

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

مدل سازی هندسی توده سنگ با هدف ارایه رابطه تجربی برای برآورد آب گذاری در سازه های زیرزمینی (مطالعه موردی: ساختگاه سد مخزنی پارسیان)

نگارنده: سامان مشیری علی آباد

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

دکتر مهدی نوروزی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به

پدر و مادر، خواهران و برادرانم...

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته، آنان که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر، توانشان رفت تا به توانایی برسم و رویشان سفید شد تا رویم سپید بماند، آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه‌های جاودانی زندگی من است و نیز خواهران و برادرانم که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که اینان پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را به خاطر بصیرتی که به من عطا کرد تا بر جهل خویش آگاه باشم و سپاس خدای را به خاطر اراده‌ای که در وجودم نهاد که تا لحظه‌ی مرگ از پای نایستم. از پدر، مادر، برادران و خواهران عزیزم که همواره در تلاش بوده‌اند بستی مناسب برای زندگی‌ام فراهم سازند سپاسگزارم. تقدیر و سپاس فراوان من نثار همه‌ی آموزگاران و اساتیدی که در طی سال‌های تحصیل از محضرشان علم و معرفت را فرا گرفتم، به‌ویژه اساتید راهنما و مشاور این پایان‌نامه دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مهدی نوروزی که تلمذ در محضر آن‌ها برایم افتخاری فراموش ناشدنی خواهد بود. از داوران محترم این پایان‌نامه دکتر شکرالله زارع و دکتر مجید نیک‌خواه که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند، کمال تشکر را دارم. همچنین بر خود لازم می‌دانم از مهندس هیرش محمود پور و مهندس امین دهقانی که بنده را در بخش مدل‌سازی پروژه و انجام برداشت‌های میدانی ساختگاه سد یاری داده‌اند و نیز دکتر شیری زاده، دکتر فرهادیان، دکتر جوادی، مهندس جولایی و مهندس کرد نظیری به خاطر راهنمایی‌هایشان سپاسگزاری نمایم. از جناب مهندس گودرزی، مهندس رحمانی، خانم رضایی و شرکت مهندسين مشاور لار به دليل همكاري در ارايه بخشي از داده‌های پروژه‌ی سد پارسیان، قدردانی می‌کنم. در پایان از تمامی دوستان خویش که در طی این سال‌ها مرا تحمل نموده‌اند و خاطرات سال‌های تحصیل من با آنان عجین شده تشکر و قدردانی نموده و برای آنان آرزوی موفقیت می‌نمایم. به‌ویژه از دوستان عزیزم سیفی، دانش‌آموز، میرکی، اسدی، احمدی، امین پناه، ظاهری، حبیبی، عبدالحی، کرمخانیان، آغیل و تیموری تشکر کرده و به‌روزی آنان را آرزو مندم.

سامان مشیری علی‌آباد

۱۱ بهمن ۱۳۹۵

چکیده

بر اساس مطالعات اخیر توانمندی روش شبکه شکستگی مجزا (DFN) در ارایه مدلی نزدیک به واقعیت از ساختار شکستگی‌های توده سنگ و مدل‌سازی جریان سیال در شکستگی‌ها اثبات شده است. در تمامی مسایل مهندسی سنگ به‌ویژه مطالعه جریان سیال از درون توده سنگ درزه‌دار، توصیف هندسی و شبیه‌سازی هندسی توده سنگ از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مراحل مطالعه هستند. همچنین بر اساس بررسی انجام‌شده درزمینه‌ی جریان سیال در توده سنگ، ازجمله تاثیرگذارترین پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها در مقدار آب‌گذری توده سنگ می‌توان به جهت‌داری شکستگی‌ها، پایایی، بازشدگی، چگالی و شدت شکستگی‌ها اشاره کرد. برای شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده سنگ با استفاده از روش DFN ، صحت سنجی مربوط به داده‌های میدانی در دسترس و تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها ضروری است. در این پژوهش با تمرکز بر توده سنگ ساختگاه سد مخزنی پاریسیان، به ساخت مدل هندسی هیدرولیکی توده سنگ با استفاده از روش شبکه شکستگی‌های مجزا پرداخته می‌شود. به‌منظور ساخت مدل DFN ابتدا دسته‌درزه‌های موجود در منطقه به کمک نرم‌افزار $Dips$ و با استفاده از برداشت‌های صحرایی انجام‌شده، تفکیک و مشخص می‌شود. در مرحله بعد برای هر یک از پارامترهای هندسی ذکر شده بهترین توابع توزیع آماری به‌وسیله نرم‌افزارهای $Easy_fit$ و $Minitab$ تعیین و تعریف می‌شود. با استفاده از داده‌های به دست آمده از برداشت‌های میدانی و نرم‌افزار تجاری $3DEC$ ، مدل DFN نزدیک به واقعیت از ساختگاه سد ساخته و ارایه می‌شود. این مدل DFN و مدل مکعبی دو پارامتری معادل با آن، به‌عنوان اساس تحلیل‌های هیدرولیکی و ارایه رابطه‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت رابطه‌ی بین بازشدگی و فراوانی شکستگی‌ها در مدل مکعبی با نفوذپذیری به‌صورت یک رابطه‌ی تجربی ارایه می‌شود. انتظار می‌رود رابطه‌ی ارایه شده قابلیت کاربرد در پروژه‌های مهندسی دیگر به‌منظور ارایه‌ی یک تخمین اولیه از نفوذپذیری منطقه را داشته باشد.

