (رابطه‌ی ۴-۲)

بین شدت حجمی و فراوانی طولی شکستگی‌ها که توسط جینگ و همکاران (۲۰۰۷)^۱ ارائه شده، می‌توان شدت حجمی شکستگی‌ها را در شرایط همسانگرد محاسبه نمود [۲۹].

$$P_{10} = \frac{\text{Number of Joints (N)}}{L \text{ (m)}} (m^{-1}) \quad (1-4)$$

$$P_{10} = \frac{P_{32}}{2}, P_{21} = \frac{\pi}{2} P_{32} \quad (2-4)$$

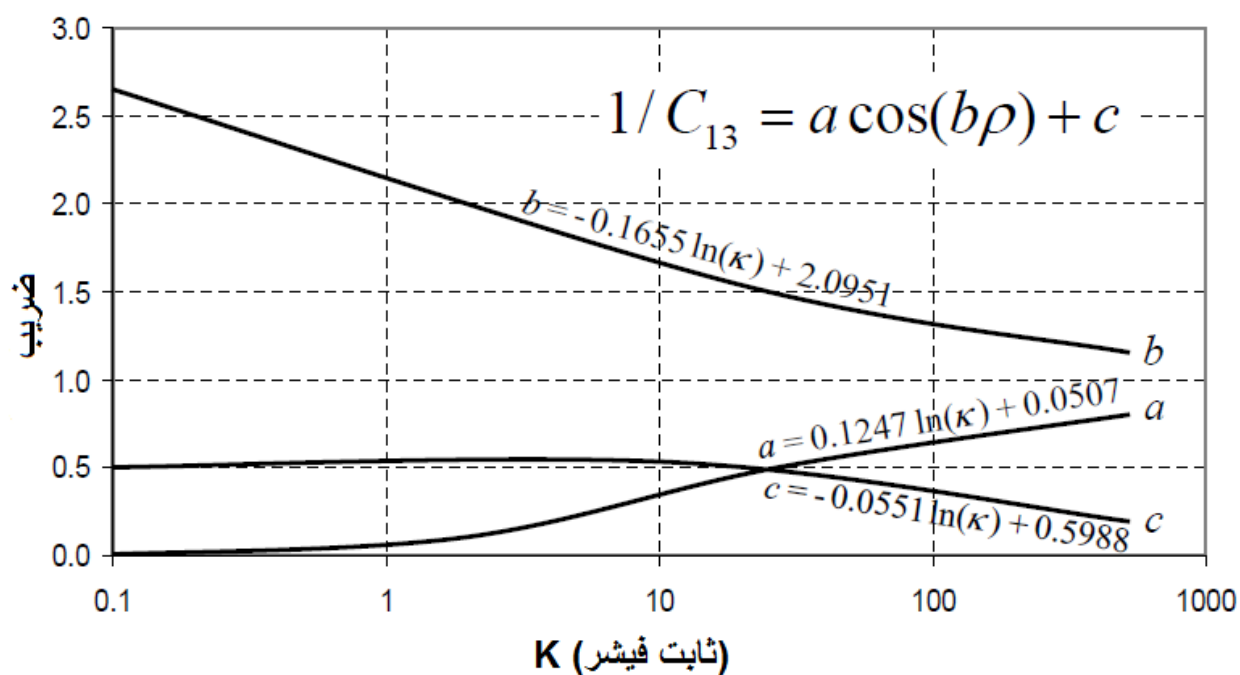
در رابطه‌ی (۱-۴) N تعداد درزه‌های هر دسته‌درزه و L طول کل خط برداشت بر حسب متر می‌باشد. در رابطه‌ی (۲-۴)، P_{10} شدت یک‌بعدی (فراوانی طولی) درزه‌ها، P_{21} شدت دوبعدی (فراوانی سطحی) درزه‌ها و P_{32} شدت حجمی درزه‌ها می‌باشد [۲۹].

$$1/C_{13} = a \cos(b\rho) + c \quad P_{32} = P_{10} \cdot C_{13} \quad (3-4)$$

در شرایط ناهمسانگرد، با در دست داشتن ثوابت فیشر (K) هر دسته درزه و زاویه‌ی بین بردار نرمال قطب میانگین هر دسته درزه و بردار نرمال خط برداشت (ρ)، می‌توان ضریب تبدیل فراوانی طولی به شدت حجمی را بدست آورد (رابطه‌ی ۳-۴). با بدست آوردن ضریب C_{13} از طریق ثوابت a، b، c با استفاده از جدول ۴-۱۳ و روابط مربوطه در شکل ۴-۱۴، می‌توان شدت حجمی (P_{32}) را محاسبه نمود [۴۵].

جدول ۴-۱۳- ضریب $1/C_{13}$ در مقابل ثابت فیشر K و زاویه ρ [۴۵]

$\rho \backslash K$	0.1	1	2	5	10	50	100	200	500	∞
0	0.50	0.53	0.62	0.79	0.90	0.98	0.99	0.99	1.00	Cos ρ
5	0.50	0.53	0.62	0.79	0.89	0.97	0.98	0.99	0.99	
10	0.50	0.53	0.61	0.78	0.88	0.96	0.97	0.98	0.98	
20	0.50	0.53	0.59	0.75	0.84	0.91	0.92	0.93	0.93	
30	0.50	0.52	0.56	0.68	0.77	0.84	0.85	0.85	0.85	
40	0.50	0.51	0.54	0.62	0.67	0.74	0.75	0.75	0.75	
50	0.50	0.51	0.51	0.54	0.57	0.62	0.62	0.63	0.63	
60	0.50	0.49	0.48	0.47	0.45	0.47	0.48	0.48	0.48	
70	0.50	0.48	0.45	0.39	0.34	0.32	0.32	0.32	0.32	
80	0.50	0.48	0.44	0.34	0.26	0.18	0.16	0.16	0.16	
90	0.50	0.48	0.44	0.33	0.24	0.11	0.08	0.06	0.04	



شکل ۴-۱۳- ثوابت a , b و c جهت محاسبه ضریب C_{13} [۴۵]

مقادیر محاسبه شده فراوانی طولی و شدت حجمی هر یک از دسته درزه‌ها در جدول ۴-۱۴ آورده

شده است:

جدول ۴-۱۴ نتایج فراوانی طولی و شدت حجمی دسته درزه‌های توده‌سنگ ساختگاه سد

دسته درزه	فراوانی طولی (m^{-1}) P_{10}	شدت حجمی (m^2/m^3) P_{32}
۱	۰/۳۳	۰/۶۲
۲	۰/۴۱	۱/۳۲
۳	۰/۱۸	۰/۳۴

۴-۱۱- جمع‌بندی

در فصل چهارم ضمن بررسی اجمالی ساختگاه سد کارون ۴ و شرایط زمین‌شناسی، به نتایج آزمایشگاهی و برجای ساختگاه نیز اشاره شد. روش شبیه‌سازی شبکه شکستگی‌های ناپیوسته (DFN) به‌صورت تئوری مورد بحث قرار گرفت. همچنین اطلاعات حاصل از برداشت‌های سطحی به‌منظور تهیه داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها شامل تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌داری، بازشدگی و طول خط اثر در محل ساختگاه مورد بررسی قرار گرفت و سپس توسط نرم‌افزارهای DIPS و EASY-FIT تحلیل گردید. در گام بعد توابع توزیع آماری حاکم بر ناپیوستگی‌های برداشته شده اعم از بازشدگی و طول خط اثر و همچنین فراوانی خطی و شدت حجمی محاسبه شده است. داده‌های بدست آمده در این فصل به عنوان مقادیر ورودی جهت مدل‌سازی عددی، ساخت شبکه شکستگی‌های ناپیوسته توده‌سنگ ساختگاه سد کارون ۴ و همچنین تحلیل شرایط اندرکنش هیدرومکانیکی و نهایتاً تخمین المان حجم معرف پایه (REV) در فصل پنجم مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

فصل پنجم

مدل سازی عددی تراوایی توده سنگ درزه دار

۵-۱- مقدمه

در فصل‌های گذشته، فرآیندهای توأمان هیدرومکانیکی در توده‌سنگ درزه‌دار و روش شبیه‌سازی جریان سیال در توده‌سنگ توسط روش المان ناپیوسته مورد بحث واقع گردید. در این فصل ابتدا به ساخت شبکه شکستگی‌های ناپیوسته با استفاده از نرم‌افزار 3DEC و بر اساس برداشت‌های صحرایی پرداخته شده است. سپس به تخمین ماتریس نفوذپذیری سه‌بعدی در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان پرداخته شده و مقادیر محاسبه شده در این دو حالت با یکدیگر مقایسه می‌شود. سپس به تخمین المان حجم معرف پایه بر اساس نفوذپذیری بلوک درزه‌دار درون شبکه شکستگی ناپیوسته ی تولید شده پرداخته شده و نفوذپذیری سه‌بعدی توده‌سنگ درزه‌دار ساختگاه سد کارون ۴ تخمین زده می‌شود. در نهایت با مقایسه‌ی مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده توسط مدل عددی با مقادیر برجا حاصل از تست لوژن در ساختگاه سد کارون ۴، به اعتبارسنجی نتایج نفوذپذیری مدل عددی پرداخته شده است.

۵-۲- مفهوم المان حجم معرف پایه^۱

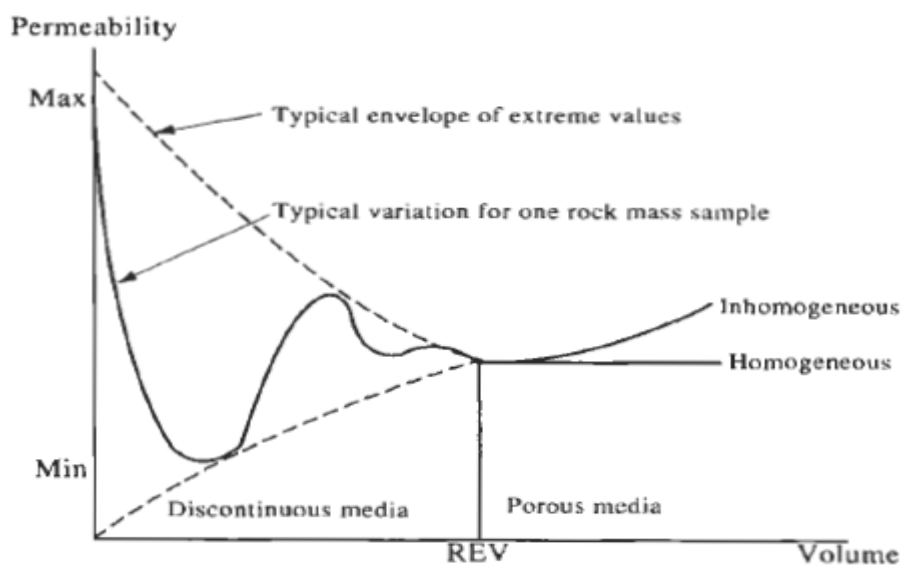
رفتار توده‌سنگ بسیار وابسته به مقیاس^۲ است، لذا بررسی خواص توده‌سنگ مسئله‌ی اصلی انتخاب حجم توده‌سنگی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد تا رفتار توده‌سنگ به‌درستی معرف خواص آن باشد. اندازه‌ی حجم اولیه‌ی پایه برای پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی متفاوت بوده و بزرگ‌ترین آن‌ها می‌بایست برای تحلیل توأمان تنش-آب‌گذری در نظر گرفته شود. به دلیل ناهمسانگردی توده‌سنگ‌های درزه‌دار، حجم اولیه معرف می‌تواند بسیار بزرگ باشد [۴۷، ۴۸ و ۴۲]. لانگ و ویترسپون^۳ بر اساس نتایج آزمایش‌های خود روی بلوک‌های سنگی با ابعاد و درزه‌داری مختلف، به این نتیجه رسیدند که اندازه‌ی حجم اولیه معرف برای مطالعات هیدرولیکی ۱۰ تا ۲۰ برابر فاصله‌داری

1 -Representative elemental Volume

2 -Scale Dependency of Fractured Rock

3- Long & Whiterspoon

متوسط درزه‌ها است. همچنین شولتز^۱ با مطالعه بروی سنگ‌های بازالتی پیشنهاد کرد که اندازه‌ی حجم اولیه‌ی معرف ۵ تا ۱۰ برابر متوسط فاصله‌داری درزه‌ها و یا اندازه‌ی بلوک‌ها می‌باشد. در موردی دیگر، هنگامی که پاراسیو^۲ در مدل‌سازی یک شیب سنگی به‌وسیله‌ی روش المان محدود با زمان‌های حل محاسباتی بزرگی روبرو شد، به‌منظور تسریع در زمان حل مدل‌ها از یک مدل مکعبی با اندازه‌ی ۱۰ برابر ماکزیمم فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها به عنوان اندازه‌ی حجم اولیه‌ی معرف استفاده نمود. اودا^۳ در سال ۱۹۸۸ بر اساس تئوری تانسور ترک^۴ و با درنظر گرفتن یک سیستم شکستگی همگن آماری،^۳ برابر متوسط طول خط اثرهای درزه‌ها را به عنوان حجم اولیه معرف توده‌سنگ پیشنهاد نمود [۴۹]. در شکل ۵-۱ تغییرات هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ به حجم آن قابل مشاهده است [۵۰].



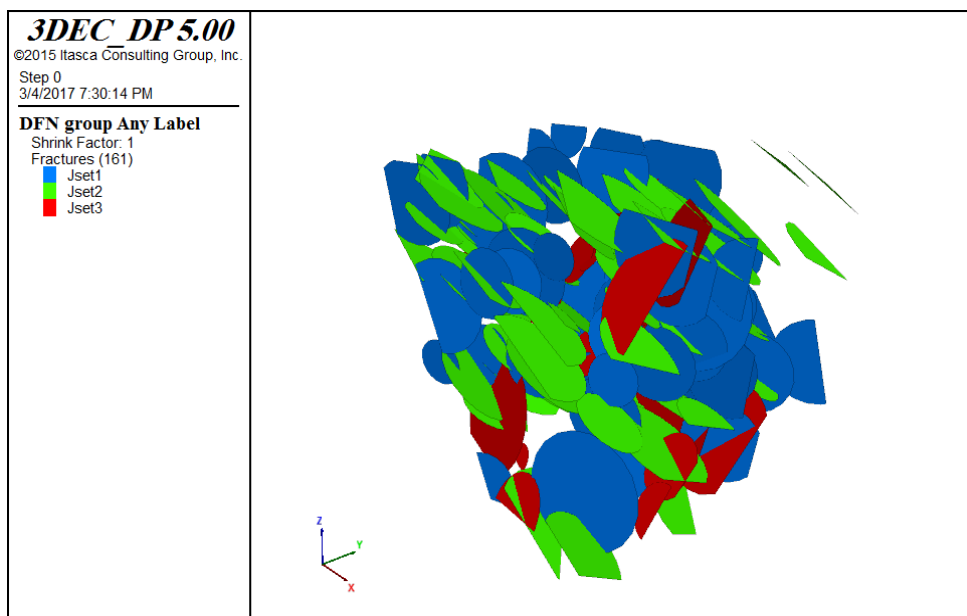
شکل ۵-۱- نمودار المان حجم معرف پایه جهت تخمین قابلیت هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ درزه‌دار [۵۰]

-
- 1- Sholtez
 - 2- Parasive
 - 3- Oda
 - 4- Crack Tensor Theory

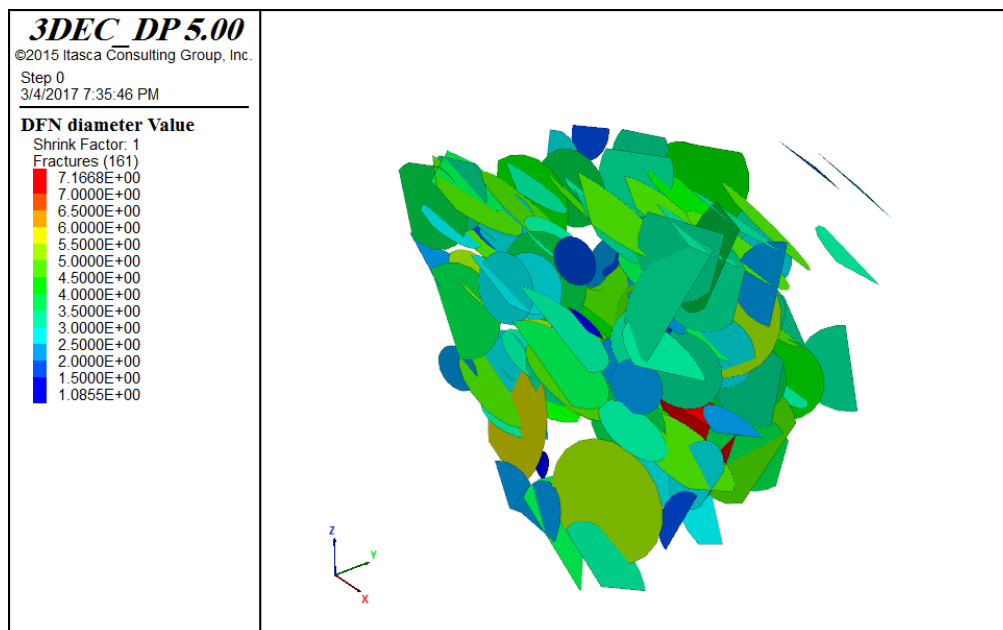
۵-۳- تولید شبکه شکستگی ناپیوسته ساختگاه سد کارون ۴ در نرم افزار

3DEC

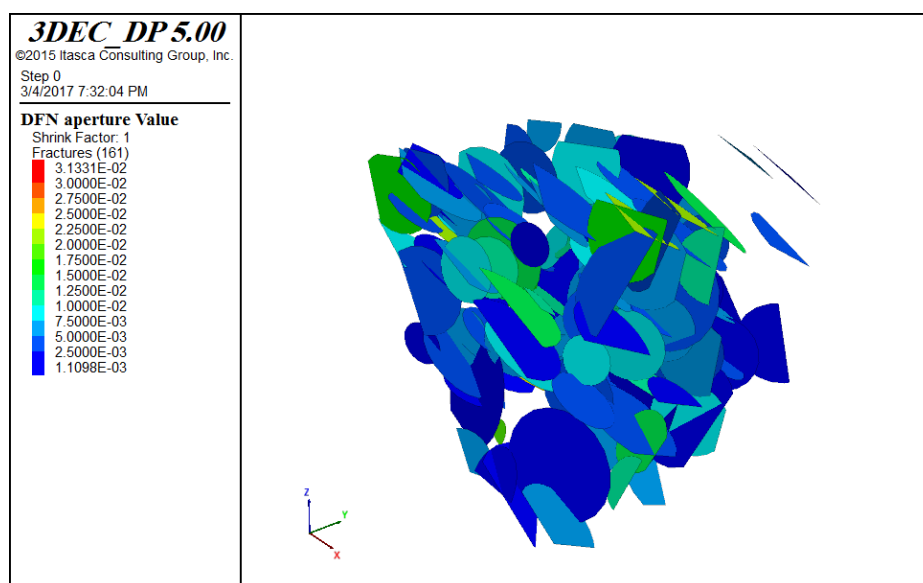
اولین گام در تخمین نفوذپذیری توده سنگ درزه دار، ایجاد شبکه شکستگی های ناپیوسته (DFN) و تعیین المان حجم معرف پایه (REV) می باشد. بدین منظور، بر اساس داده های صحرایی برداشت شده و مقادیر توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر، بازشدگی و جهت داری ساختگاه مورد نظر، به ساخت شبکه شکستگی ناپیوسته پرداخته شده است. شکل ۵-۲ شبکه شکستگی ناپیوسته ی تولید شده را به تفکیک ۳ دسته درزه مربوطه، نشان می دهد.



۵-۲- شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک دسته درزه ها



شکل ۵-۳- شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک قطر درزه‌ها



شکل ۵-۴- شبکه شکستگی ناپیوسته به تفکیک بازشدگی درزه‌ها

همانطور که از شکل ۵-۲ مشخص است، در این شبکه تعداد ۱۶۱ درزه تولید شده است. همچنین در شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴، شبکه شکستگی ناپیوسته ی تولید شده به ترتیب بر اساس بازشدگی (تابع توزیع لاگ‌نرمال) و طول خط اثر (تابع توزیع نرمال) نشان داده شده است.

۵-۴- تخمین نفوذپذیری سه بعدی توده سنگ درزه دار ساختگاه سد کارون ۴

همان طور که در مباحث پیشین اصول و مفهوم المان حجم معرف پایه به تفصیل مورد بحث قرار گرفت، در این بخش ابتدا به ساخت بلوک های درزه دار درون شبکه ی شکستگی ناپیوسته پرداخته شده و سپس شرایط هیدرولیکی مرزی به هریک از بلوک ها اعمال شده و بلوک نهایی مبتنی بر REV تعیین و کالیبره شده است. بدین منظور، بلوک هایی با ابعاد (طول هر یک از اضلاع) ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر درون هسته ی مرکزی شبکه شکستگی ناپیوسته ساخته شده و سیستم درزه داری DFN برای هر یک از بلوک های مذکور اعمال می گردد. مسلم است که با افزایش ابعاد بلوک تعداد بیشتری از درزه های شبکه شکستگی ناپیوسته بلوک را قطع می نمایند. سپس شرایط مرزی هیدرولیکی که در نرم افزار به صورت فشار هیدرولیکی مرزی^۱ می باشد به هر یک از بلوک ها اعمال می شود. مراحل مدل سازی و تخصیص خصوصیات ژئومکانیکی و هیدرولیکی مرحله به مرحله در زیر ارائه شده است.