کلمات کلیدی: توده سنگ درزه‌دار، شبکه شکستگی مجزا، آب‌گذری، سد مخزنی پاریسیان

لیست مقالات

۱- سامان مشیری علی آباد، سید محمد اسماعیل جلالی، مهدی نوروزی، "بررسی آماری ویژگی- های هندسی شبکه درزه ها موثر در برآورد مقدار تراوایی توده سنگ درزه دار"، پنجمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، انجمن ژئوتکنیک ایران، ۲۵ تا ۲۷

آبان ۱۳۹۵

۲- سامان مشیری علی آباد، مهدی نوروزی، سید محمد اسماعیل جلالی، "مدل سازی هندسی توده سنگ درزه دار به منظور برآورد آب گذاری در سازه های زیرزمینی (مورد مطالعاتی: ساختگاه سد مخزنی پارسیان)"، پنجمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، انجمن ژئوتکنیک ایران، ۲۵ تا ۲۷ آبان ۱۳۹۵

فهرست مطالب

فصل اول - کلیات

- ۱-۱ مقدمه ۱
- ۲-۱ هدف از انجام پژوهش ۳
- ۳-۱ ضرورت انجام پژوهش ۴
- ۴-۱ سابقه پژوهش ۵
- ۵-۱ روش تحقیق ۱۱
- ۶-۱ ساختار پژوهش ۱۲

فصل دوم - عوامل موثر بر جریان سیال در شبکه‌ی شکستگی مجزا

- ۱-۲ مقدمه ۱۴
- ۲-۲ مدل جریان شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) ۱۵
- ۳-۲ تولید شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) ۲۰
- ۱-۳-۲ ویژگی‌های موثر شکستگی‌ها بر جریان سیال در شبکه شکستگی ۲۰
- ۱-۳-۲-۱ جهت‌داری ۲۱
- ۲-۳-۲-۱ اندازه شکستگی ۲۲
- ۳-۳-۲-۱ فاصله‌داری ۲۶
- ۴-۳-۲-۱ شدت شکستگی ۲۷
- ۵-۳-۲-۱ پرشدگی ۲۹
- ۶-۳-۲-۱ بازشدگی ۲۹

۲۹	۷-۱-۳-۲ آرایش فضایی (موقعیت) شکستگی ها
۳۰	۲-۳-۲ رابطه‌ی پارامترهای موثر در جریان سیال
۳۱	۱-۲-۳-۲ رابطه‌ی بازشدگی و شدت
۳۲	۲-۲-۳-۲ رابطه بین بازشدگی و طول اثر
۳۵	۴-۲ جمع‌بندی

فصل سوم - اصول حاکم بر جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار

۳۷	۱-۳ مقدمه
۴۰	۲-۳ روش‌های حاکم بر حل مسایل هیدرولیکی
۴۰	۱-۲-۳ روش‌های پیوسته
۴۳	۲-۲-۳ روش‌های ناپیوسته
۴۴	۳-۳ تاریخچه‌ای از روش‌های محاسبه نفوذپذیری شبکه‌ی شکستگی مجزا
۴۶	۴-۳ هیدرولیک درزه
۴۸	۱-۴-۳ جریان سیال در محیط‌های درزه‌دار
۵۰	۵-۳ جریان سیال در DEC^3
۵۲	۶-۳ حجم معرف اولیه (REV)
۵۴	۷-۳ تخمین تانسور نفوذپذیری دوبعدی
۵۴	۸-۳ جمع‌بندی