۵-۴-۱- تخصیص پارامترهای ژئومکانیکی و هیدرولیکی به مدل عددی در نرم افزار 3DEC

اولین گام پس از ساخت بلوک های درزه دار، تخصیص پارامترهای ژئومکانیکی و هیدرولیکی به ماده سنگ، ناپیوستگی ها و سیال مورد نظر می باشد. از آنجا که در نرم افزار مورد استفاده، از مدول بالک و برشی به عنوان جایگزین مقاومت و مدول تغییر شکل پذیری ماده سنگ و توده سنگ استفاده می شود، تمامی پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی عددی با ذکر مقادیر مربوطه در جداول ۵-۱ و ۵-۲ آورده شده است.

1 - Boundary Pore Pressure

جدول ۵-۱- پارامترهای تخصیص یافته به ماده سنگ در مدل عددی [۳۹]

زاویه اصطکاک (داخلی (درجه)	چسبندگی (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	چگالی (تن بر متر مکعب)	مدول برشی (گیگاپاسکال)	مدول بالک (گیگاپاسکال)
۳۸/۴	۰/۶۵	۰/۲۷	۲/۵	۱/۵۸	۱/۹۴

جدول ۵-۲- پارامترهای مکانیکی تخصیص یافته به درزه‌ها در مدل عددی [۲۹]

دسته درزه	سختی نرمال (Mpa/m)	سختی برشی (Mpa/m)	زاویه اتساع (درجه)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (مگاپاسکال)
۱	۷/۱۸	۱/۰۲	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۷۵
۲	۷/۲۵	۱/۰۵	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۶۴
۳	۴	۰/۶۷	۱~۵	۲۵	۰/۰۰۶۹

خصوصیات مورد نیاز سیال (آب شیرین) جهت اعمال به مدل عددی در جدول ۵-۳ آورده شده است.

جدول ۵-۳- خصوصیات سیال (آب) تخصیص یافته به مدل عددی [۳۸]

مدول بالک (گیگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ویسکوزیته دینامیک (پاسکال.ثانیه)
۲/۱۵	۱۰۰۰	۰/۰۰۱

مدل رفتاری تخصیص یافته به بلوک و ناپیوستگی‌ها به ترتیب موهر کولمب^۱ و مدل لغزشی کولمب^۲ می‌باشد [۳۸].

۵-۴-۲- تخمین تنش‌های افقی

تخمین نسبت تنش افقی در شرایط برجا موضوعی پیچیده بوده و بهترین روش برای محاسبه این پارامتر، تست‌های برجا می‌باشد. تنش‌های افقی در یک نقطه از توده سنگ، در جهات مختلف با هم متفاوت هستند [۵۱]. در شرایط طبیعی میانگین تنش افقی وابسته به تنش عمودی بوده و با ضریب

1 -Mohr-Coulomb

2 -Coulomb Slip Model

K (نسبت تنش افقی به قائم) بر اساس رابطه ۵-۱ محاسبه می‌شود. همچنین به‌منظور تخمین مقدار

K روابط پیشنهاد شده در جدول ۵-۴ مورد استفاده قرار گرفته است.^۱

$$\sigma_h = K\sigma_v = K\gamma z \quad \text{رابطه ۵-۱}$$

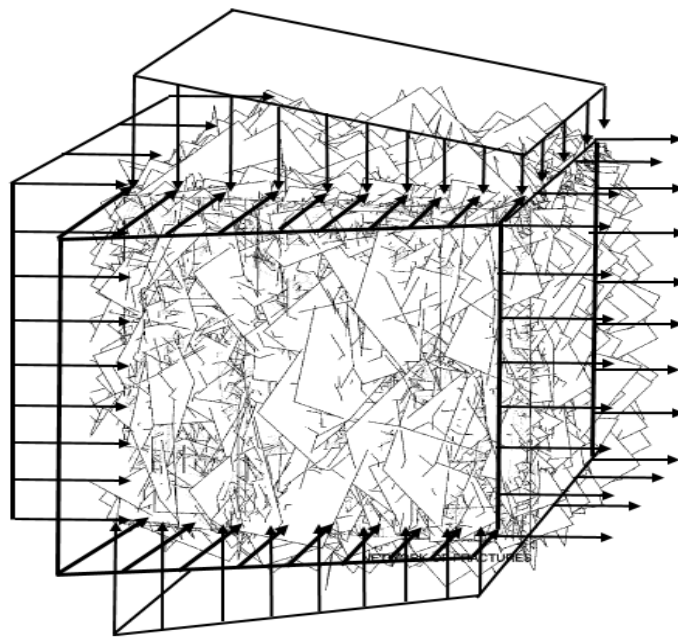
مقادیر محاسبه شده K، با توجه به عمق مدل بوده و به‌صورت میانگین تمامی روابط آورده شده در جدول ۵-۴ محاسبه شده است. واضح است که با افزایش عمق تنش افقی کاهش یافته و رفته‌رفته نسبت تنش افقی به قائم به سمت ۱ میل می‌نماید (تنش هیدرواستاتیک). در اغلب موارد در عمق‌های کم و نزدیک به سطح زمین تنش افقی بسیار بیشتر از تنش قائم است.

جدول ۵-۴- روابط تجربی تخمین نسبت تنش افقی به قائم [۵۱]

مرجع	محل و محدوده عمق (متر)	رابطه تجربی (K)
هوک و براون (۱۹۸۰)	گستره جهانی ۱۰۰ تا ۳۰۰۰	$0.3 + 100/z < k < 0.5 + 1500/z$
ون هیردین (۱۹۷۶)	آفریقای جنوبی تا ۲۵۰۰	$K = 0.448 + (248/z)$
لی (۱۹۸۶)	چین ۱۰۰ تا ۵۰۰	$0.3 + 100/z < K < 0.5 + 440/z$
رومل (۱۹۸۶)	گستره جهانی ۵۰۰ تا ۳۰۰۰	$0.5 + 150/z < K < 0.98 + 250/z$
هرگت (۱۹۸۷)	کانادا ۲۰۰ تا ۵۰۰	$0.66 + 72/z < K < 1.3 + 110/z$
ترزاقی و ریچارت (۱۹۵۲)		$K = \nu / 1 - \nu$
شئوری (۲۰۰۱)	هند	$K = 0.33 + 9.5E_h (0.001 + 1/z)$

در جدول ۵-۴، E_h به ترتیب عمق، نسبت پواسون و مدول تغییر شکل‌پذیری می‌باشند. در این مدل‌سازی از نسبت مختلف تنش افقی به قائم و در سه عمق ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری، بر اساس جدول ۵-۵ استفاده شده است.

1- Stille & Palmstrom, 2008

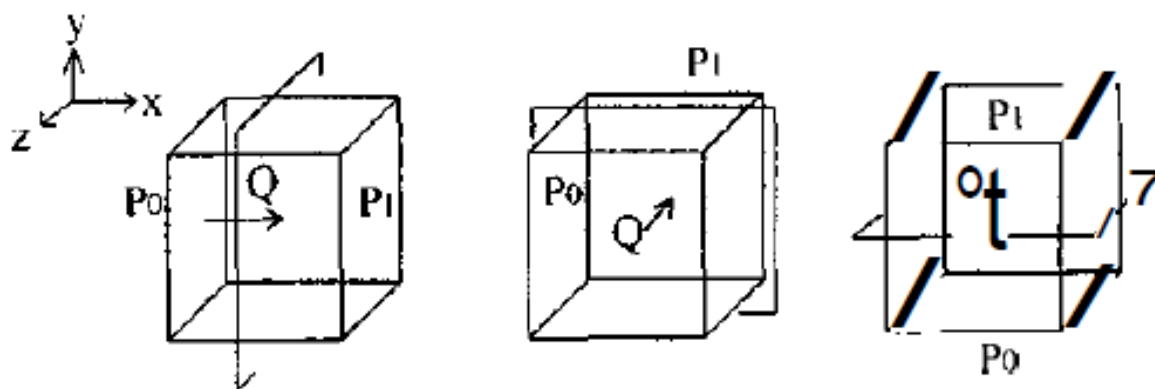


۵-۵ شرایط مرزی هیدرولیکی مدل عددی [۳۶]

جدول ۵-۵- مقادیر میانگین نسبت تنش افقی به قائم (K)

عمق (متر)	میانگین K
۵۰	۱/۵، ۲ و ۲/۵
۱۰۰	۱/۵، ۲ و ۲/۵
۱۵۰	۱/۵، ۲ و ۲/۵

پس از تعیین و تخصیص مقادیر و پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی به مدل عددی، به منظور محاسبه نفوذپذیری، می‌بایست در دومین گام شرایط مرزی هیدرولیکی تعیین و اعمال گردد. شرایط مرزی هیدرولیکی (فشار سیال مرزی) در شکل ۵-۵ به تصویر کشیده شده است [۳۶]. این مراحل به ترتیب برای سه صفحه x ، y و z به صورت جداگانه انجام شده (شکل ۵-۶) تا نفوذپذیری سه‌بعدی معادل برای هر یک از بلوک‌ها با ابعاد مختلف بدست آید [۳۷].



شکل ۵-۶ شرایط مرزی هیدرولیکی جهت تخمین نفوذپذیری در مدل عددی [۳۷]

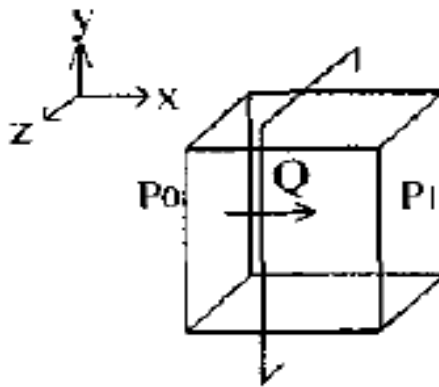
مقدار فشار منفذی وارد بر مرزهای مدل برای تمامی بلوک‌ها یکسان و برابر با ۱ مگاپاسکال و گرادیان فشار متناظر در وجوه دیگر مدل نیز فشاری یکسان دارند [۶].

۵-۴-۳- برآورد مؤلفه‌های نفوذپذیری

مطابق با شرایط مرزی مطرح شده، ۹ مؤلفه نفوذپذیری در سه جهت اصلی x ، y و z برای هر یک از بلوک‌ها با ابعاد مختلف با شرایط یکسان انجام شده است. به منظور محاسبه مقادیر نفوذپذیری در هر مرحله، می‌بایست مقادیر نرخ آب خروجی از مرز انتهایی مورد نظر (دو وجه دارای اختلاف فشار) توسط نرم‌افزار لیست شده و پس از انتقال به نرم‌افزار اکسل، درایه‌های متناظر با سه راستای x ، y و z هر یک در ستون مربوطه جمع گردند. این عملیات برای سه گرادیان متغیر فشار منفذی در سه راستای ذکر شده صورت گرفته و در نهایت ۹ مؤلفه نرخ سیال خروجی بدست خواهد آمد و در ماتریس متناظر قرار خواهند گرفت. سپس با استفاده از روابط ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۷ ماتریس نفوذپذیری محاسبه می‌گردد.

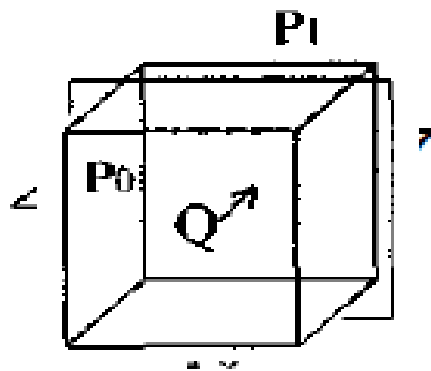
۵-۴-۳-۱- تخمین مؤلفه‌های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای x به‌منظور تخمین مؤلفه‌های نفوذپذیری، می‌بایست جهت حرکت سیال و جهت اعمال فشار منفذی در راستاهای اصلی تعیین و اعمال گردد. به عنوان مثال با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای x

سه مؤلفه از ماتریس نفوذپذیری بدست خواهد آمد. بدین منظور پس از اعمال فشار منفذی در وجه ابتدایی X ، مقادیر نرخ سیال خروجی از سه وجه دیگر توسط نرم افزار محاسبه شده و با قرار دادن این مقادیر در رابطه دارسی و همچنین با در دست داشتن اختلاف فشار سیال در دو وجه ابتدایی و انتهایی راستای X ، می توان سه مؤلفه k_{xx} ، k_{yx} و k_{zx} را محاسبه نمود. لازم به ذکر است اندیس اول مؤلفه های نفوذپذیری نشان دهنده ی مسیر جریان سیال و اندیس دوم نشان دهنده ی گرادیان متغیر فشار منفذی وارد بر مرز مدل می باشد. در شکل ۷-۵ مدل عددی شرایط مرزی و مسیر حرکت سیال در راستای صفحه X نشان داده شده است [۶ و ۳۷].



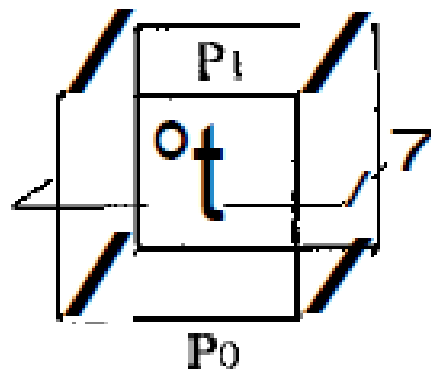
شکل ۷-۵- شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای x [۳۷]

۵-۴-۳-۲- تخمین مؤلفه های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای y
 مشابه با حالت قبل، در حالتی که گرادیان متغیر فشار منفذی بر مرز مدل در راستای y باشد، نرخ جریان خروجی از سه وجه در این حالت قابل محاسبه است. در شکل ۸-۵ شرایط مرزی فشار منفذی نشان داده شده است.



شکل ۵-۸- شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای y [۳۷]

۵-۴-۳- تخمین مؤلفه‌های نفوذپذیری با اعمال گرادیان متغیر فشار سیال در راستای z در حالتی که گرادیان متغیر فشار منفذی بر مرز مدل در راستای z باشد، همانند حالت‌های قبل، نرخ جریان خروجی از سه وجه در این حالت قابل محاسبه است. در شکل ۵-۹ شرایط مرزی فشار منفذی نشان داده شده است.



شکل ۵-۹- شرایط مرزی مدل عددی جهت تخمین نفوذپذیری در راستای z [۳۷]

۵-۴-۳- برآورد مقادیر نفوذپذیری سه‌بعدی در حالت اندرکنش توأمان پس از محاسبه ۹ مؤلفه نرخ سیال خروجی مطابق با مراحل قبل، هر یک از سه مرحله ذکر شده به صورت جداگانه برای تک‌تک بلوک‌ها با ابعاد مختلف انجام می‌گیرد. ماتریس نفوذپذیری نهایی برای

بلوک با ابعاد ۱۴ متر، با در دست داشتن مقادیر اختلاف فشار منفذی در راستاهای x ، y و z که هر سه برابر با ۱ مگاپاسکال می‌باشند و همچنین ماتریس سه در سه مقادیر نرخ سیال خروجی، می‌توان طبق رابطه ۳-۱۷ ماتریس نفوذپذیری نهایی را بدست آورد. لازم به ذکر است که نرخ جریان‌های خروجی بدست آمده در مراحل قبل نرخ کل (متر مکعب بر ثانیه) است و قبل از جایگذاری در رابطه داری باید هر یک بر سطح مقطع بلوک متناظر تقسیم گردد تا نرخ خروجی متوسط (متر بر ثانیه) بدست آید. رابطه‌ی ۵-۲ ماتریس نفوذپذیری نهایی برای بلوک با ابعاد ۱۴ متر را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.47e-8 & 1.28e-9 & -2.15e-9 \\ 2.42e-9 & 1.33e-8 & 1.54e-9 \\ 1.87e-8 & 6.18e-9 & 2.37e-8 \end{bmatrix} \left(\frac{m}{s}\right) \quad \text{رابطه ۵-۲}$$

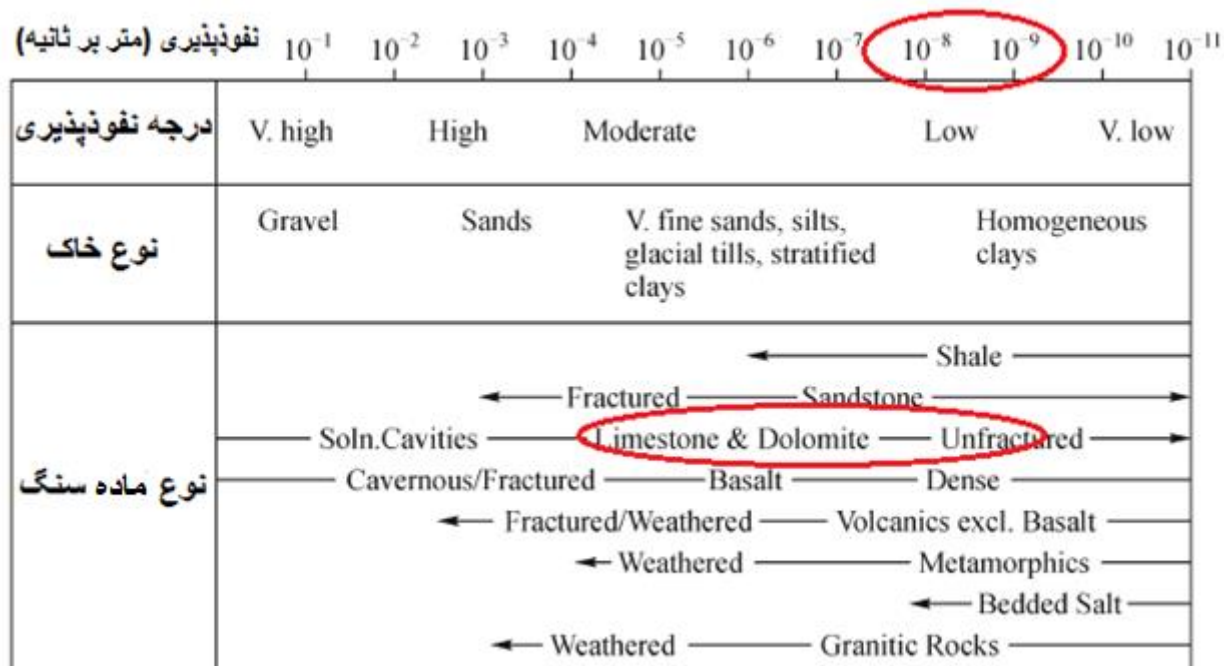
۵-۴-۳-۵- مقایسه مقادیر نفوذپذیری در حالت اندرکنش توأمان و غیر توأمان

کلیه محاسبات صورت گرفته در این مطالعه (فشار منفذی ۱ مگاپاسکال) در حالت اندرکنش توأمان می‌باشد، لذا به منظور درک بهتر تفاوت مقادیر تخمین زده شده در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان، در رابطه ۵-۳، ماتریس نفوذپذیری سه‌بعدی در حالت غیر توأمان (هیدرولیکی محض) ارائه شده است:

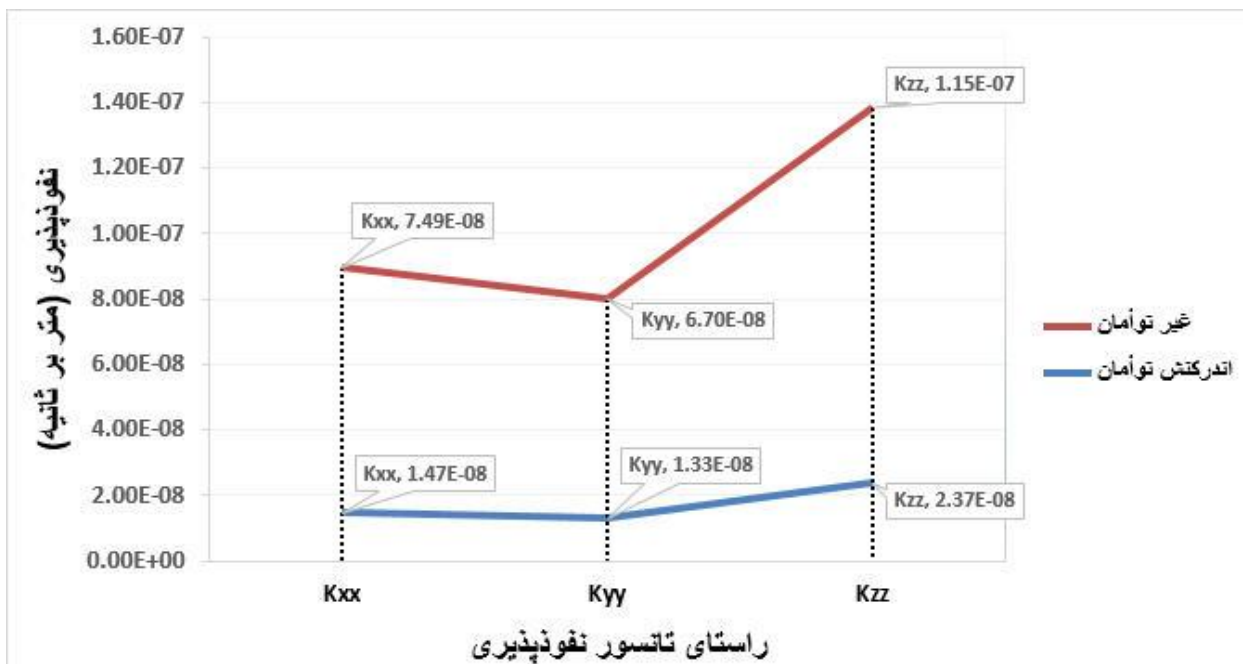
$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.49e-8 & 6.31e-9 & -1.02e-8 \\ 1.19e-8 & 6.7e-8 & 7.71e-9 \\ 8.73e-8 & 2.97e-8 & 1.15e-7 \end{bmatrix} \left(\frac{m}{s}\right) \quad \text{رابطه ۵-۳}$$

همان‌طور که از مقادیر رابطه ۵-۳ پیداست، در حالت تحلیل غیرتوأمان، مقادیر نفوذپذیری به‌طور محسوسی افزایش می‌یابند. دلیل افزایش مقادیر نفوذپذیری در حالت غیرتوأمان، عدم درنظر گرفتن تنش و وزن روباره و در نتیجه عدم کاهش بازشدگی ناپیوستگی‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از

روابط ۲-۵ و ۳-۵، مقادیر نفوذپذیری در حالت غیرتوآمان به‌طور میانگین ۵ برابر بیشتر از حالت اندرکنش توآمان هیدرومکانیکی می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی مقادیر نفوذپذیری سه‌بعدی تخمین زده شده در حالت اندرکنش توآمان (رابطه ۲-۵)، به مقایسه مقادیر تیپیک نفوذپذیری توده‌سنگ‌های مختلف در شکل ۱۰-۵ پرداخته شده است. همان‌طور که از مقادیر شکل ۱۰-۵ پیداست، مقادیر محاسبه شده با مقادیر ارائه شده در شکل ۱۰-۵، هم‌خوانی و تطابق قابل قبولی دارد. نمودار مقایسه مقادیر اصلی ماتریس نفوذپذیری در دو حالت اندرکنش توآمان و غیرتوآمان در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۵ مقادیر تیپیک نفوذپذیری ماده‌سنگ و خاک‌های مختلف [۵۲]



شکل ۵-۱۱- نمودار مقایسه مقادیر اصلی نفوذپذیری در حالت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان

۵-۴-۴- محاسبه و ترسیم بردارهای نفوذپذیری اصلی توسط نرم افزار MATLAB

پس از محاسبه ماتریس نفوذپذیری هر یک از این بلوک‌ها، به منظور محاسبه بردارهای حداقل، متوسط و حداکثر نفوذپذیری، با استفاده از روابط ۴-۵ تا ۶-۵، این مقادیر و بردارها بدست آمده است.