فصل چهارم - مدل‌سازی هندسی و تخمین نفوذپذیری توده سنگ ساختمانه سدپارسیان

۱-۴	مقدمه	۵۸
۲-۴	ویژگی‌های پروژه سد مخزنی پارسیان	۵۸
۱-۲-۴	موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی	۵۸
۲-۲-۴	خلاصه‌ای از زمین‌شناسی عمومی و مهندسی	۵۹
۱-۲-۲-۴	واحدهای سنگ چینه‌شناسی	۶۰
۲-۲-۲-۴	واحدهای سنگ چینه‌ای ساختگاه	۶۰
۳-۲-۴	نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری در ساختگاه سد	۶۱
۳-۴	مطالعات میدانی	۶۲
۴-۴	تحلیل آماری و تخصیص توابع توزیع مناسب ویژگی‌های هندسی درزه‌ها	۶۳
۱-۴-۴	توزیع جهت‌داری	۶۴
۲-۴-۴	اندازه‌ی خط اثر درزه‌ها	۶۵
۳-۴-۴	چگالی و شدت درزه‌ها	۷۲
۴-۴-۴	بازشدگی درزه‌ها	۷۵
۵-۴	مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال در نرم‌افزار $DEC3$	۷۷
۱-۵-۴	مدل DFN	۷۸
۱-۱-۵-۴	هندسه مدل	۸۰
۲-۱-۵-۴	تخصیص ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سیال به DFN	۸۱
۲-۵-۴	اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل	۸۳
۳-۵-۴	حل عددی جریان سیال در شبکه شکستگی	۸۶
۶-۴	تعیین نفوذپذیری با انجام آزمایش لوژان	۸۶

۸۷.....	۱-۶-۴ رابطه بین لوژان و نفوذپذیری
۸۹.....	۷-۴ محاسبه تانسور نفوذپذیری مدل های DFN و اعتبار سنجی به وسیله عدد لوژان
۹۲.....	۸-۴ رویکرد تصادفی برای محاسبه حجم اولیه معرف
۹۳.....	۹-۴ روند معادل سازی و تخمین نفوذپذیری مدل های مکعبی معادل با DFN
۹۶.....	۱۰-۴ محاسبه حجم تراوش و تحلیل حساسیت بازشدگی مدل های DFN و مکعبی
۹۶.....	۱-۱۰-۴ معرفی و برآورد پارامتر حجم تراوش ($P_{۳۳}$)
۹۸.....	۲-۱۰-۴ تحلیل حساسیت پارامتر بازشدگی
۱۰۵.....	۱۱-۴ جمع بندی

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۰۸.....	۱-۵ نتیجه گیری
۱۱۰.....	۲-۵ پیشنهادها
۱۱۰.....	منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲ اندازه‌گیری شدت و چگالی شکستگی‌ها در ابعاد مختلف	۲۸
جدول ۱-۴ پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌های برداشت‌شده	۶۵
جدول ۲-۴ متوسط پایایی مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها	۶۶
جدول ۳-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌های، دسته‌درزه ۱	۶۷
جدول ۴-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۲	۶۹
جدول ۵-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۳	۷۰
جدول ۶-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۴	۷۲
جدول ۷-۴ مقادیر عددی مربوط به شدت شکستگی‌ها به تفکیک دسته درزه‌ها	۷۵
جدول ۸-۴ مقادیر بازشدگی مربوط به براشتهای میدانی و گمانه‌ها	۷۵
جدول ۹-۴ رتبه‌بندی توابع توزیع حاکم بر بازشدگی درزه‌ها- گمانه ۱S	۷۷
جدول ۱۰-۴ خواص مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی	۸۲
جدول ۱۱-۴ ویژگی‌های هیدرولیکی سیال	۸۳
جدول ۱۲-۴ روابط تجربی برای تعیین مقدار k	۸۵
جدول ۱۳-۴ مقادیر تنشهای اولیه و فشار حاصل از طبقات بالایی محاسبه شده	۸۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ افزایش نرخ جریان عبوری از توده سنگ با افزایش ۵ درصدی در هر یک از پارامترهای مدل ۱۱
- شکل ۱-۲ مدل متعامد سه بعدی ۱۶
- شکل ۲-۲ صفحات شکستگی نامحدود با فاصله داری و جهت داری تصادفی ۱۷
- شکل ۳-۲ تولید مدل درزه درشویتز الف- فرایند صفحه‌ی سه بعدی پواسون ب- فرایند خط پواسون ۱۷
- شکل ۴-۲ مدل بیچر (مدل بلوم) ۱۸
- شکل ۵-۲ مدل توسعه یافته‌ی بیچر ۱۹
- شکل ۶-۲ مدل زایشی حول یک نقطه‌ی تصادفی ۱۹
- شکل ۷-۲ مثالی از رابطه فراوانی و بازشدگی ۳۱
- شکل ۸-۲ نسبت بازشدگی به طول اثر در مقادیر مختلف ممان دوم b ۳۴
- شکل ۱-۳ جریان در میان دو صفحه صاف و موازی ۴۸
- شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیای و راه‌های دسترسی ساختگاه سد پارسیان ۵۹
- شکل ۲-۴ نمایی از موقعیت گسل FU و گمانه‌ی ۱۵ ۶۲
- شکل ۳-۴ جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشمیت ۶۴
- شکل ۴-۴ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته درزه ۱ ۶۷
- شکل ۵-۴ تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت شده، دسته درزه ۱ ۶۸