[۵۳].

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۴-۵}$$

$$I_1 = K_x + K_y + K_z$$

$$I_2 = K_x K_y + K_y K_z + K_z K_x - K_{xy}^2 - K_{yz}^2 - K_{zx}^2 \quad \text{رابطه ۵-۵}$$

$$I_3 = K_x K_y K_z + 2K_{xy} K_{yz} K_{zx} - K_x K_{yz}^2 - K_y K_{zx}^2 - K_z K_{xy}^2$$

$$K^3 - I_1 K^2 + I_2 K - I_3 = 0 \quad \text{رابطه ۶-۵}$$

در روابط فوق، I اینواریانتهای ماتریس بوده که پس از محاسبه و جای گذاری در رابطه ۵-۶، مقادیر برداری حداقل، متوسط و حداکثر نفوذپذیری (K) محاسبه می شود. در جدول ۵-۶ و ۵-۷ به ترتیب مقادیر اینواریانتهای بردارهای حداقل، متوسط و حداکثر محاسبه شده به روش مذکور برای بلوکی با ابعاد ۱۴ متر که مقادیر ماتریس نفوذپذیری آن در رابطه ۵-۲ آورده شده، محاسبه و نشان داده شده است.

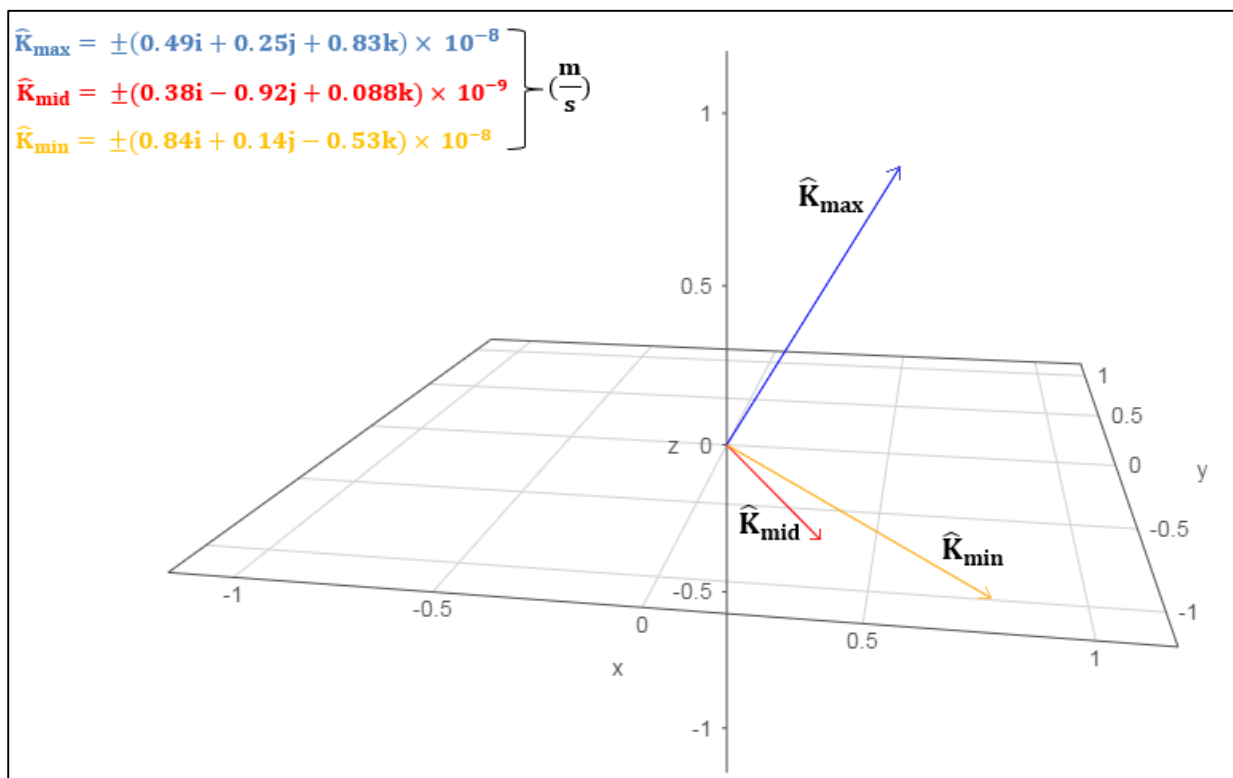
جدول ۵-۶- مقادیر اینواریانتهای اول تا سوم ماتریس نفوذپذیری بلوک ۱۴ متری

I_1	I_2	I_3
$5/17 \times 10^{-8}$	$7/72 \times 10^{-16}$	$3/54 \times 10^{-24}$

جدول ۵-۷- مقادیر برداری حداقل، متوسط و حداکثر نفوذپذیری سه بعدی بلوک ۱۴ متری

K_{max} (متر بر ثانیه)	K_{min} (متر بر ثانیه)	K_{mid} (متر بر ثانیه)
$2/98 \times 10^{-8}$	$9/79 \times 10^{-9}$	$1/22 \times 10^{-8}$

در گام بعد برای رسم این بردارها در فضای سه بعدی با استفاده از روابط مربوطه، جهت بردارهای نفوذپذیری حداقل، متوسط و حداکثر محاسبه شده و در انتها با استفاده از نرم افزار متلب^۱ در فضای سه بعدی ترسیم شده است (شکل ۵-۱۲).

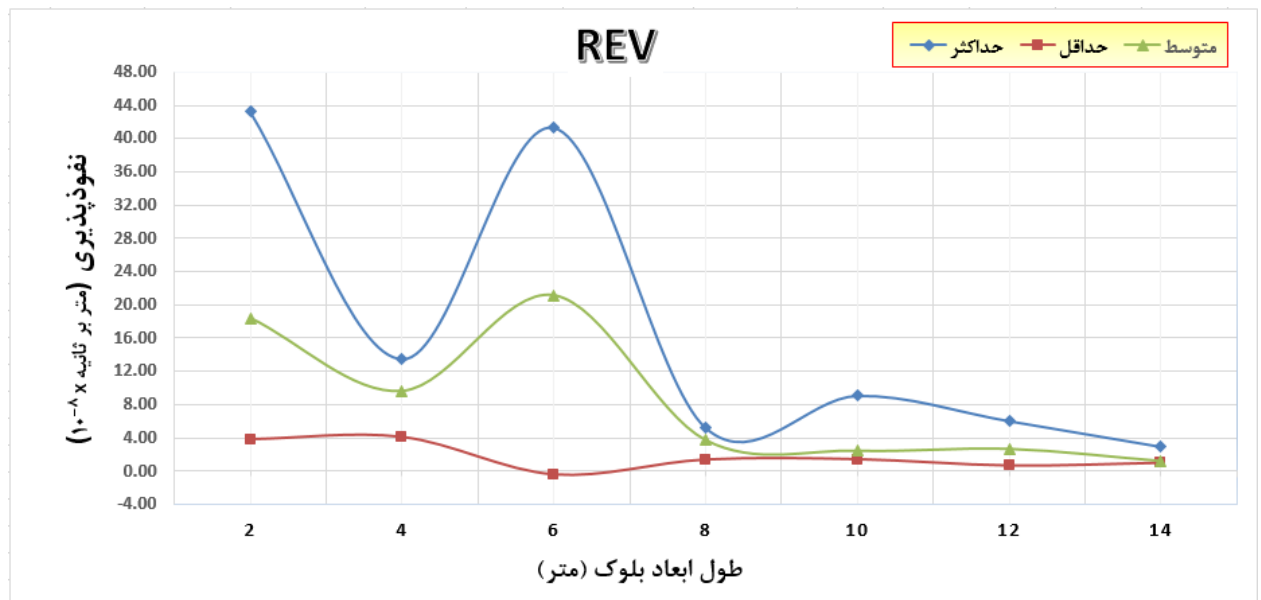


شکل ۵-۱۲ نمودار سه بعدی بردارهای اصلی نفوذپذیری توده سنگ در ابعاد ۱۴ متر

۵-۴-۵- تخمین المان حجم معرف پایه REV توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴

همان گونه که در مباحث گذشته بحث شد، به منظور کالیبره نمودن مدل عددی و تعیین حداقل ابعاد بلوک درزه دار به منظور پیاده سازی و تحلیل های هیدرومکانیکی، مقادیر نفوذپذیری بلوک ها از ابعاد کوچک تا بزرگ به صورت جداگانه محاسبه شده و بردارهای نفوذپذیری حداقل، متوسط و حداکثر هر یک از مدل ها توسط

نرم افزار اکسل ترسیم شده و این روند تا جایی ادامه خواهد یافت که پس از آن با افزایش ابعاد بلوک درزه دار، تغییر محسوسی در کاهش یا افزایش مقادیر نفوذپذیری رخ ندهد. بلوک مذکور با ابعاد مربوطه را به عنوان مدل کالیبره شده و نفوذپذیری متناظر به عنوان المان حجم معرف پایه ساختگاه معرفی می گردد. در این مطالعه بلوک هایی با سیستم درزه داری DFN و با ابعاد (طول هر ضلع) ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر ساخته و تحت شرایط هیدرولیکی مرزی که در مباحث پیشین به تفصیل توضیح داده شد، قرار گرفته است. در گام بعد مطابق مطالب و محاسبات آورده شده در بخش ۵-۳-۶، اینواریانت ها و مقادیر بردارهای حداقل، متوسط و حداکثر نفوذپذیری هر یک از بلوک ها (ابعاد کوچک تا بزرگ)، محاسبه شده و در نهایت نمودار مربوطه توسط نرم افزار اکسل ترسیم می شود. مقادیر محاسبه شده توسط نمودار المان حجم معرف پایه در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر و روند تغییرات بردارهای اصلی نفوذپذیری با افزایش ابعاد بلوک ها، نهایتاً در بلوکی با ابعاد $14 \times 14 \times 14$ (متر مکعب) نرخ تغییرات نفوذپذیری به حد ثابتی میل نموده است که این ابعاد به عنوان المان حجم معرف پایه در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۱۳- نمودار المان حجم معرف پایه REV ساختگاه سد کارون ۴

۵-۴-۶- تخمین نفوذپذیری توسط تست لوژن

به منظور اعتبارسنجی مقادیر نفوذپذیری بدست آمده توسط مدل عددی، مقادیر نفوذپذیری بدست آمده توسط تست لوژن در ساختگاه سد کارون ۴ با روش عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. آزمایش لوژن جهت برآورد نفوذپذیری توده سنگ به صورت برجای انجام می شود و به دو روش پکر منفرد و پکر مضاعف وجود دارد. در روش پکر منفرد انتهای گمانه آب بند شده و عملیات تزریق سیال در حدفصل محدوده ی بسته شده و انتهای گمانه انجام می شود. در روش پکر مضاعف مقطعی از گمانه در فاصله ی بین دو عدد پکر محصور شده تست می شود. در این روش نفوذپذیری دیواره ی گمانه در محدوده ی بسته شده، محاسبه می گردد. این آزمایش در ۵ تا ۷ پله ی فشار انجام می شود، بدین صورت که ابتدا از فشارهای کم آزمایش انجام شده و در پله ی سوم به فشار بیشینه رسیده و مجدداً فشار کاهش می یابد. جهت تخمین عدد لوژن می بایست نمودار ستونی اعداد لوژن محاسبه شده را ترسیم نمود و با نمودارهای استاندارد مقایسه کرد. به منظور محاسبه عدد لوژن متناظر با هر پله فشار از رابطه ۵-۷ استفاده می شود [۵۴].

$$Lu = \frac{10Q}{L \cdot P} \quad \text{رابطه ۵-۷-}$$

که در این رابطه P فشار بر حسب اتمسفر، Q نرخ آب نفوذ کرده بر حسب لیتر بر دقیقه و L طول محدوده ی گمانه تحت آزمایش بر حسب متر می باشد. ضریب نفوذپذیری K توده سنگ توسط رابطه ۵-۸ قابل محاسبه است [۵۵].

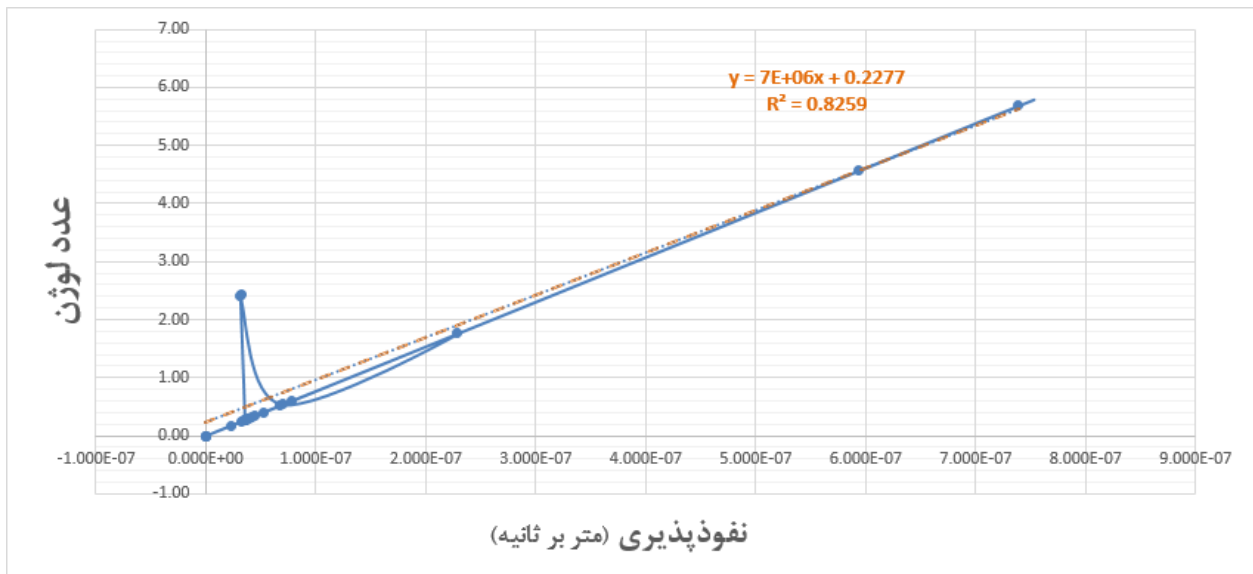
$$K = \frac{q}{2\pi LH} \ln \left(\frac{L}{r} \right) \quad \text{رابطه ۵-۸-}$$

در رابطه ۵-۸، q مقدار آب نفوذ کرده (مترمکعب)، L طول محدوده گمانه تحت آزمایش (متر)، r شعاع گمانه

عدد لوژن LU	نفوذپذیری K (متر بر ثانیه)	عمق تست (متر)	محل گمانه
0.17	2.240E-08	4 - 9	BH1
5.69	7.390E-07	9 - 14	BH1
4.57	5.940E-07	20 - 25	BH2
0.00	0.000E+00	25 - 30	BH2
0.00	0.000E+00	33 - 38	BH3
0.00	0.000E+00	55 - 60	BH3
0.29	3.800E-08	10 - 15	BH4
0.28	3.690E-08	15 - 20	BH4
0.32	4.160E-08	35 - 40	BH4
0.40	5.180E-08	21 - 26	BH5
0.35	4.490E-08	36 - 41	BH5
0.00	0.000E+00	51 - 56	BH5
0.60	7.790E-08	23 - 28	BH6
0.52	6.730E-08	28 - 33	BH6
0.30	3.900E-08	38 - 43	BH6
0.25	3.250E-08	6 - 11	BH7
0.27	3.460E-08	16 - 21	BH7
1.76	2.290E-07	20 - 25	BH8
0.54	7.010E-08	25 - 30	BH8
2.42	3.140E-08	13 - 18	BH9
2.44	3.170E-08	18 - 23	BH9
0.28	3.590E-08	20 - 25	BH10
0.27	3.480E-08	25 - 30	BH10

شکل ۵-۱۴- نتایج آزمایش لوژن ساختگاه سد کارون ۴ [۳۹]

آزمایش (متر)، اختلاف هد آب (متر) که برابر است با $H = H_w + H_g + H_p$ که H_w سطح تراز آب زیرزمینی (متر)، H_g ارتفاع گیج^۱ آزمایش (متر) و H_p فشار اعمالی درون گمانه در آزمایش می‌باشد. نتایج نهایی آزمایش لوژن در ساختگاه سد کارون ۴ در شکل ۵-۱۴ آورده شده و نمودار نفوذپذیری- عدد لوژن مربوطه در شکل ۵-۱۵ ترسیم شده است. همان‌طور که از جدول آزمایش لوژن در شکل ۵-۱۴ مشخص است، مقدار میانگین نفوذپذیری در کل گمانه‌ها $9/8 \times 10^{-8}$ متر بر ثانیه می‌باشد که نشان دهنده‌ی صحت و اعتبار مقادیر نفوذپذیری بدست آمده در مدل عددی می‌باشد.



شکل ۵-۱۵- نمودار نفوذپذیری - عدد لوژن متناظر با نتایج نهایی تست لوژن ساختگاه سد کارون ۴

۵-۵- جمع‌بندی

در فصلی که گذشت، به مدل‌سازی عددی توده‌سنگ ساختگاه سد کارون ۴ توسط نرم‌افزار المان ناپیوسته ی 3DEC پرداخته شده و پس از ساخت شبکه شکستگی‌های ناپیوسته (DFN) ساختگاه مذکور بر اساس داده‌های بدست آمده از فصل چهارم، وضعیت نفوذپذیری توده‌سنگ ساختگاه به‌منظور تخمین المان حجم معرف پایه (REV) تحت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان تحلیل و مدل‌سازی شده است. همچنین مقادیر نفوذپذیری بدست آمده توسط مدل عددی با مقادیر برجا توسط تست لوژن مقایسه و اعتبارسنجی شده است. پس از تعیین REV، مدل نهایی توده‌سنگ میزبان کالیبره شده است که در فصل ششم جهت حفاری و تعیین نرخ آب ورودی و فشارمغذی به مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

فصل ششم

مدل سازی توانان مغار ذخیره سازی نفت خام

۶-۱- مقدمه

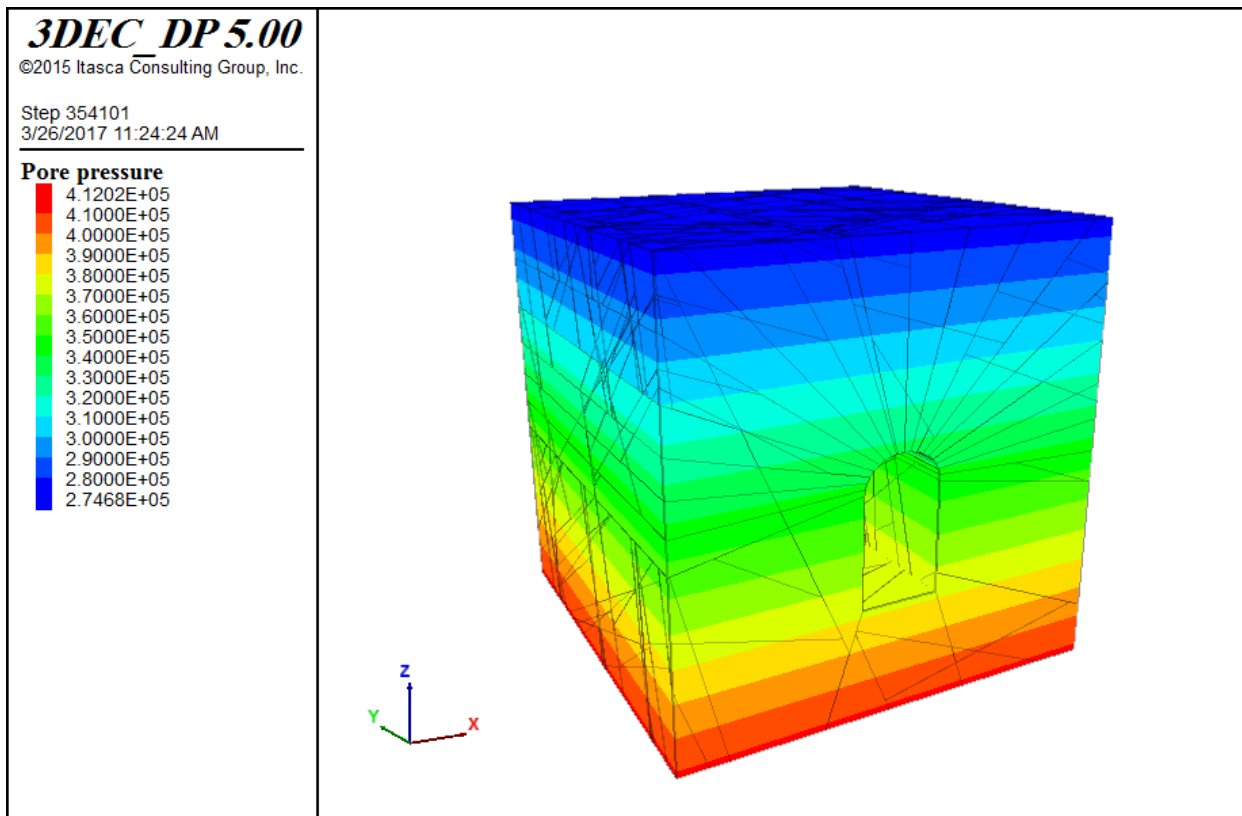
نرخ آب ورودی به داخل مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام از مهم‌ترین پارامترها جهت کنترل سیستم حصار هیدرولیکی می‌باشد. در این راستا به منظور ارزیابی وضعیت آب‌گذری و تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار در مدل عددی و همچنین محاسبه فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار از زبان برنامه‌نویسی FISH در نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. بدین منظور درزه‌های موجود در مدل عددی فیلتر شده و تنها درزه‌هایی که با مرز مغار تقاطع دارند مدنظر قرار داده شده‌اند. ابتدا به اشباع مدل توسط سفره آب زیرزمینی پرداخته شده و در گام بعد مغار در ۵ مرحله حفاری شده و به تعادل رسیده است. سپس فشار منفذی درون درزه‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره زیرزمینی و سیستم پرده آب محاسبه شده است. پس از تعیین فشار مناسب جهت ذخیره‌سازی حجم معینی از محصول در مغار، نرخ آب ورودی به درون مغار در حالت‌های مختلف بررسی شده است.

۶-۲- ایجاد سفره آب زیرزمینی و اشباع مدل

در اولین مدل با قرارگیری در عمق ۵۰ متری و سفره‌ی آب زیرزمینی در متر ۳۵ متری بالای تاج مغار (این مقادیر مطابق با نمونه‌های متداول در دنیا می‌باشد) مدل‌سازی صورت گرفته است. و بلوک (قبل از حفاری مغار) تحت اندرکنش هیدرومکانیکی تحت تنش‌های برجای اولیه، به تعادل رسیده است. شکل ۶-۱ فشار منفذی در کل مدل را پس از حفاری و تعادل کامل مدل بر اساس هد فشار نشان می‌دهد.

۶-۳- حفاری مغار درون بلوک درزه‌دار کالیبره شده

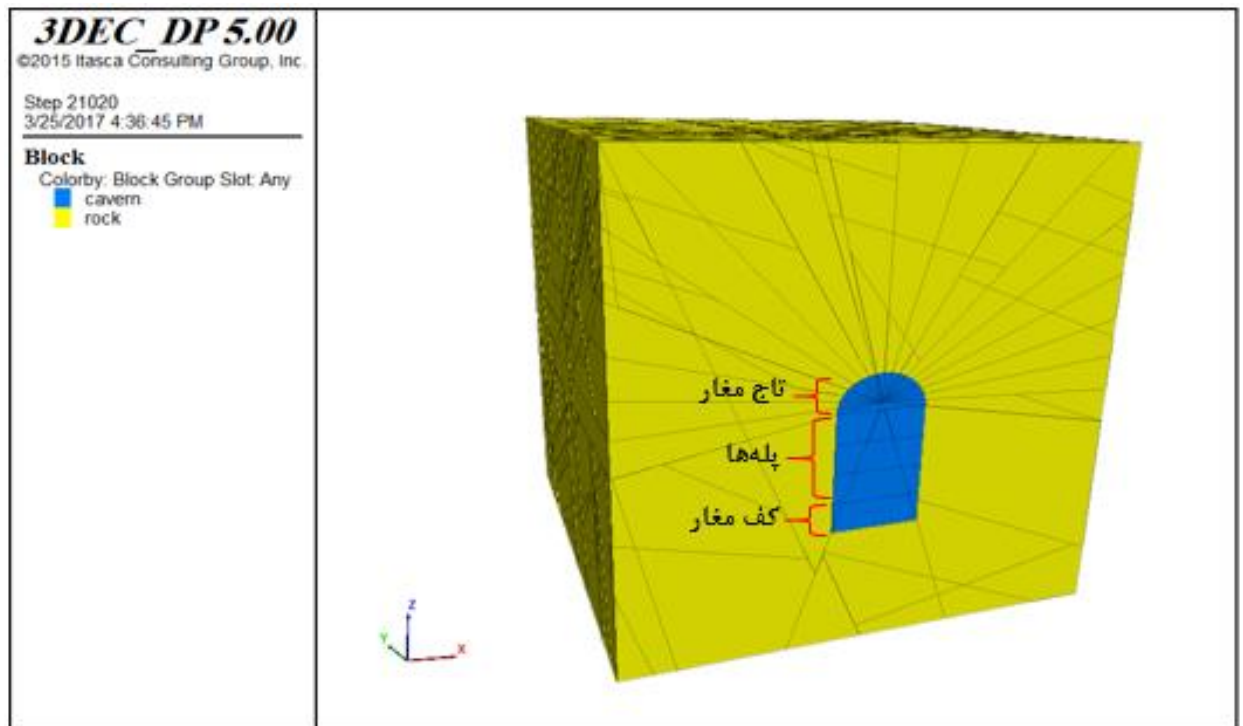
همان‌طور که در فصل ۵ بحث شد، پس از تخمین حداقل ابعاد بلوک در توده‌سنگ درزه‌دار ساختگاه مذکور بر اساس المان حجم معرف پایه، می‌توان مدل عددی ساخته شده را کالیبره نمود. در این مطالعه ابعاد مغار بر اساس نمونه‌های متداول در دنیا انتخاب شده که دارای ۳۰ متر ارتفاع، ۱۸ متر عرض و ۵۰ متر ارتفاع بوده و به دلیل عدم



شکل ۶-۱- فشار منفذی سیال بر اساس هد ناشی از سفره آب زیرزمینی

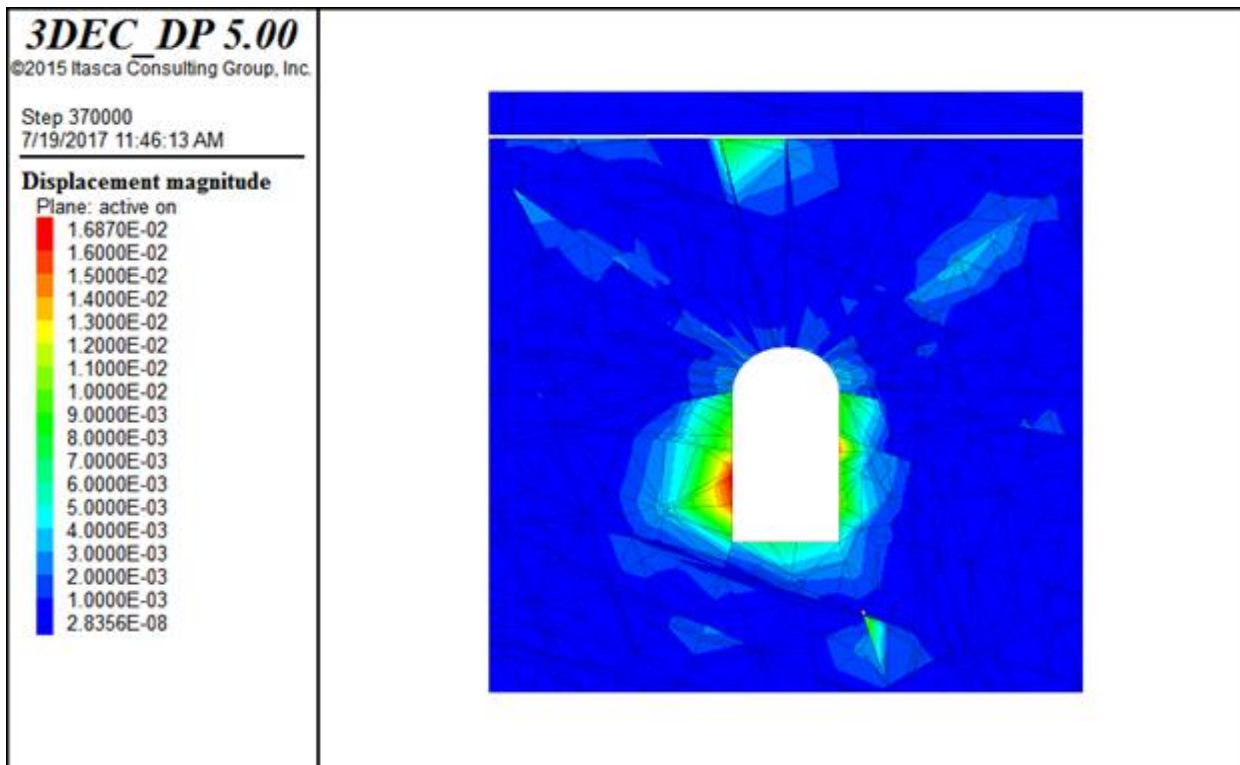
امکان مش‌بندی این ابعاد در این نرم‌افزار، با کاهش مقیاس مغار به ۲/۵۲ متر عرض، ۴/۵۵ متر ارتفاع و ۱۴ متر طول مدل‌سازی شده است. لذا بلوک دربرگیرنده‌ی مغار در مدل عددی، دارای ابعاد یکسان ۱۴ متر (هر یک از اضلاع) می‌باشد. تاج مغار به صورت قوسی شکل بوده و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فیش در نرم‌افزار 3DEC ساخته شده است. عمق قرارگیری مغار در سه حالت مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متر زیرزمین مدل‌سازی و تحلیل شده است. مغار در ۵ مرحله به صورت گام به گام حفاری و به پایداری رسیده است. ابتدا تاج مغار و سپس به ترتیب پله‌ها و در نهایت کف مغار حفاری شده است (شکل ۶-۲). کنتورهای جابجایی و سرعت نقاط گره‌ای در هر مرحله و پس از حفاری کل مغار حاکی از آن است که مدل به پایداری رسیده و به دلیل مقادیر کم کرنش نیازی به سیستم نگهداری به منظور پایدارسازی مغار نخواهد بود (شکل ۶-۳). همان‌طور که از شکل ۶-۳ پیداست، حداکثر مقادیر جابجایی در مقطع عرضی برابر با ۱/۶۸ سانتی‌متر و در گوشه سمت راست کف مغار رخ

داده است. همان طور که از شکل ۳-۶ پیداست، در این مدل سازی هیچ گونه گوهی ناپایدار در دیواره و سقف مغار ایجاد نشده و در نتیجه نیازی به نصب بولت و سیستم نگهداری نمی باشد.

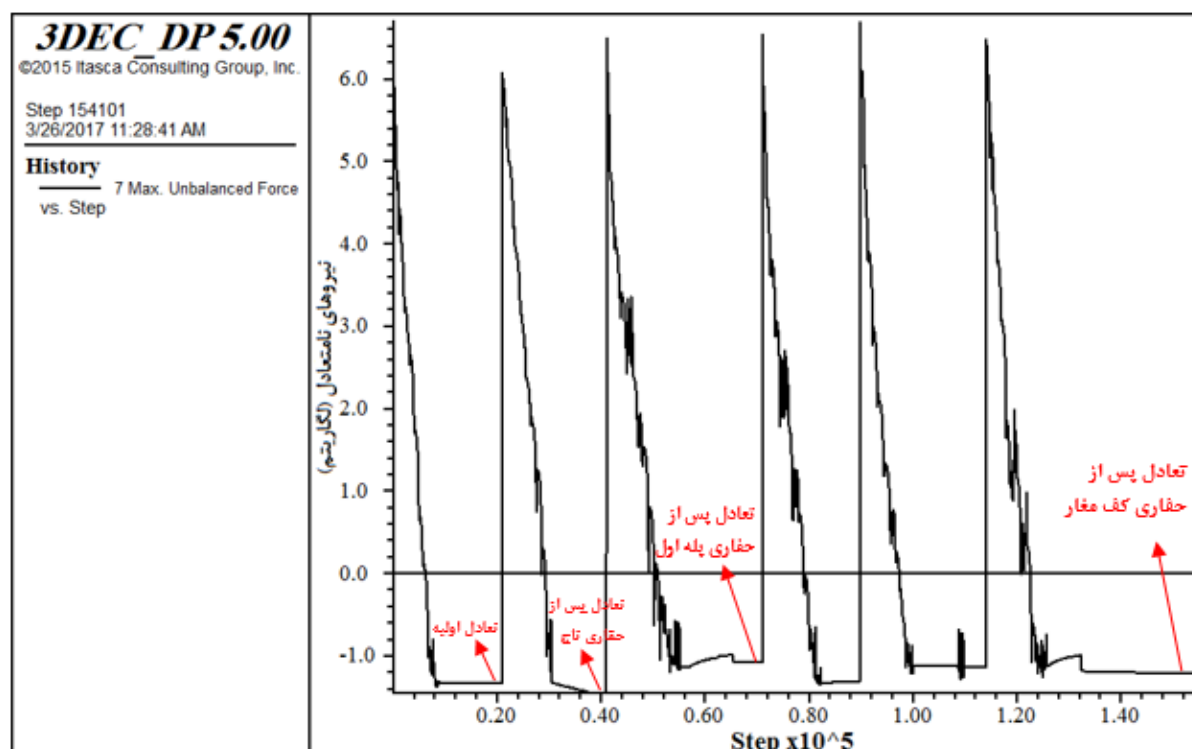


شکل ۳-۶- گام های حفاری مغار در مدل عددی

همچنین نمودار نیروهای نامتعادل قبل و پس از هر گام از حفاری در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل پیداست، مقادیر نیروهای نامتعادل پس از تعداد گام مشخصی، به حد معینی میل نموده که نشان دهنده ی تعادل کل مدل می باشد.

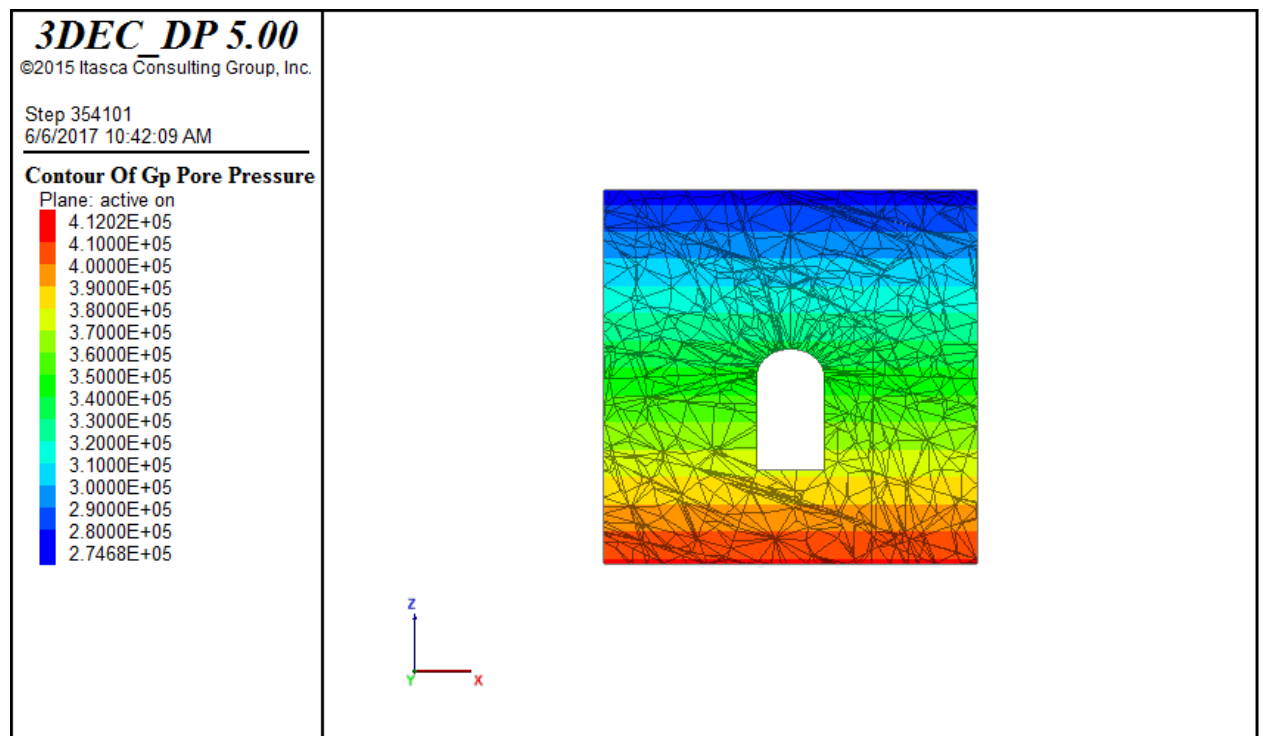


شکل ۶-۳- کنتور جابجایی در اطراف مغار پس از حفاری کامل



شکل ۶-۴- نمودار نیروهای نامتعادل پس از ۵ گام حفاری مغار

به دلیل قرارگیری مدل عددی زیر سفره آب زیرزمینی، توده سنگ درزه دار بر اساس هد فشار اشباع شده است. در نتیجه فشار آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در بالای مدل کمتر و با افزایش عمق زیاد می گردد (شکل ۵-۶).



شکل ۵-۶- فشار منفذی در توده سنگ درزه دار ناشی از هد سفره آب زیرزمینی

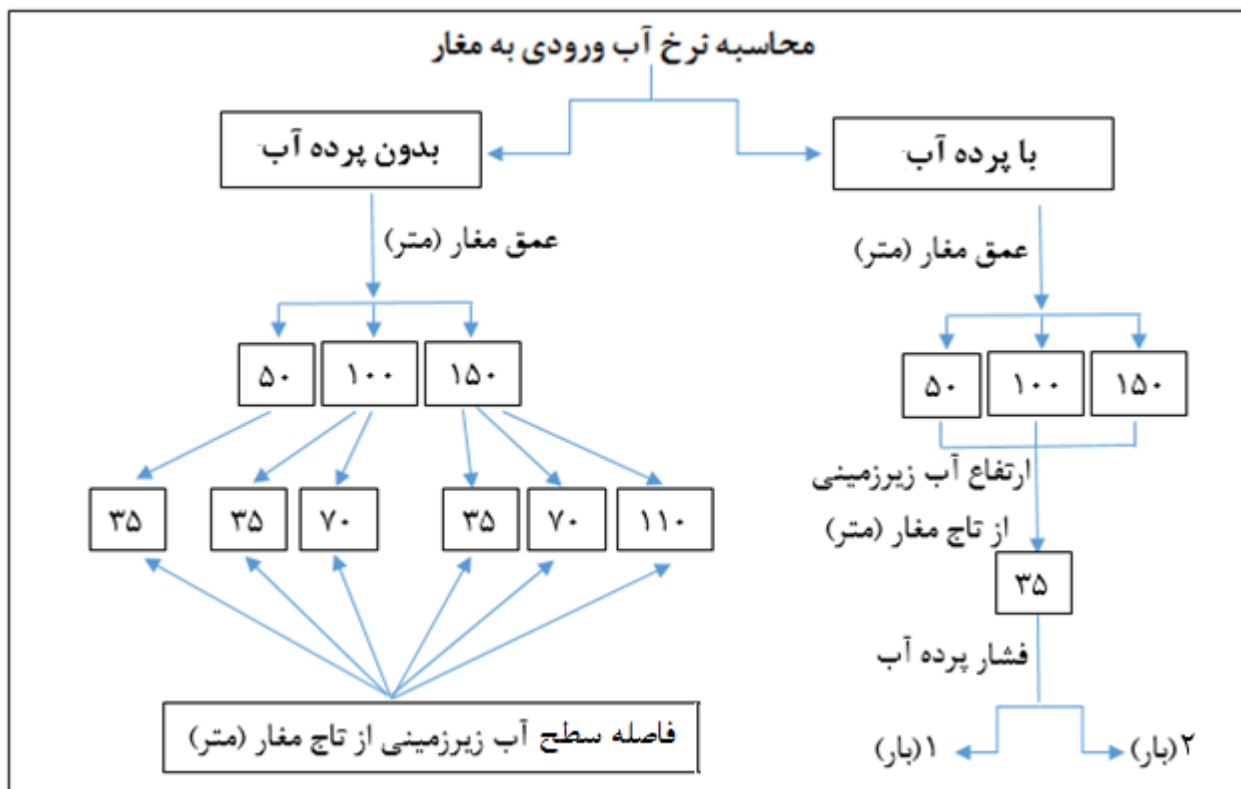
۴-۶- سناریوهای مدل سازی توأمان مغار ذخیره سازی نفت خام

هدف اصلی این مطالعه تخمین نرخ آب ورودی به درون مغارهای ذخیره سازی نفت خام و همچنین تعیین متدلوژی^۱ مناسبی جهت تخمین نرخ آب ورودی در شرایط و ساختگاههای مختلف دیگر با هدف امکان سنجی