- شکل ۴-۶ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۲ ۶۸
- شکل ۴-۷ تابع توزیع نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۲ ۶۹
- شکل ۴-۸ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۳ ۷۰
- شکل ۴-۹ تابع توزیع لاگ‌نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۳ ۷۱
- شکل ۴-۱۰ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۴ ۷۱
- شکل ۴-۱۱ تابع توزیع لاگ‌نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۴ ۷۲
- شکل ۴-۱۲ نمایی از برداشت‌های خطی و پنجره‌ای انجام شده ۷۳
- شکل ۴-۱۳ نمایی از برداشت پنجره‌ای به روش محاسبه P_{21} ۷۴
- شکل ۴-۱۴ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش بازشدگی گمانه ۱۵ ۷۶
- شکل ۴-۱۵ مدل DFN متشکل از ۱۱۲۱ درزه در بلوک ۱۰ مترمکعبی ۸۰
- شکل ۴-۱۶ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ با استفاده از $Roclab$ ۸۲
- شکل ۴-۱۷ نمایی از جایگذاری مدل DFN در عمق ۶۵ متری زمین ۸۳
- شکل ۴-۱۸ رابطه تجربی بین لوژان و نفوذپذیری (کرد نظیری، ۱۳۹۰) ۸۸
- شکل ۴-۱۹ نمایی از مدل DFN بعد از اعمال جریان سیال در جهت xx ۹۰
- شکل ۴-۲۰ مدل DFN بعد از اعمال جریان سیال در جهت zz ۹۰
- شکل ۴-۲۱ تعیین REV ۹۳
- شکل ۴-۲۲ نمایی از مدل مکعب معادل با مدل DFN ۹۴
- شکل ۴-۲۳ نمایی از مدل مکعب معادل با مدل DFN همراه اعمال جریان سیال ۹۵
- شکل ۴-۲۴ مقطع دوبعدی مدل DFN ۹۷
- شکل ۴-۲۵ نمودار روند تغییرات نفوذپذیری نسبت به تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل DFN ۱۰۰
- شکل ۴-۲۶ نمودار روند تغییرات نفوذپذیری نسبت به تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل

مکعبی با $\lambda=1$ ۱۰۱

شکل ۴-۲۷ روند تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل DFN نسبت به تغییرات بازشدگی