ساخت مغارهای مذکور می باشد. بدین منظور در این فصل فشار منفذی و نرخ آب ورودی به مغار در حالت های مختلف تحلیل حساسیت شده و درجه ی تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ آب ورودی تعیین

1 -Methodology

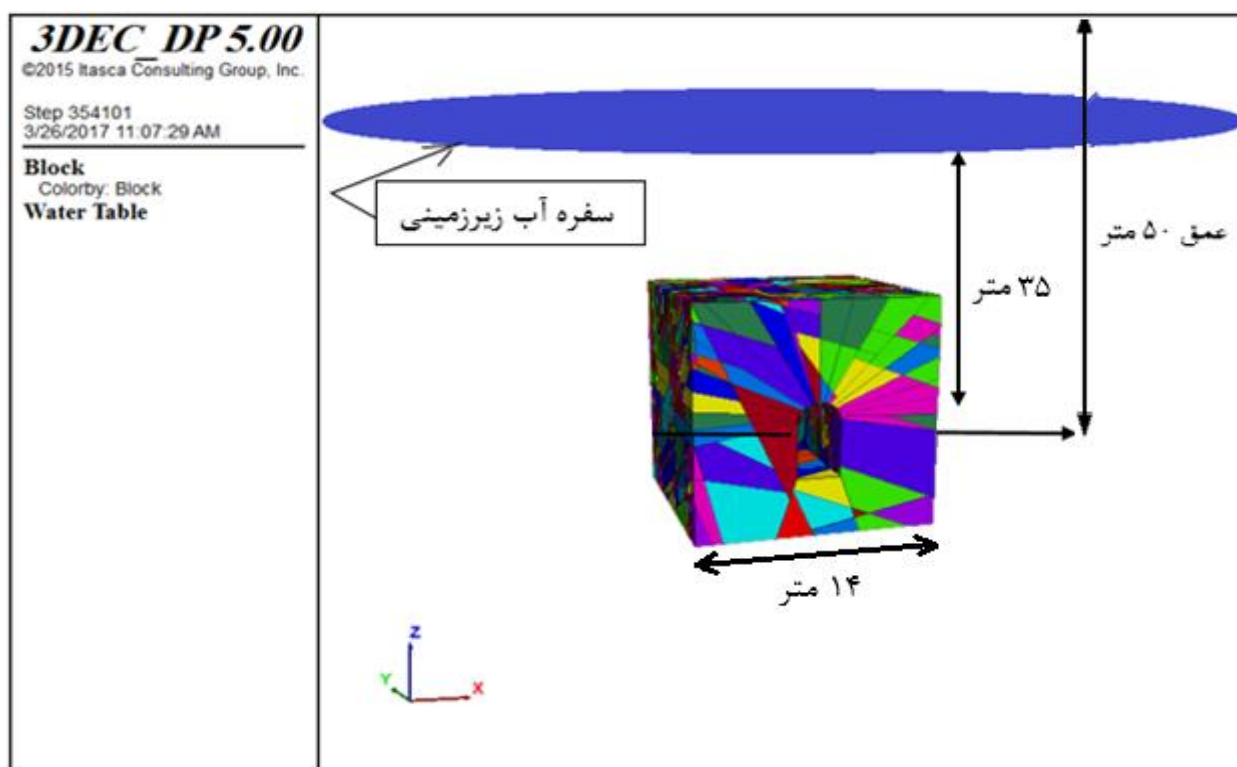
و با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۶-۶ سناریوهای مدل‌سازی عددی در این مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق نمودار درختی این سناریو، ابتدا نرخ آب ورودی به مغار در شرایط حضور آب زیرزمینی (بدون پرده آب) محاسبه شده و در مرحله دوم همین محاسبات با حضور آب زیرزمینی و پرده آب و نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم صورت می‌گیرد.



شکل ۶-۶- سناریوهای مدل‌سازی عددی

هریک از این بخش‌ها خود به چندین حالت مختلف از لحاظ عمق قرارگیری مغار، نسبت تنش افقی به قائم و همچنین فاصله‌ی گمانه‌های پرده آب از تاج مغار تقسیم و تحلیل حساسیت شده‌اند. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در این مرحله از تحلیل حساسیت ابتدا مغار در عمق ۵۰ متری زیرزمین جانمایی شده و سپس سفره آب زیرزمینی در ۳۵ متری بالای تاج مغار ایجاد می‌گردد (شکل ۶-۷) و در گام بعد مغار تحت اندرکنش هیدرومکانیک حفاری خواهد شد. وجود آب زیرزمینی سبب اشباع شدن کل مدل بر اساس عمق و گرادیان فشار شده و لذا ناپیوستگی‌های موجود تحت شرایط

اندرکنش توأمان هیدرومکانیکی دچار تغییر در بازشدگی و آب‌گذری خواهند شد. در این شرایط می‌بایست نرخ آب ورودی به درون مغار و فشار منفذی محاسبه گردد که بدین منظور تنها درزه‌هایی که با دیواره‌ی مغار تقاطع دارند مدنظر قرار گرفته‌اند. نرخ کل آب ورودی به داخل مغار برابر با حاصل جمع نرخ تک‌تک درزه‌هایی می‌باشد که دیواره‌ی مغار را قطع کرده‌اند. بدین منظور درزه‌هایی که با مغار تقاطع دارند شناسایی شده و مابقی درزه‌ها از چرخه محاسبه حذف می‌گردند و لذا نرخ آب ۱۴ متر ورودی به داخل مغار از درزه‌های مذکور محاسبه و با یکدیگر جمع می‌گردند. سیستم پرده‌ی آب شامل ۹ گمانه به صورت افقی و عمود بر محور طولی مغار بوده که در ارتفاع ۵/۸۸ متری بالای تاج مغار حفاری شده است. طول گمانه‌ها برابر با طول مغار بوده و مدل را به صورت کامل پوشش می‌دهند. مقادیر جدول ۶-۱ به نسبت مقیاس مغار در مدل عددی کوچک شده‌اند. ۱ مشخصات هندسی و فشار آب درون گمانه‌ها در جدول ۶-۱ آورده شده است.

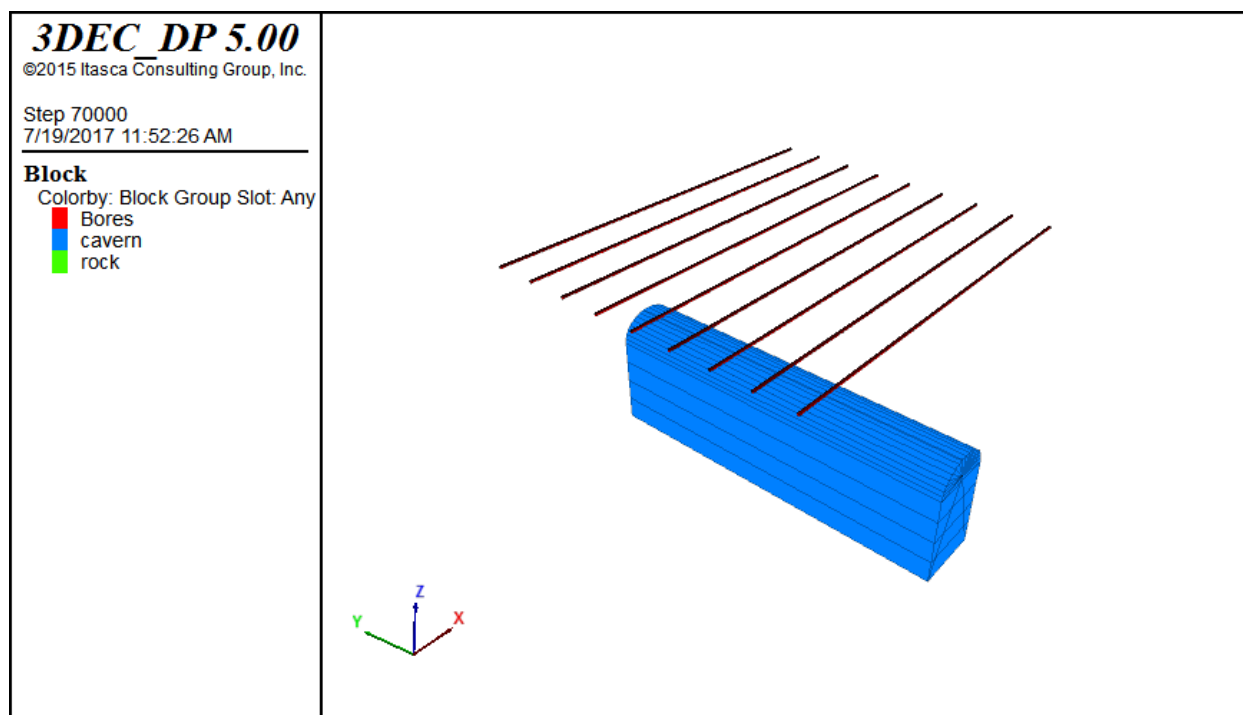


شکل ۶-۷- موقعیت سفره آب زیرزمینی نسبت به مغار و عمق قرارگیری در مدل عددی

جدول ۶-۱- مشخصات گمانه‌های پرده آب

طول (متر)	قطر (سانتی‌متر)	ارتفاع از تاج مغار (متر)	فاصله بین گمانه‌ها (متر)	فشار آب (بار)
۱۴	۱۰	۵/۸۸	۱/۴	۱ و ۲

در شکل ۶-۸ سیستم پرده آب و مغار در مدل عددی نشان داده شده است. در این شکل گمانه‌های رنگ‌های سبز، آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده‌ی گمانه‌های پرده‌ی آب، مغار و تونل پرده‌ی آب می‌باشند.



شکل ۶-۸- مغار و گمانه‌های پرده آب در مدل عددی

۶-۴-۱- تخمین فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار

متناسب با چگالی و حجم نفت خام ذخیره‌سازی شده درون مغار به دیواره و کف مغار فشار وارد می‌شود. این فشار سبب خروج محصول از درزه‌های متقاطع با مرز مغار شده و لذا می‌بایست فشار منفذی آب ناشی از سفره زیرزمینی و یا پرده آب بیشتر از فشار محصول درون مغار باشد تا از هدر

رفتن محصول جلوگیری گردد. با فرض اینکه ۴ متر از ارتفاع مغار (ارتفاع مغار در مدل عددی ۴/۵۵ متر) را توسط نفت خام با چگالی متوسط ۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب پر نمائیم با استفاده از رابطه ۶-۱، فشار وارد از طرف نفت (بدون در نظر گرفتن فشار گاز) به کف مغار برابر است با:

$$P = \rho gh = 900 \cdot 9.81 \cdot 23 \cong 3.5e4 \text{ Pascal} \quad \text{رابطه ۶-۱}$$

با توجه به رابطه ۶-۱، حداکثر فشار وارده به کف مغار در حالتی که ۴ متر از ارتفاع مغار مدل عددی با ابعاد ۲/۵۲، ۴/۵۵ و ۱۴ به ترتیب عرض، ارتفاع و طول (در مدل عددی) توسط نفت خام پر گردد، حدود ۰/۰۳۵ مگاپاسکال می باشد. با توجه به نتایج تحلیل های انجام شده در مدل عددی، مقادیر فشار منفذی درون ناپیوستگی های متقاطع با مرز مغار در جداول ۶-۲ تا ۶-۷ ارائه شده است. جداول ۶-۲ تا ۶-۴ مقادیر فشار منفذی ناشی از سفره آب زیرزمینی و بدون پرده آب نشان داده و جداول ۶-۵ تا ۶-۷ مقادیر فشار منفذی را در حالت حضور سیستم پرده آب و در سه حالت مختلف نسبت تنش افقی به قائم (K) را نشان می دهد.

جدول ۶-۲- فشار منفذی درون ناپیوستگی های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 1/5$ (بدون پرده آب)

۱۱۰ (متر)	۷۰ (متر)	۳۵ (متر)	ارتفاع سفره آب زیرزمینی از
			تاج مغار عمق مغار
		$6/88 \times 10^3$ (پاسکال)	۵۰ (متر)
	$6/77 \times 10^3$ (پاسکال)	$3/35 \times 10^3$ (پاسکال)	۱۰۰ (متر)
$3/88 \times 10^3$ (پاسکال)	$2/34 \times 10^3$ (پاسکال)	$1/29 \times 10^3$ (پاسکال)	۱۵۰ (متر)

جدول ۳-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 2$ (بدون پرده آب)

ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج مغار عمق مغار	۳۵ (متر)	۷۰ (متر)	۱۱۰ (متر)
۵۰ (متر)	$7/11 \times 10^3$ (پاسکال)		
۱۰۰ (متر)	$3/51 \times 10^3$ (پاسکال)	$6/89 \times 10^3$ (پاسکال)	
۱۵۰ (متر)	$1/43 \times 10^3$ (پاسکال)	$2/56 \times 10^3$ (پاسکال)	$4/78 \times 10^3$ (پاسکال)

جدول ۴-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره آب، $K = 2/5$ (بدون پرده آب)

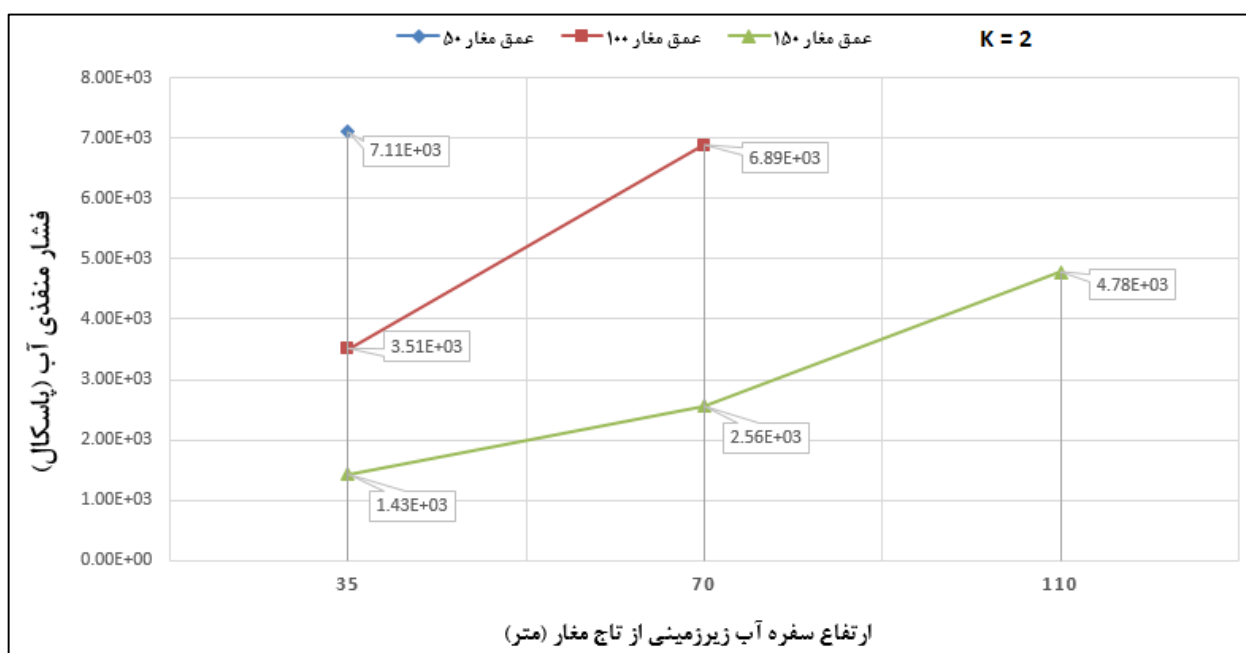
ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج مغار عمق مغار	۳۵ (متر)	۷۰ (متر)	۱۱۰ (متر)
۵۰ (متر)	$7/47 \times 10^3$ (پاسکال)		
۱۰۰ (متر)	$3/86 \times 10^3$ (پاسکال)	$7/09 \times 10^3$ (پاسکال)	
۱۵۰ (متر)	$1/61 \times 10^3$ (پاسکال)	$2/87 \times 10^3$ (پاسکال)	$5/32 \times 10^3$ (پاسکال)

همان‌طور که از مقادیر جداول ۲-۶، ۳-۶ و ۴-۶ پیداست، با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، فشار منفذی افزایش یافته که ناشی از اتساع برشی درزه‌ها می‌باشد. فشار منفذی درزه‌های متقاطع با مرز مغار (در حالت بدون سیستم پرده آب)، در حالت بدون سیستم پرده‌ی آب فشار منفذی درون ناپیوستگی‌ها کمتر از فشار وارده از طرف نفت ذخیره شده در مغار ($0/35$ مگاپاسکال) است و در

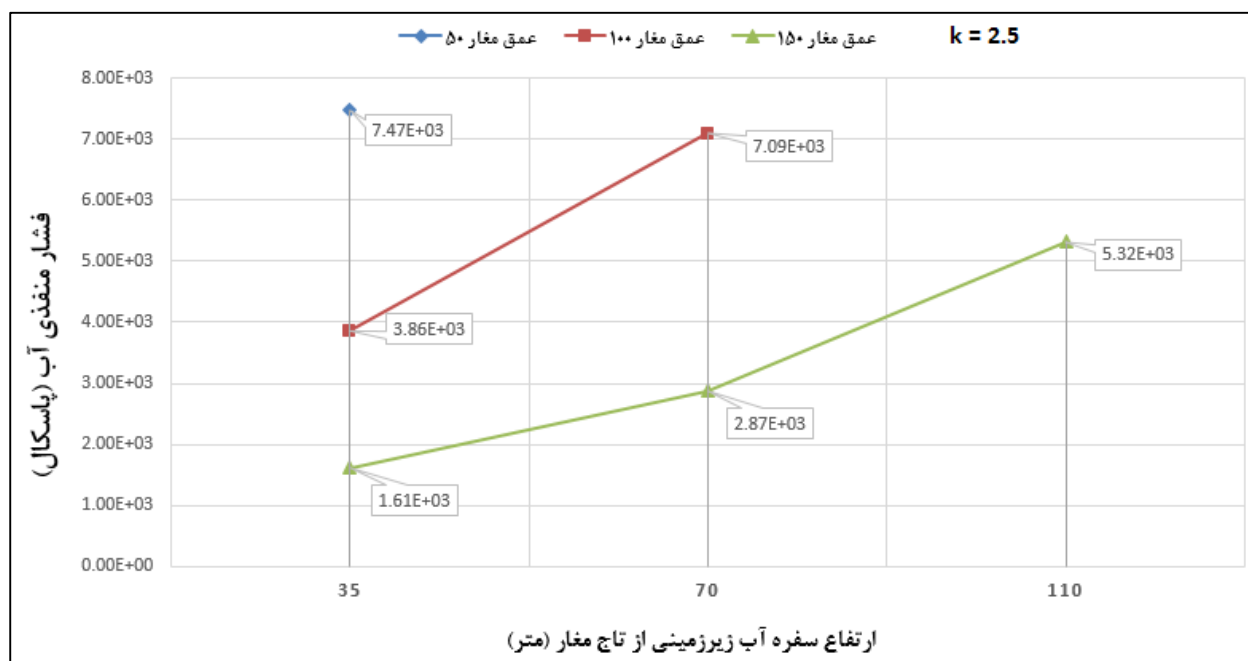
نتیجه محصول ذخیره شده از درون ناپیوستگی‌ها به خارج از مغار نشت می‌نماید. نمودارهای نتایج بدست آمده در شکل‌های ۹-۶ تا ۱۱-۶ آورده شده است.



شکل ۹-۶- نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$



شکل ۱۰-۶- نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$



شکل ۱۱-۶- نمودار فشار منفذی آب ناشی از سفره آب زیرزمینی در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$

به منظور بررسی افزایش فشار آب منفذی اطراف مغار با ایجاد سیستم پرده آب، این تحلیل حساسیت‌ها در جداول ۵-۶ تا ۷-۶ ارائه و مقایسه شده است.

جدول ۵-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب ($K = 1/5$)

۲ (بار)	۱ (بار)	فشار پرده آب
		عمق مغار
$1/71 \times 10^5$ (پاسکال)	$1/42 \times 10^5$ (پاسکال)	۵۰ (متر)
$1/13 \times 10^5$ (پاسکال)	$8/05 \times 10^4$ (پاسکال)	۱۰۰ (متر)
$4/49 \times 10^4$ (پاسکال)	$3/68 \times 10^4$ (پاسکال)	۱۵۰ (متر)

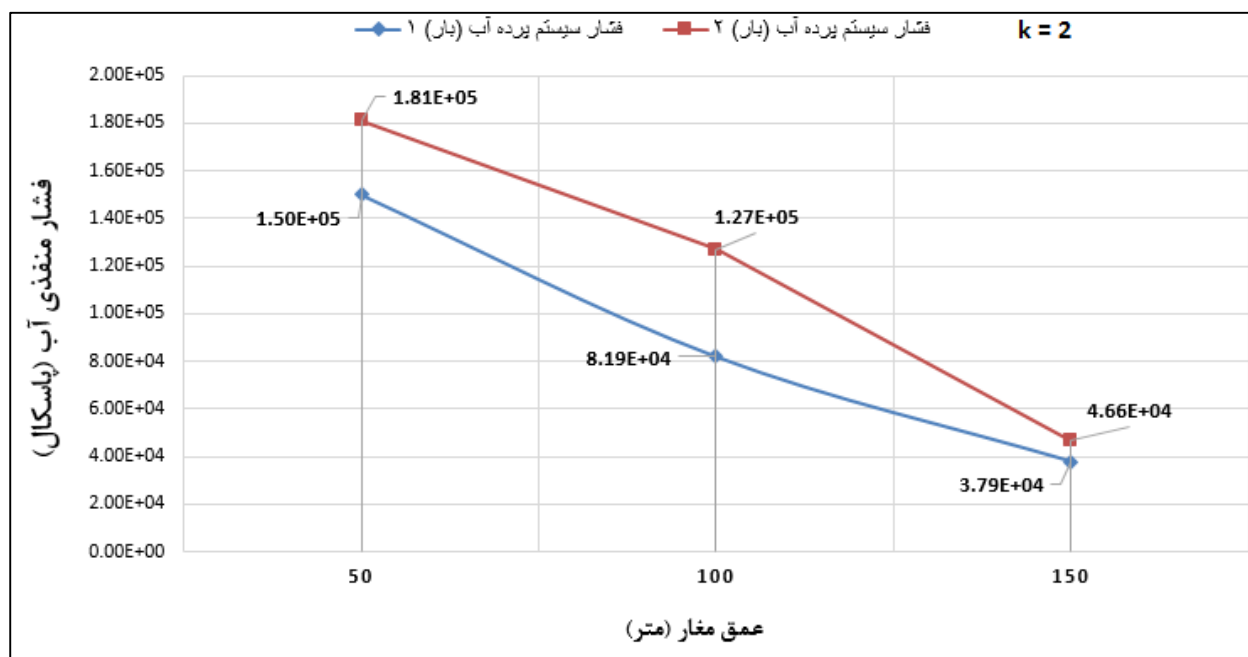
جدول ۶-۶- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب ($K = 2$)

فشار پرده آب	عمق مغار	۱ (بار)	۲ (بار)
۵۰ (متر)	$10.5 \times 1/50$ (پاسکال)	$10.5 \times 1/81$ (پاسکال)	
۱۰۰ (متر)	$10.4 \times 8/19$ (پاسکال)	$10.5 \times 1/27$ (پاسکال)	
۱۵۰ (متر)	$10.4 \times 3/79$ (پاسکال)	$10.4 \times 4/66$ (پاسکال)	

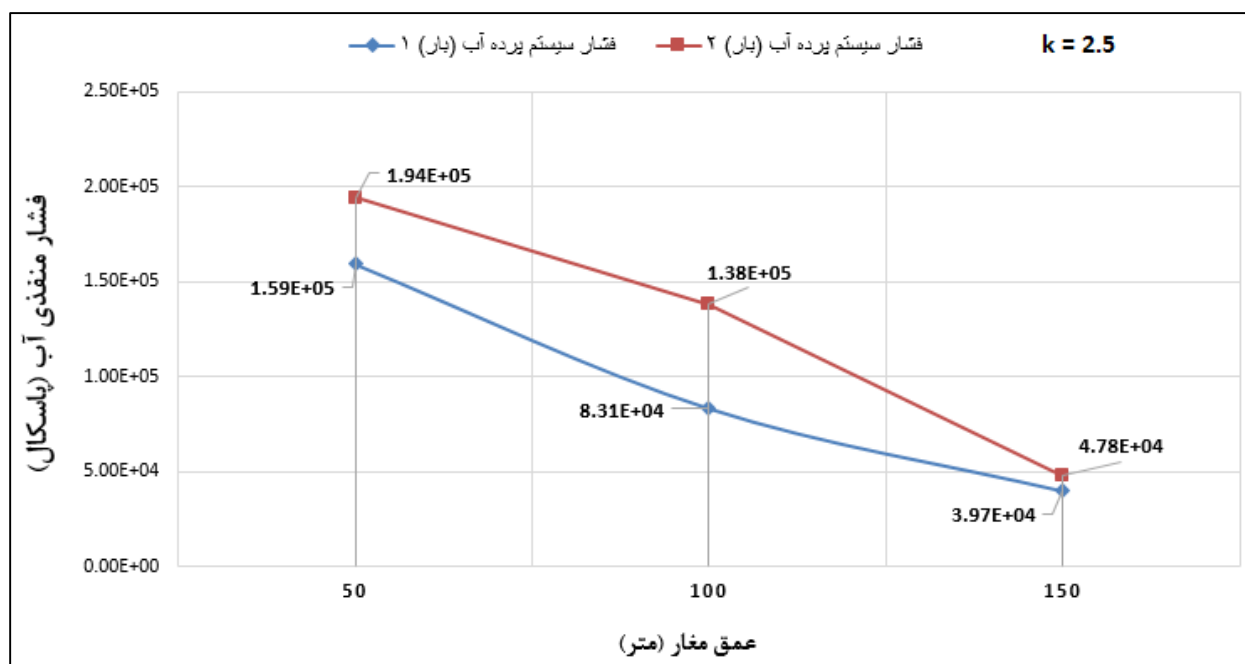
جدول ۶-۷- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سیستم پرده آب ($K = 2/5$)

فشار پرده آب	عمق مغار	۱ (بار)	۲ (بار)
۵۰ (متر)	$10.5 \times 1/59$ (پاسکال)	$10.5 \times 1/94$ (پاسکال)	
۱۰۰ (متر)	$10.4 \times 8/31$ (پاسکال)	$10.5 \times 1/38$ (پاسکال)	
۱۵۰ (متر)	$10.4 \times 3/97$ (پاسکال)	$10.4 \times 4/78$ (پاسکال)	

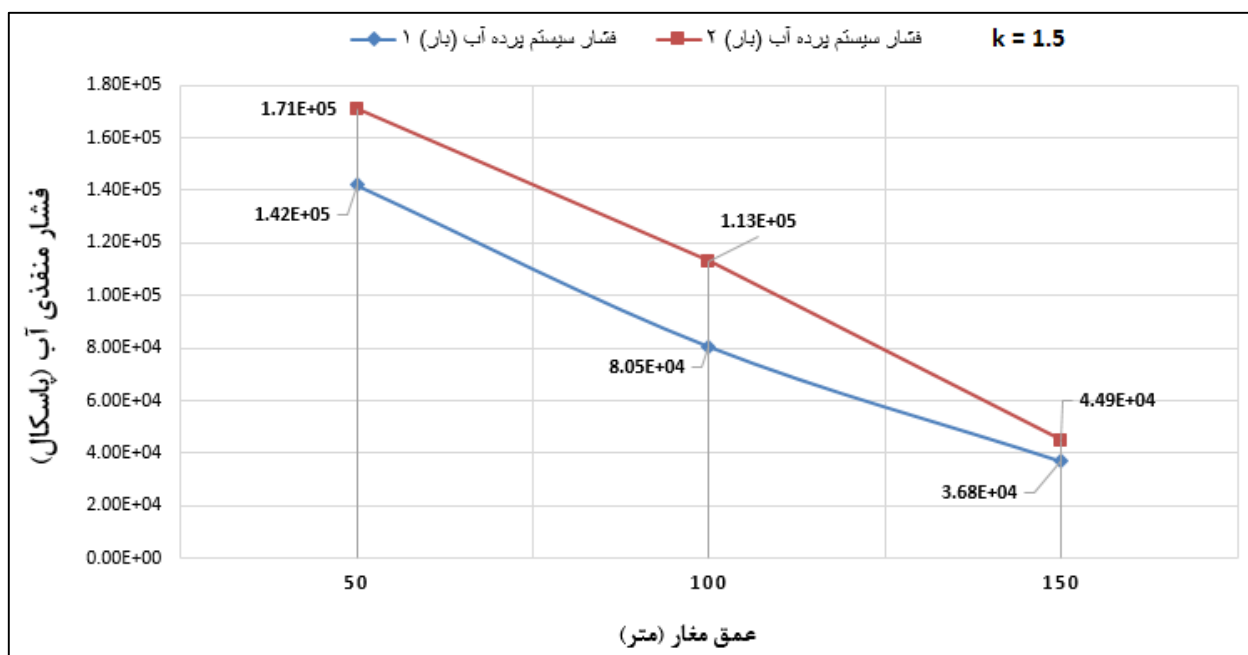
همان‌گونه که از مقادیر جداول ۶-۵، ۶-۶ و ۶-۷ پیداست، در حضور سیستم پرده آب، فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار به‌طور چشم‌گیری نسبت به حالت عدم وجود پرده آب افزایش یافته است. به علاوه با افزایش نسبت تنش افقی به قائم فشار منفذی ناپیوستگی‌ها افزایش یافته که علت آن اتساع برشی درزه‌ها است. با توجه به نتایج، فشار آب منفذی درون درزه‌ها در حضور سیستم پرده‌ی آب در تمامی عمق‌های قرارگیری مغار و در فشارهای مختلف سیستم پرده‌ی آب (۱ و ۲ بار) بیشتر از فشار نفت ذخیره شده درون مغار است و در نتیجه محصول ذخیره شده به بیرون نشت نخواهد کرد. با ایجاد سیستم پرده آب، فشار منفذی در اطراف گمانه‌ها افزایش یافته و سبب نفوذ بیشتر آب به درزه‌های متقاطع با گمانه‌های پرده آب می‌شود. نمودارهای نتایج بدست آمده در شکل‌های ۶-۱۲ تا ۶-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۲- نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ی آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$

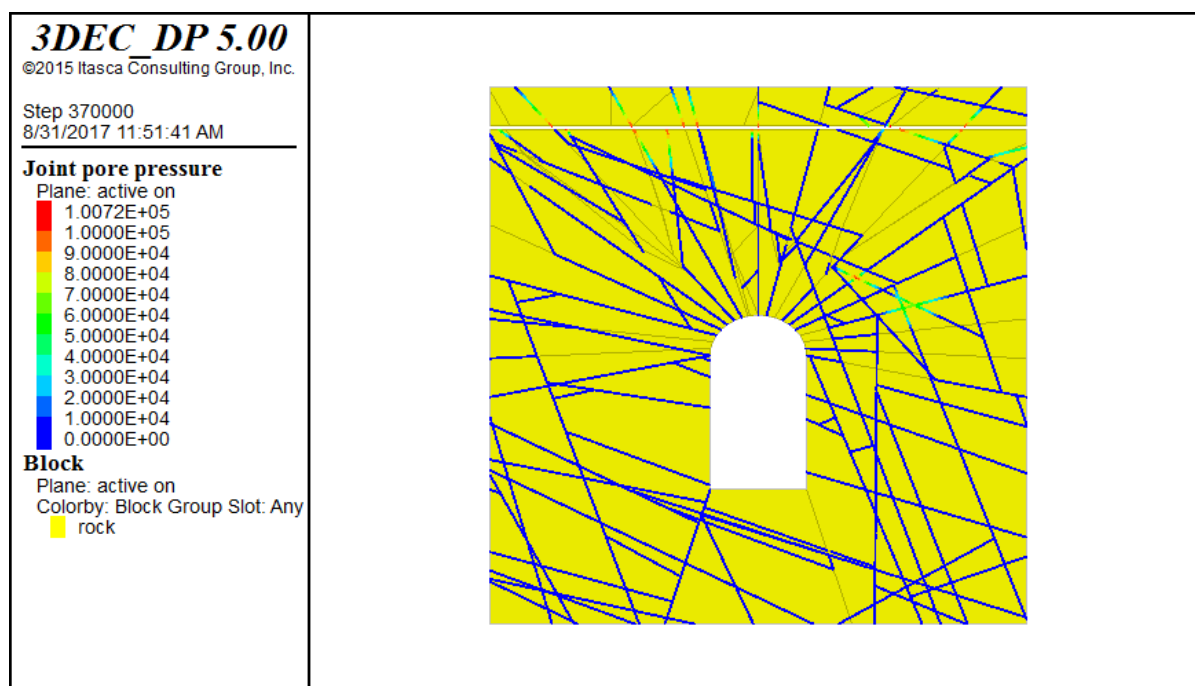


شکل ۶-۱۳- نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ی آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$



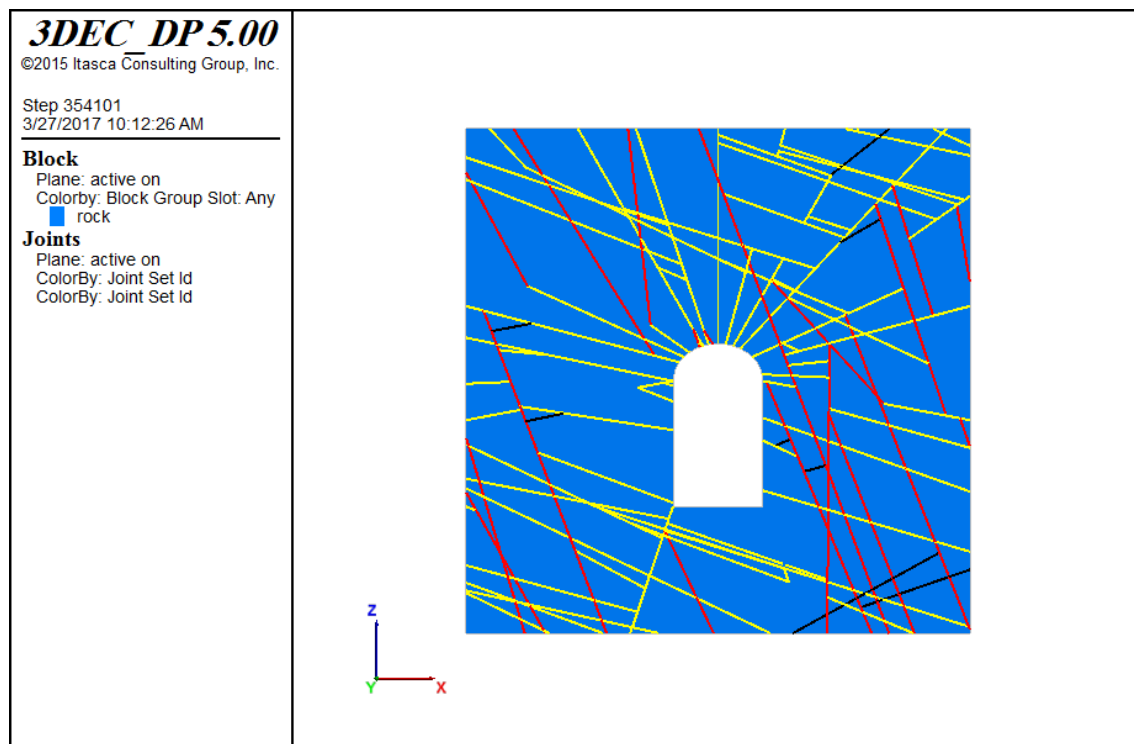
شکل ۶-۱۴- نمودار فشار منفذی آب ناشی سیستم پرده‌ی آب در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$

در شکل ۶-۱۵- کنتور فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های توده‌سنگ مدل عددی در عمق ۵۰ متری و با فشار سیستم پرده آب (۱ بار) را در مقطع عرضی نشان داده شده است.

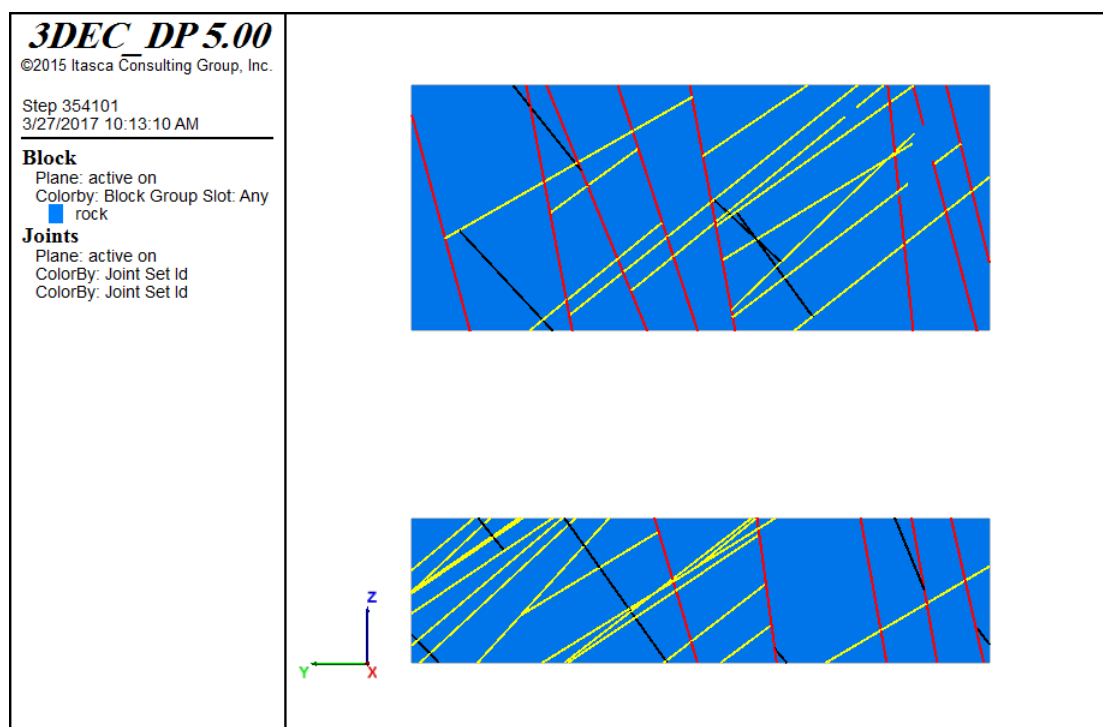


شکل ۶-۱۵- فشار منفذی درون ناپیوستگی‌ها ناشی از سیستم پرده آب با فشار ۱ بار (مقطع عرضی مغار)

۶-۴-۲- تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی (بدون پرده آب) در شکل‌های ۶-۱۶ و ۶-۱۷ به ترتیب مقطع عرضی و طولی مغار و سیستم درزه‌داری در مدل عددی نشان داده شده است. در جداول ۶-۸ تا ۶-۱۰ مقادیر نرخ آب ورودی به درون مغار در عمق‌ها و ترازهای مختلف سفره آب زیرزمینی در سه حالت مختلف نسبت تنش افقی به قائم آورده شده است. همان‌طور که از جدول ۶-۸ مشخص است در حالتی که تراز سفره آب زیرزمینی ۳۵ متر بالاتر از تاج مغار باشد (در نسبت تنش افقی به قائم $1/5$)، با افزایش عمق قرارگیری مغار از ۵۰ به ۱۰۰ متری، نرخ آب ورودی به درون مغار $2/1$ لیتر بر ثانیه کاهش داشته و با افزایش عمق از ۱۰۰ به ۱۵۰ متر به دلیل تغییر شرایط تنش برجا و کاهش نسبت تنش افقی به قائم در اعماق زیادتر، نرخ آب ورودی از $5/5$ به $3/4$ لیتر بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین در حالتی که مغار در عمق ۱۰۰ متری واقع شده باشد، با افزایش ارتفاع سفره آب زیرزمینی نسبت به تاج مغار از ۳۵ به ۷۰ متر، نرخ آب ورودی به مغار $4/2$ لیتر بر ثانیه افزایش یافته که ناشی از افزایش هد آب می‌باشد. همچنین در شرایطی که مغار در عمق ۱۵۰ متری واقع گردد، با افزایش ارتفاع سفره آب زیرزمینی نسبت به تاج مغار از ۳۵ به ۷۰ و ۱۱۰ متر، نرخ آب ورودی به مغار به ترتیب $4/3$ و $8/6$ لیتر بر ثانیه افزایش یافته است که اهمیت تأثیر تراز آب زیرزمینی بر تغییر نرخ جریان آب به درون مغار را به وضوح نشان می‌دهد. نمودار تغییرات نرخ جریان ورودی در شکل‌های ۶-۱۸ تا ۶-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۶- مقطع عرضی مغار و سیستم درزه‌داری



شکل ۶-۱۷- مقطع طولی مغار و سیستم درزه‌داری

جدول ۶-۸- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی، $K = 1/5$ (بدون پرده آب)

ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج عمق مغار	۳۵ (متر)	۷۰ (متر)	۱۱۰ (متر)
۵۰ (متر)	۷/۶ (لیتر بر ثانیه)		
۱۰۰ (متر)	۵/۵ (لیتر بر ثانیه)	۹/۳ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۳/۴ (لیتر بر ثانیه)	۷/۴ (لیتر بر ثانیه)	۱۱/۲ (لیتر بر ثانیه)

جدول ۶-۹- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی، $K = 2$ (بدون پرده آب)

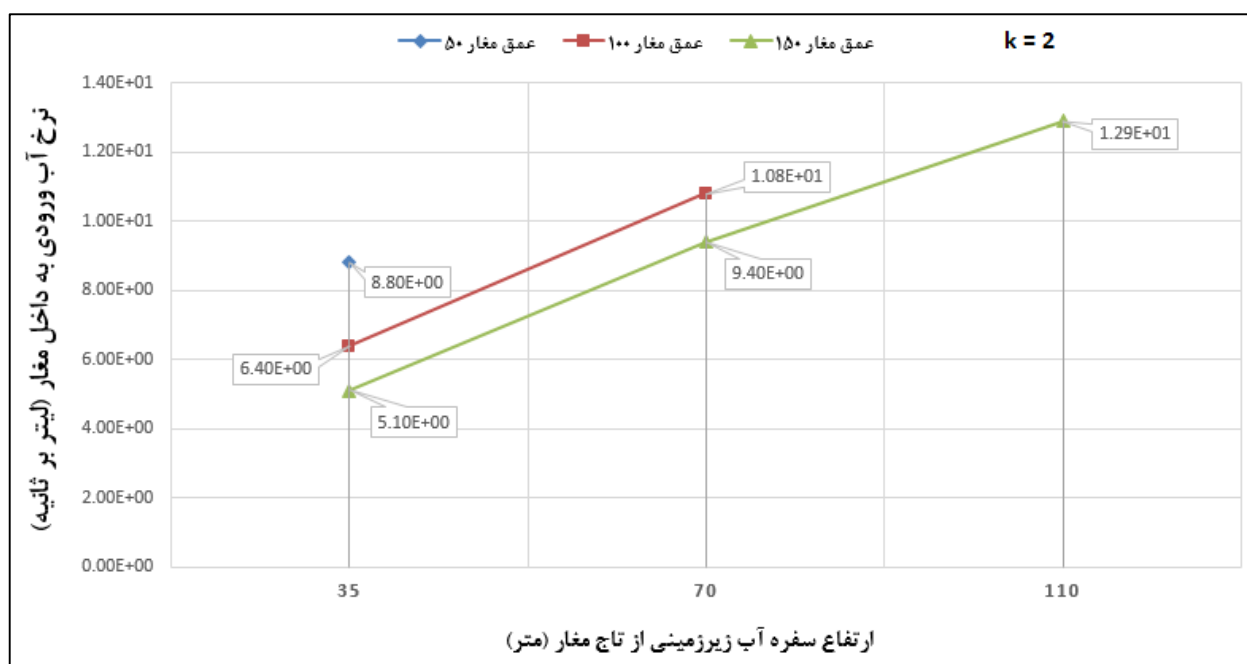
ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج عمق مغار	۳۵ (متر)	۷۰ (متر)	۱۱۰ (متر)
۵۰ (متر)	۸/۸ (لیتر بر ثانیه)		
۱۰۰ (متر)	۶/۴ (لیتر بر ثانیه)	۱۰/۸ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۵/۱ (لیتر بر ثانیه)	۹/۴ (لیتر بر ثانیه)	۱۲/۹ (لیتر بر ثانیه)