شکستگی‌ها در مدل مکعب ۱۰۱

شکل ۴-۲۸ رابطه بین فراوانی شکستگی داری یا فاصله‌داری و بازشدگی شکستگی‌ها در مدل

مکعب ۱۰۲

شکل ۴-۲۹ نمایی از بازشدگی و فاصله‌داری بر حسب نفوذپذیری در مدل مکعبی ۱۰۴

فصل اول

کلیات

طراحی و تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی نظیر تونل‌ها، مغارهای ذخیره‌سازی، پی و مغارهای نیروگاهی سدها، فضاهای مربوط به فعالیت‌های محیط زیستی مثل دفن زباله‌های خطرناک و باطله فعالیت‌های هسته‌ای، نفت و انرژی ژئوترمال همواره با مشکلات عدیده‌ای روبرو است. یکی از مواردی که چنین تحلیل‌هایی را با عدم قطعیت همراه می‌کند وجود آب زیرزمینی است. در حین احداث فضاهای زیرزمینی در توده‌های سنگی ناپیوسته، آب زیرزمینی از طریق ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود در توده سنگ به داخل فضا راه پیدا می‌کند و باعث بروز مشکلات فراوانی از جمله تاثیر بر خواص ژئومکانیکی سنگ، کاهش ضریب پایداری ساختاری در توده سنگ‌های اطراف تونل، سختی کار در شرایط آبدار برای کارکنان، اثرات زیست‌محیطی نشت آب به تونل‌ها یا فرار آب از تونل‌های تحت فشار می‌شود. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی رفتار هیدرولیکی توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی‌ها است. برای محدود کردن محدوده مورد مطالعه لازم است که محدوده معرف مشخص شود. حجم المان معرف^۱ (REV) عبارت است از حداقل حجم موردنظر برای انجام آزمایش‌های برجا و مدل‌سازی‌های عددی که معرف حجم کل توده سنگ باشد و مقادیر اندازه‌گیری شده را بتوان بدون ایجاد خطا به کل محدوده مورد مطالعه نسبت داد. یک REV را زمانی می‌توان محاسبه کرد که با اضافه یا کم کردن اندازه مدل، تغییر محسوس در نفوذپذیری معادل به وجود نیاید و تقریباً ثابت باقی بماند. یکی از روش‌های مدل‌سازی هندسی شکستگی‌های توده سنگ روش شبکه شکستگی مجزا^۲ (DFN) است. برای ساخت مدل DFN از روش‌های آماری برای ایجاد شکستگی‌ها در یک محدوده تعیین شده

^۱ Representative Elementary Volume (REV)

^۲ Discrete fracture network (DFN)

(یک بلوک با ابعاد مشخص) استفاده می‌شود. در حالت کلی ساخت شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی شکستگی‌های موجود در منطقه، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود. در این روش برای هر دسته شکستگی اصلی، تعدادی شکستگی مجزا با استفاده از توابع توزیع مربوط به پارامترهای هندسی ساخته می‌شود. این پارامترهای هندسی شامل تابع طول^۱ شکستگی، جهت‌داری^۲، فاصله‌داری^۳ و بازشدگی^۴ است که برای هر یک از دسته‌های شکستگی اصلی به‌طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. با تخصیص پارامترهای هندسی به هر شکستگی بر اساس توابع توزیع و ایجاد تعداد مشخصی شکستگی، مدل هندسی شبکه شکستگی به دست می‌آید. بعد از ساخت مدل هندسی شبکه شکستگی، با اعمال قوانین رفتار هیدرولیکی بر روی شکستگی‌های موجود در محدوده، مدل ناپیوسته هیدرولیک توده سنگ حاصل می‌شود. انتظار می‌رود مدل *DFN* بتواند با تعریف پارامترهای توده سنگ درزه‌دار در پیش‌بینی مقدار جریان سیال به‌وسیله شبیه‌سازی هیدرولیکی و ارایه روابط تجربی بر اساس این مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Jafari and Babadagli, 2012; Baghbanan and Jing, 2007).

۲-۱ هدف از انجام پژوهش

این پژوهش به‌منظور تخمین آب‌گذری توده سنگ ساختگاه سد پارسیان و تعمیم آن به توده سنگ‌ها و پروژه‌های مشابه انجام می‌شود. هدف عمده این پژوهش ارایه رابطه‌های تجربی با استفاده از مدل‌های *DFN* است که برای رسیدن به این هدف باید تحلیل‌های آماری روی داده‌های برداشتی را به بهترین نحو انجام داد تا مدل *DFN* نهایی که یک مدل نزدیک به واقعیت از ساختار هندسی و نفوذپذیری ساختگاه است مطابقت خوبی با داده‌های آزمایش لوژان داشته باشد. درنهایت این مدل *DFN* و مدل مکعبی معادل آن می‌تواند اساس ارایه رابطه‌های تجربی برای برآورد نفوذپذیری باشد. با ارایه این رابطه‌های تجربی می‌توان آب‌گذری توده سنگ را بدون نیاز به مدل‌سازی‌های عددی وقت‌گیر و تنها

¹ Persistence or size

² Orientation

³ Spacing

⁴ Aperture

در صورت وجود داده‌های مربوط به پارامترهای هندسی توده سنگ در پروژه‌های تونلی، مغار و سد پیش‌بینی کرد.