شکل ۶-۱۸- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ (بدون سیستم پرده آب)

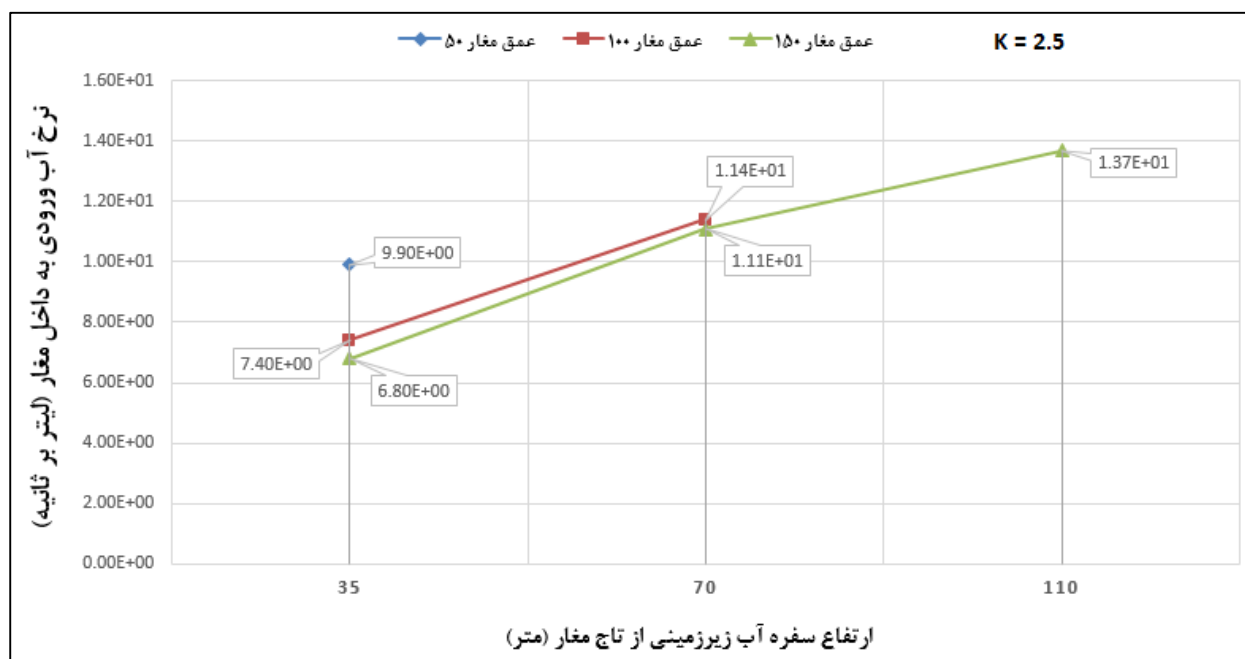
ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج عمق مغار	۳۵ (متر)	۷۰ (متر)	۱۱۰ (متر)
۵۰ (متر)	۹/۹ (لیتر بر ثانیه)		
۱۰۰ (متر)	۷/۴ (لیتر بر ثانیه)	۱۱/۴ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۶/۸ (لیتر بر ثانیه)	۱۱/۱ (لیتر بر ثانیه)	۱۳/۷ (لیتر بر ثانیه)



شکل ۶-۱۸- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ (بدون سیستم پرده آب)



شکل ۶-۱۹- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ (بدون سیستم پرده آب)



شکل ۶-۲۰- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ (بدون سیستم پرده آب)

۶-۴-۳- محاسبه نرخ آب ورودی به درون مغار ناشی از سفره آب زیرزمینی و سیستم پردهی آب

در مرحله دوم از تحلیل حساسیت، سفره آب زیرزمینی در ۳۵ متری از تاج مغار در نظر گرفته شده و عمق قرارگیری مغار همانند حالت‌های قبل در ترازهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری زیرزمین جانمایی شده و با سه حالت مختلف نسبت تنش افقی به قائم تحلیل حساسیت شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت با وجود سیستم پرده آب در جداول ۶-۱۱ تا ۶-۱۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده، با ایجاد سیستم پرده آب (فشار ۱ بار) نرخ آب ورودی به مغار در حالتی که ارتفاع سفره آب زیرزمینی ۳۵ متر بالاتر از تاج مغار است، از $7/6$ به ۱۱ لیتر بر ثانیه افزایش یافته و در حالتی که فشار پرده آب به ۲ بار افزایش می‌یابد، این نرخ از ۱۱ به $13/9$ بر ثانیه افزایش یافته است که نشان دهندهی تأثیر بسزای سیستم پردهی آب بر افزایش فشار منفذی و جریان آب در ناپیوستگی‌ها و در نتیجه افزایش نرخ آب ورودی به درون مغار است. همچنین با افزایش نسبت تنش افقی به قائم به دلیل اتساع برشی ناپیوستگی‌ها و در نتیجه افزایش بازشدگی و فشار منفذی، نرخ آب ورودی به داخل

مغار نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در فشار ۱ بار و عمق ۵۰ متری مغار، با افزایش نسبت تنش افقی به قائم از ۱/۵ به ۲/۵، نرخ آب ورودی به داخل مغار از ۱۱ به ۱۳/۴ لیتر بر ثانیه افزایش یافته است. نمودار نتایج تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در حضور سیستم پرده‌ی آب در شکل‌های ۶-۲۱ تا ۶-۲۳ آورده شده است.

جدول ۶-۱۱- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 1/5$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر)

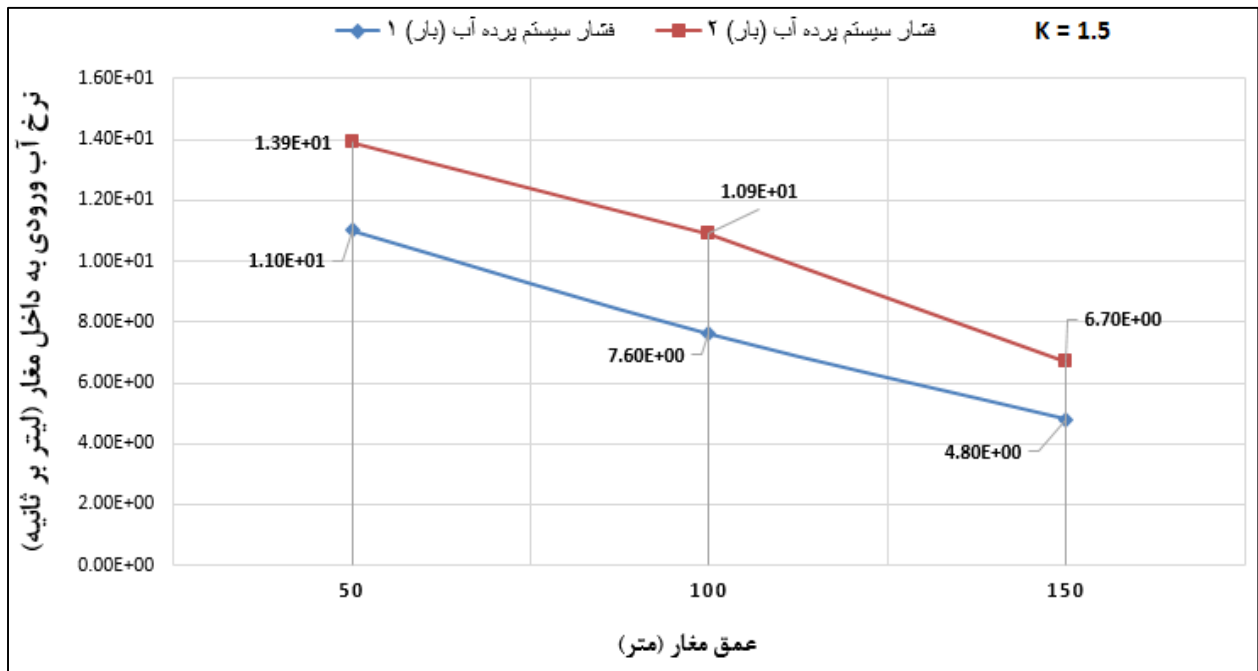
عمق مغار	فشار پرده آب	۱ (بار)	۲ (بار)
۵۰ (متر)	۱۱ (لیتر بر ثانیه)	۱۳/۹ (لیتر بر ثانیه)	
۱۰۰ (متر)	۷/۶ (لیتر بر ثانیه)	۱۰/۹ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۴/۸ (لیتر بر ثانیه)	۶/۷ (لیتر بر ثانیه)	

جدول ۶-۱۲- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 2$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر)

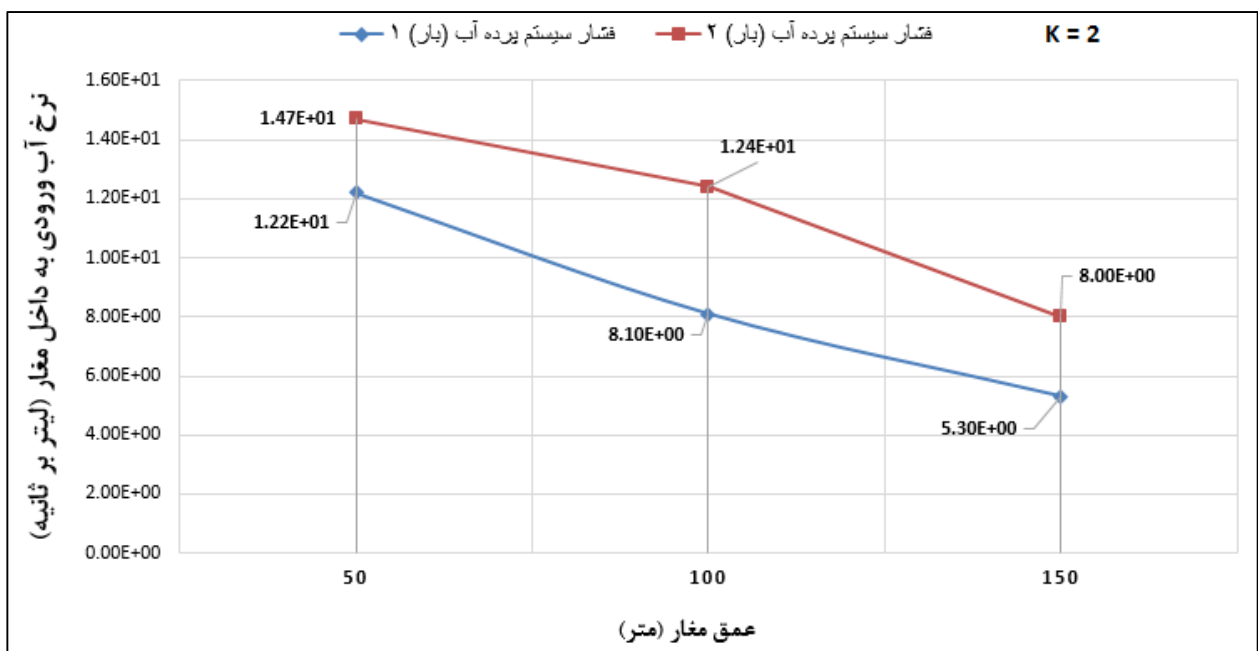
عمق مغار	فشار پرده آب	۱ (بار)	۲ (بار)
۵۰ (متر)	۱۲/۲ (لیتر بر ثانیه)	۱۴/۷ (لیتر بر ثانیه)	
۱۰۰ (متر)	۸/۱ (لیتر بر ثانیه)	۱۲/۴ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۵/۳ (لیتر بر ثانیه)	۸ (لیتر بر ثانیه)	

جدول ۶-۱۳- نرخ آب ورودی به مغار ناشی از سفره آب و پرده آب، $K = 2/5$ (ارتفاع سفره آب از تاج مغار ۳۵ متر)

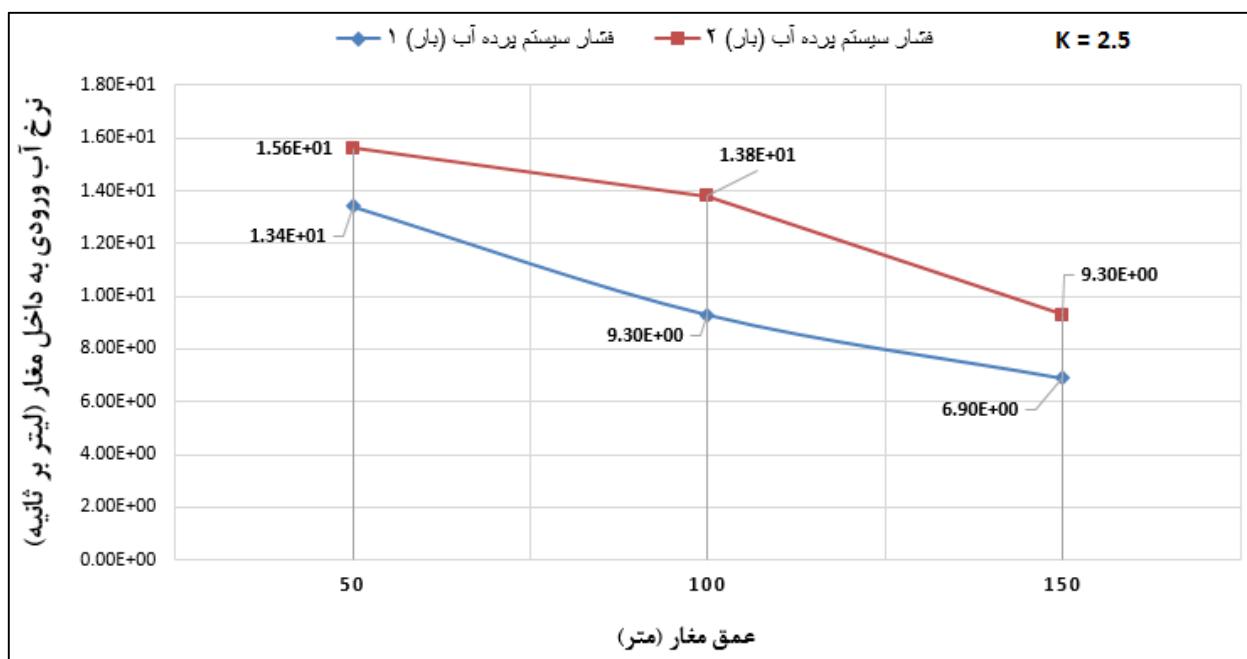
عمق مغار	فشار پرده آب	۱ (بار)	۲ (بار)
۵۰ (متر)	۱۳/۴ (لیتر بر ثانیه)	۱۵/۶ (لیتر بر ثانیه)	
۱۰۰ (متر)	۹/۳ (لیتر بر ثانیه)	۱۳/۸ (لیتر بر ثانیه)	
۱۵۰ (متر)	۶/۹ (لیتر بر ثانیه)	۹/۳ (لیتر بر ثانیه)	



شکل ۶-۲۱- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 1.5$ (در حضور سیستم پرده آب)

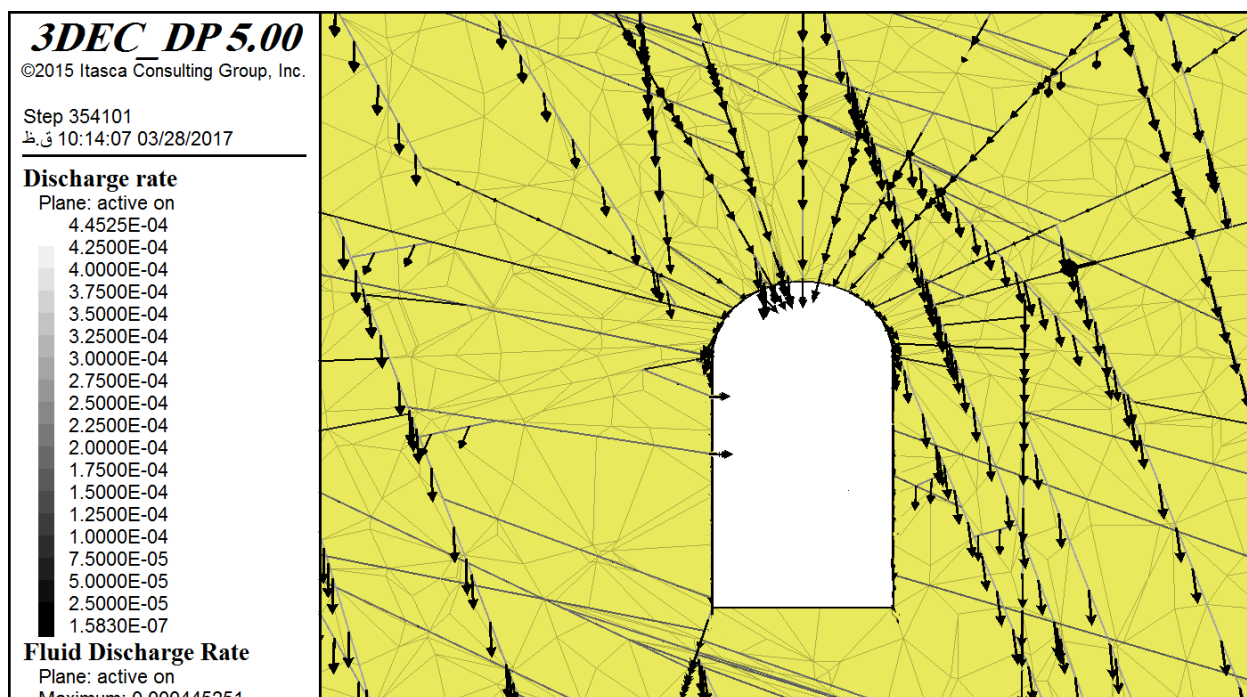


شکل ۶-۲۲- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2$ (در حضور سیستم پرده آب)



شکل ۶-۲۳- تغییرات نرخ آب ورودی به مغار در نسبت تنش افقی به قائم $K = 2.5$ (در حضور سیستم پرده آب)

در شکل ۶-۲۴ تصویری از بردارهای نرخ جریان آب به داخل مغار در مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۶-۲۴- بردارهای نرخ جریان آب به داخل مغار در مدل عددی

۵-۶- جمع‌بندی

در فصل ششم، سناریوهای مختلف مدل‌سازی توأمان مغار ذخیره‌سازی نفت خام مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. پس از کالیبره‌سازی توده‌سنگ و برآورد REV در فصل پنجم، هندسه مغار بر اساس ابعاد متداول مغارهای ذخیره‌سازی بدون پوشش نفت خام در دنیا درون توده‌سنگ درزه‌دار مذکور ایجاد و حفاری شده است. سپس شرایط پایداری مغار در حضور سفره‌ی آب زیرزمینی تحت اندرکنش هیدرومکانیک بررسی و تأیید شده است. در مرحله بعد فشار آب منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار محاسبه و تحلیل حساسیت شد. فشار وارده از طرف نفت خام ذخیره‌سازی شده در این مطالعه محاسبه شد و با فشار آب منفذی ناشی از سفره زیرزمینی و سیستم پرده آب مقایسه گردید. سپس نرخ آب ورودی به درون مغار از طریق ناپیوستگی‌های توده‌سنگ دربرگیرنده محاسبه شده و تحلیل حساسیت با تغییر تراز سفره‌ی آب زیرزمینی، نسبت تنش افقی به قائم و همچنین عمق مغار صورت گرفته است. در گام آخر، با ایجاد سیستم پرده‌ی آب مصنوعی به‌صورت گمانه‌هایی در بالای تاج مغار، نرخ آب ورودی به داخل مغار محاسبه شده و تغییرات مقادیر نرخ آب در این شرایط در مقایسه با عدم وجود پرده آب بررسی و تحلیل شده و همچنین تحلیل حساسیت سیستم پرده آب نیز انجام شده است. بر اساس نتایج، تأثیر هد آب ناشی از سفره آب بیشتر از عمق مغار است. همچنین با ایجاد سیستم پرده آب نرخ آب ورودی به مغار و فشار منفذی افزایش چشم‌گیری نسبت به عدم وجود پرده آب دارد. به علاوه با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، به دلیل اتساع برشی ناپیوستگی‌ها و در نتیجه افزایش بازشدگی، فشار منفذی و نرخ آب ورودی افزایش داشته است.

فصل، مقتم

نیچہ گیری

۷-۱- جمع‌بندی

جریان سیال و هدایت هیدرولیکی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، موضوعی پیچیده در علم مکانیک سنگ بوده و نقش بسزایی در بسیاری از مسائل مهندسی از قبیل هیدروژئولوژی، عمران، نفت، ذخایر ژئوترمال و دفن زباله‌های هسته‌ای دارد. اغلب محققان برای تخمین جریان آب در توده‌سنگ، محیط ناپیوسته‌ی دربرگیرنده‌ی سازه‌ی زیرزمینی را با یک محیط پیوسته معادل‌سازی کرده و روابط کلاسیک را مورد استفاده قرار می‌دهند. در حالی‌که طبیعت توده‌سنگ ناپیوسته بوده و کاربرد مدل‌های ناپیوسته تخمین دقیق‌تری از نفوذپذیری توده‌سنگ ارائه می‌دهد. به علت تصمیم کارفرما (شرکت پایانه‌های نفتی) جهت مطالعات ساخت مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری و از آنجا که ساختگاه سد و مغار کارون ۴ در سازند آسماری ساخته شده است، از این ساختگاه به‌منظور انجام این تحقیق استفاده شده است. پس از برداشت ناپیوستگی‌ها از رخنمون‌های سطحی و تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر درزه‌ها، مدل‌های عددی از توده‌سنگ میزبان سد کارون ۴ به صورت بلوک‌هایی با ابعاد کوچک (۲x۲x۲) تا بزرگ (۱۴x۱۴x۱۴) ساخته شده که دارای سیستم درزه‌داری DFN تولید شده منطبق با توابع توزیع بدست آمده می‌باشند. سپس تحت اندرکنش توأمان و غیرتوأمان هیدرومکانیکی، نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار مذکور تخمین زده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. سپس به تخمین المان حجم معرف پایه (REV) ساختگاه سد کارون ۴ پرداخته شده است. به دلیل عدم امکان مش‌بندی مدل در ابعاد واقعی، در این تحقیق مدل‌سازی با مقیاس کوچک‌تر صورت گرفته است. این عملیات زیربنای اصلی به‌منظور ایجاد بلوک کالیبره شده به عنوان توده‌سنگ میزبان جهت حفاری مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام می‌باشد. پس از حفاری مغار در بلوک درزه‌دار مذکور، پایداری و خودنگهداری این مغار بررسی و ارزیابی شده است. در مرحله بعد، فشار وارده توسط نفت خام ذخیره شده درون مغار به کف محاسبه شده و با فشار منفذی آب درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز (ناشی از سفره زیرزمینی و سیستم پرده آب) مغار مقایسه شده است. سپس نرخ آب ورودی به درون مغار ناشی از سفره‌ی آب زیرزمینی در ۳ تراز مختلف نسبت به تاج مغار، نسبت تنش‌های افقی

به قائم و همچنین ۳ عمق متفاوت قرارگیری مغار، محاسبه و تحلیل حساسیت شده است. در گام نهایی در حضور سفره آب زیرزمینی، با ایجاد سیستم پرده‌ی آب مصنوعی، نرخ آب ورودی به مغار در حضور پرده‌ی آب با ۲ فشار گمانه‌ای متفاوت، ۳ عمق قرارگیری مختلف مغار و ۳ تنش افقی به قائم مختلف تحلیل حساسیت شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق مغار، فشار منفذی و نرخ آب ورودی به درون مغار کاهش می‌یابد که ناشی از افزایش روباره و در نتیجه کاهش بازشدگی درزه‌ها است. در عمق ثابت با افزایش ارتفاع سفره آب زیرزمینی از تاج مغار (افزایش هد آب زیرزمینی)، نرخ آب ورودی به مغار و همچنین فشار منفذی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش نسبت تنش افقی به قائم سبب اتساع برشی درزه‌ها و در نتیجه افزایش بازشدگی شده و افزایش نرخ آب ورودی به مغار را در پی دارد.

۲-۷- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه به شرح زیر می‌باشد:

- مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده، به‌طور چشم‌گیری متأثر از درنظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیکی می‌باشد. تحلیل هیدرولیکی محض سبب بدست آمدن خروجی‌های غیر واقعی شده و نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار را اغلب بسیار بیش‌تر از مقدار واقعی در شرایط اندرکنش توأمان مکانیکی و هیدرولیکی نشان می‌دهد. این نتایج در روابط ۲-۵ و ۳-۵ نشان داده شده است.
- به‌منظور اعتبارسنجی مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده به روش عددی در این مطالعه با مقایسه مقادیر نفوذپذیری بدست آمده توسط تست لوژن برجا در ساختگاه سد کارون ۴، دقت و صحت مدل‌سازی و تخمین نفوذپذیری در این پایان‌نامه سنجیده و تأیید شده است. این نتایج در رابطه‌ی ۲-۵ و شکل ۵-۱۴ آورده شده است.

- نفت خام ذخیره شده درون مغار متناسب با حجم ذخیره‌سازی به دیواره و کف فشار وارد کرده (رابطه ۶-۱) که سبب نفوذ نفت به داخل ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار و در نتیجه نشت محصول به بیرون می‌شود. لذا به منظور ارزیابی سیستم حصار هیدرولیکی، فشار منفذی آب درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار ناشی از سفره‌ی زیرزمینی و پرده آب محاسبه و با فشار وارده از طرف نفت درون مغار مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت عدم وجود سیستم پرده‌ی آب، فشار منفذی ناشی از سفره آب زیرزمینی کمتر از فشار وارده از طرف نفت ذخیره شده است و در نتیجه در این حالت محصول ذخیره شده به بیرون از مغار نشت می‌نماید و امکان ذخیره‌سازی بدون سیستم پرده آب وجود ندارد (جداول ۶-۲ تا ۶-۴ و رابطه‌ی ۶-۱). با ایجاد سیستم پرده‌ی آب، در هر دو فشار درون گمانه‌ها (۱ و ۲ بار)، به دلیل فشار منفذی بیشتر آب نسبت به نفت ذخیره شده، محصول به بیرون نشت نمی‌کند (جداول ۶-۵ تا ۶-۷ و رابطه‌ی ۶-۱).

- نرخ آب ورودی به داخل مغار با تغییر عمق قرارگیری مغار کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش ارتفاع سفره‌ی آب زیرزمینی از تاج مغار به دلیل افزایش هد فشار، نرخ آب ورودی به درون مغار افزایش یافته و نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سطح تراز سفره آب زیرزمینی بیشتر از عمق قرارگیری مغار می‌باشد.

- افزایش نسبت تنش افقی به قائم سبب اتساع برشی درزه‌ها شده این که امر باعث افزایش بازشدگی و در نتیجه افزایش فشار منفذی و نرخ آب ورودی به درون مغار می‌گردد.

- ایجاد سیستم پرده‌ی آب سبب افزایش محسوس نرخ آب ورودی به مغار شده است. افزایش فشار آب درون گمانه‌های پرده‌ی آب سبب افزایش چشم‌گیر نرخ آب ورودی به مغار شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق قرارگیری مغار و تراز سفره آب زیرزمینی تأثیر کم‌تری نسبت به فشار آب سیستم پرده‌ی آب دارد.

- به دلیل محدودیت نرم افزار 3DEC در مدل سازی با ابعاد بزرگ و واقعی و مش بندی، در این پژوهش مدل هندسه‌ی مدل عددی به مقیاس کوچک شده است. لذا مقادیر و نتایج بدست آمده نمی تواند به صورت مستقیم در مسائل مکان یابی و پروژه های صحرایی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تعمیم نتایج با شرایط واقعی می بایست از ضرایب مقیاس مناسب استفاده گردد.

۳-۷- پیشنهادات

در هر مطالعه ای همواره فرض های ساده کننده ای در مدل سازی های عددی صورت می گیرد و این فرضیات و عدم قطعیت ها در مباحث ژئومکانیکی به دلیل پیچیدگی مسائل شدت بیشتری دارد. بهتر است در مدل سازی های عددی ابتدا مدل های ساده ایجاد و تحلیل شوند و رفته رفته به جزئیات و پیچیدگی های مدل افزوده گردد. در زیر پیشنهادهایی جهت مطالعات آتی ارائه شده است:

- در این مطالعه ماتریس سنگ نفوذناپذیر در نظر گرفته شده که دلیل این امر آب گذاری و نفوذپذیری کمتر ماتریس سنگ نسبت به ناپیوستگی ها می باشد. در سنگ هایی که نفوذپذیری ماتریس سنگ غیر قابل اغماض باشد، این فرض نادرست بوده و می بایست در مدل عددی مدنظر قرار گیرد. بدین منظور پیشنهاد می شود در مطالعات آتی از ورژن جدید نرم افزار 3DEC 5.2 که امکان جریان سیال به صورت همزمان در ناپیوستگی ها و ماتریس سنگ وجود دارد، استفاده شود.
- به دلیل زمان بر بودن پروسه ی تحلیل حساسیت برای هر یک از مدل ها، پیشنهاد می شود که پارامترهای بیشتری تحلیل حساسیت شوند تا نتایج گسترده تری جهت مقایسه در دسترس قرار گیرند. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی تحلیل حساسیت پارامترهایی نظیر زاویه اتساع، ابعاد مغار، قطر گمانه های پرده آب مغار انجام شود.

- به دلیل ابعاد بزرگ بلوک، در حالتی که تعداد درزه‌ها بسیار زیاد باشد، مش‌بندی با مشکل مواجه شده و در برخی موارد غیر قابل اجرا خواهد بود، لذا پیشنهاد می‌شود که ابتدا هندسه مدل ساخته شده و پس از ایجاد سیستم درزه‌داری بر اساس شبکه شکستگی‌های ناپیوسته، کل مدل توسط نرم‌افزارهایی نظیر Griddle و Kubrix مش‌بندی شده و سپس جهت تحلیل عددی به نرم‌افزار 3DEC منتقل شوند.
- به دلیل حجم زیاد و زمان‌بر بودن، در این مطالعه تنها یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق و گسترده‌تر پیشنهاد می‌شود حداقل سه مغار موازی و با فواصل استاندارد از یکدیگر مدل‌سازی شود و همین تحلیل‌ها بر روی سه مغار به صورت همزمان صورت گیرد.

مراجع

- [1]. Jalali M.R., Dusseault M.B. (2012). Coupling Geomechanics and Transport in Naturally Fractured Reservoirs. *International Journal of Mining & Geo-Engineering*, Vol. 46, No 2, PP.. 105-131
- [2]. Jing L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, Issue 3
- [3]. Indraratna B., Ranjith P.G., Gale W. (1999). Single Phase Water Flow Through Rock
- [4]. Chi Y., Jiang Q. (2013). Modelling of hydro-mechanical coupling and transport in densely fractured rock mass. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 19, Issue 5
- [5]. Priest S.D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. London., Chapman & Hall. SPRINGER-SCIENCE, BUSINESS MEDIA, B.V, ISBN 978-94-011-1498-1
- [6]. Zhang X., Sanderson D.J. (2002). *Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses*. Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London. London, UK, ISBN: 0-08-043931-4
- [7]. Rutqvist J., Stephansson O. (2003). The Role of Hydromechanical Coupling in Fractured Rock Engineering. *Hydrogeology Journal*, Vol. 11, Issue 1, PP. 7–40
- [۸]. حاجی حسین زاده، م.، تمدنی، م: "ذخیره سازی استراتژیک نفت خام ایران در مخازن زیرزمینی". اولین همایش ملی تأمین، نگهداشت، انتقال و توزیع فراآورده های نفتی، ۱۳۸۸
- [۹]. جنابی، ه.، حسنی، م: "عملکرد آب زیرزمینی در اطراف مغارهای سنگی بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام". اولین همایش ذخیره سازی زیرزمینی نفت و گاز دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۹۳
- [10]. Lindblom U. (1989). The Performance of Water Curtains Surrounding Rock Caverns Used for Gas Storage. *International Journal of Rock, Mining and Geomechanics*, Vol. 26, No. 1, PP.. 85-97
- [11]. Bérest P. (1990). Accidents in Underground Oil and Gas Storages: Case Histories and Prevention. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 5, Issue 4
- [12]. Kjørholt H., Broch E. (1992). The Water Curtain - a Successful Means of Preventing Gas Leakage from High-Pressure, Unlined Rock Caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No. 2, PP.. 127-132

[۱۳]. فرقانی، م.، رمضانزاده، ا.، حیدری، ش: "الزامات طراحی مغارهای سنگی بدون پوشش به منظور ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری". اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، ۱۳۹۰

[14]. Froise S. (1987). Hydrocarbon storage in unlined rock caverns: Norway's use and experience. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2(3):265-268

[۱۵]. حسن‌پور، ج.، قیاسوند، ص: "پهنه‌بندی نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان از نظر امکان ساخت مغارهای سنگی بدون پوشش برای ذخیره‌سازی نفت خام". دهمین کنفرانس ملی تونل تهران ۱۳۹۲

[16]. Grøv E. (2011). Storage of Hydrocarbon Products in Unlined Rock Caverns. *The First Iranian Virtual Conference on Underground Storage of Hydrocarbons*

[۱۷]. رمضانزاده، ا: "مروری بر مفاهیم ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری؛ دانشگاه صنعتی شاهرود". جزوه درسی

[18]. Broch E. (1988). Storage of Oil and Gas in Rock Caverns

[۱۹]. کریمی‌نسب، سعید: "گزارش تاریخیچه مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری". دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۷

[20]. Smiljkovic Z., Damjanac B. (1989). Some Design Aspects of The Large Rock Caverns for Storing Petroleum Products. *International Congress in Tunneling, Canada*

[21]. Underground Constructions for The Norwegian Oil & Gas Industry. (2007). Norwegian Tunnelling Society. Publication No. 16

[22]. Chakravarthy C., Nanda P., Jain A. (2011). Three Dimensional Analysis of Storage Cavern. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Kochi*

[۲۳]. کریمی نسب، س: "گزارش امکان‌سنجی احداث مخازن زیرزمینی در ایران به منظور ذخیره‌سازی نفت خام"، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۸

[۲۴]. قیاسوند، ص: "الزامات زمین‌شناسی در انتخاب ساختگاه و طراحی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام". اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت. ۱۳۹۲

[25]. Lu M. (2010). Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage. *SINTEF Rock Engineering, Trondheim, Norway., Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2010, 2 (4): 289–297

[26]. Zhongkui L., et al. (2015). Design and operation problems related to water curtain system for underground watersealed oil storage caverns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 8, Issue 5

[27]. Zhechao W., Li S., Liping Q. (2015). Design and test aspects of a water curtain system for underground oil Storage caverns in China. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China., Tunnelling and Underground Space Technology 48 (2015) 20–34

[۲۸]. اصفهانی، ابوالقاسم: "برآورد تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه دار با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی اجزاء ناپیوسته و مدل های شبکه شکستگی ناپیوسته مطالعه موردی: ساختگاه سد مخزنی پارسیان". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳

[29]. Jing L., Stephansson O. (2007). Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory & Applications (Developments in Geotechnical Engineering). Elsevier Science, ISBN 9780080551852

[30]. http://www.interpore.org/ref-mat_pub/mgfc-course/mgfc-darcy.html

[31]. Indraratna B., Ranjith P.G., Gale W. (1999). Single Phase Water Flow Through Rock Fractures, Geotechnical and Geological Engineering, Kluwer Academic Publishers. Printed in The Netherlands, Vol. 17, Issue 3, PP. 211-240

[32]. Hakami E. (1995). Aperture Distribution of Rock Fractures. Ph.D Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm

[33]. Zhou C.B., Sharma R.S., Chen Y.F., Rong G. (2008). Flow-Stress Coupled permeability Tensor For Fractured Rock Masses. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics. John Wiley & Sons, Ltd, 32:1289-1309

[34]. Min K.B. (2004). Fractured Rock Masses as Equivalent Continua: A Numerical Study. KTH University, Stockholm, ISBN: 91-7283-757-8

[35]. Sharifzadeh M., Mitani Y., Esaki T. (2009). Rock Joint Surfaces Measurement and Analysis of Aperture Distribution under Different Normal and Shear Loading Using GIS, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.41, No.2

[36]. Park B.Y., et al. (2002). Determination of The Hydraulic Conductivity Components Using a three-dimensional Fracture Network Model in Volcanic Rock, Engineering Geology, Vol. 66, Issue 1-2

[37]. Thoraval A., Renaud V. (2003). Hydro-Mechanical Upscaling of a Fractured Rock Mass Using a 3D Numerical Approach. International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems, Stockholm, Sweden. pp. 263-268

[38]. Itasca Consulting Group Inc. (2013). 3DEC User's Guide, Ver 5.0, Minneapolis, Minnesota

[۳۹]. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران: "گزارشات مطالعات مکانیک سنگ طرح سد و نیروگاه

کارون ۴"، (جلد ۱/۳)، مطالعات مرحله دوم، مرداد ۱۳۸۲

[۴۰]. میرزایی نصیرآباد، ح: "تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه شکستگی های ناپیوسته ی توده سنگ

درزه دار". اولین همایش زمین شناسی فلات ایران، کرمان، ۱۳۹۱

[41]. Vermilye J.M., Scholz C.H. (1995). Relation Between Vein Length & Aperture. Journal Of Structural Geology. Vol. 17, Issue 3, ISBN 0191-8141

[42]. Baghbanan A. (2008). Scale and Stress Effect on Hydro-Mechanical Properties of Fractured Rock Masses. PhD Thesis. Royal Institute of Technology

[43]. Teimori-Sangarami Ahmad. (2005). Calculation of Effective Permeability and Simulation of Fluid Flow in Naturally Fractured Reservoirs, PhD Thesis, University of New South Wales

[۴۴]. محمودپور، ه.، میرزایی نصیرآباد، ح.، ترابی، ر: "تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان

آب در توده سنگ درزه دار". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۴

[45]. Wang X. (2005). Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Walls and Other Cylindrical Surfaces. PhD Thesis. Blacksburg, Virginia

[46]. Bear J. (1972). Dynamics of Fluids in porous Media. Elsevier, New York, ISBN 10: 0486656756

[47]. Sullivan T.D. (2007). Hydro-Mechanical Coupling and Pit Slope Movement. Slope Stability, Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9756756-8-7

[48]. Lee HS., Cho TF. (2002). Hydraulic Characteristics of Rough Fractures Inlinear Flow Under Normal & Shear Load. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 35, Issue 4, PP. 299-318

[49]. Esmaeili K., Hadjidiageorgiue J., Grenon M. (2010). Estimating Geometrical and Mechanical REV Based on Synthetic Rock Mass Models at Brunswick Mine. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, Issue 6

[50]. Hudson J., Harrison J. (2000). Engineering I 0 rock mechanics: an introduction to the principles. Volume 1, ELSEVIER SCIENCE Ltd, ISBN: 0 08 04 19 12 7

[۵۱]. ژنگ، ی.، شریف زاده، م.، نورانی، م: "خواص و رفتار مهندسی سنگ ها". نشر صدا، چاپ اول،

تهران، ۱۳۹۰

[52]. Zhang L. (2006). Engineering Properties of Rocks. Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol. 4

[53]. Heinz K., Kuchler M. (2017). Introduction to Solid Mechanics. PhD Thesis, South Dakota School of Mines & Technology

[۵۴]. رضی، پ.، مسعودی، م.، سلطانی محمدی، س: "انتخاب رابطه‌ی بهینه‌ی عدد لوژن و مقدار نفوذپذیری معادل در عملیات تزریق پی سد سیمره". اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، ۱۳۹۲

[55]. Minaric M. (2004). Reevaluation of Methods For Estimating The Permeability of Selected Slovak Dams. Slovak Journal of Civil Engineering

Abstract

Permeability of fractured rock masses is one of important issues in many studies such as geothermal engineering, mining, geological engineering and underground hydrocarbon storage. Due to lack of enough experience in determination of appropriate leakage system for designation and construction of unlined rock caverns for underground storage of crude oil in Iran, this study is carried out in order to develop this issue. Rock mass permeability is not only affected by geometric properties of discontinuities system, it is also affected by stress field and its changes. Parametric studies and sensitivity analysis provide the possibility of knowing effective key factors to locate and controlling leakage system of unlined rock caverns. Due to employer decision (Iranian oil terminals company) in order to construction study of unlined rock cavern for storage of crude oil in Asmari formation and also because of locating Karoon 4 dam and cavern site in Asmari formation, this study carried out with Karoon 4 site's data. This study is a guideline to determine appropriate methodology for similar studies in other sites. In the first step, field studies carried out at Karoon 4 site that is including joint survey and then this data analyzed via DIPS and EASY-FIT softwares in order to determine governing distribution functions on fracture properties. In the second step, three dimensional discrete fracture network is constructed based on mentioned data via discrete element software, 3DEC. In the third step, representative elementary volume is estimated under hydromechanical coupling process. In the fourth step, a comparison is done between calculated values in two conditions of coupled and un-coupled process and then is validated by insitu values calculated via Lugeon test in Karoon 4 site's. In the fifth step, unlined rock cavern with standard dimensions is excavated in calibrated block and then stability conditions under hydromechanical coupling is assessed. Next, pore pressure and water flowrate into cavern via intersected discontinuities with cavern boundary is estimated. Then similar assessments is carried out with sensitivity analysis of parameters such as water table and cavern depth. In the final step, by creating artificial water curtain system and changing water curtain boreholes properties such as distance from cavern's crown and water pressure in this boreholes, the modeling is carried out in order to estimate water flowrate into cavern and also calculate pore pressure in intersected discontinuities with cavern boundary in comparison with lack of water curtain system.

Keywords: Hydro-mechanical coupling, Discrete element, unlined rock caverns, Discrete fracture network, representative elementary volume, Permeability, Fractured rock mass



faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering
M.Sc Thesis in Tunnelling & Underground Spaces

**An investigation on coupled hydro-mechanical behaviour
of rock mass to design unlined rock cavern for
underground storage of crude oil – A case study**

Adel Shouhani

Supervisor
Dr. Ahmad Ramezan zadeh

Advisor
Dr. Mehdi Noroozi

July 2017