۳-۱ ضرورت انجام پژوهش

روش‌های پیش‌بینی جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی را از دیدگاه مدل‌سازی می‌توان به دو دسته مدل‌های پیوسته و ناپیوسته تقسیم‌بندی کرد. مدل‌سازی‌های پیوسته به دو صورت تحلیلی و عددی المان مرزی، المان محدود و تفاضل محدود برای محاسبه جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند. ارزیابی مدل‌های پیوسته برای پیش‌بینی جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی حاکی از عملکرد و دقت نامناسب این مدل‌هاست. این مساله برای تونل‌های حفر شده در توده سنگ‌های دارای شکستگی به شدت بارز بوده به گونه‌ای که نتایج اکثر پیش‌بینی‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای با مقادیر واقعی اختلاف دارند. اغلب مدل‌های عددی، شکستگی‌ها را با طول نامحدود فرض کرده و آن‌ها را به صورت موازی فرض می‌کنند، که این دو مورد از جمله دلایل عدم انطباق این مدل‌ها با مدل‌های طبیعی است. برای رفع مورد آخر و رسیدن به نتایج با قابلیت اعتماد بالاتر، می‌توان از روش‌های عددی ناپیوسته استفاده کرد که هندسه شکستگی‌ها همخوانی مناسبی با وضعیت واقعی داشته باشد. در حال حاضر چنین شرایطی تنها با استفاده از مدل شبکه شکستگی مجزا قابل‌دستیابی است. این مدل‌سازی‌ها در قالب مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام می‌شوند. از جمله معایبی که مدل‌سازی‌های دوبعدی نسبت به مدل‌های سه‌بعدی دارند می‌توان به عدم امکان وارد کردن ساختار کلی ناپیوستگی‌ها از جمله جهت شیب و شدت حجمی^۱ آن‌ها اشاره کرد. در این تحقیق رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی‌ها در پیرامون حفريات زیرزمینی با استفاده از روش مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرد، از این رو یک مدل هندسی از شکستگی مجزای تصادفی سه‌بعدی ارائه خواهد شد. نکته کلیدی استفاده از شبکه شکستگی مجزا برای

¹ Intensity

مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ، برآورد مناسب ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها است. مهم‌ترین مشخصه هندسه شکستگی‌ها از نظر هیدرولیکی مقدار بازشدگی شکستگی است که برای هر دسته شکستگی مجزا با استفاده از توابع توزیع مربوط به مشخصات هندسی تعریف می‌شود. جریان سیال در شبکه شکستگی‌ها عاملی تاثیرگذار بر پایداری و جابجایی بلوک‌ها به‌ویژه در مناطقی با ماتریکس نفوذناپذیر است، در این شرایط شکستگی‌ها کنترل‌کننده‌ی اصلی انتقال سیالات اعم از آب، نفت و گاز هستند. در ضمن اهمیت موضوع جریان سیال در شبکه شکستگی‌ها تنها محدود به مطالعات اکتشاف و استخراج نفت و گاز و آب نمی‌شود بلکه امروزه در طراحی‌های پروژه‌های عمرانی از قبیل حفاری تونل، مکان‌یابی احداث سد و یا سایت‌های دفن زباله به‌ویژه دفن زباله‌های هسته‌ای نیز اهمیت ویژه‌ای یافته است (Baghbanan and Jing, 2007؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

هدف پروژه پیش رو تشخیص مهم‌ترین پارامترهای موثر در مقدار جریان آب در توده سنگ و درنهایت ارایه یک سری رابطه‌های تجربی برای تخمین مقدار جریان سیال بر مبنای چند پارامتر معرف شکستگی‌های توده سنگ است.

۱-۴ سابقه پژوهش

تحلیل جریان سیال در توده سنگ و برآورد آب‌گذری سابقه دیرینه دارد که در ذیل به آن پرداخته می‌شود. اما تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی در چند مورد اندک مشاهده شده و ارایه رابطه‌های تجربی به جز یک مورد که محدود به استفاده از مدل‌سازی‌ها در دو بعد بوده در موارد دیگر مشاهده نشده و در کل رابطه‌هایی برای تخمین آب‌گذری با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی تاکنون بررسی نشده است. مطالعات اخیر در زمینه‌ی جریان سیال بیشتر بر استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی‌های عددی متمرکز بوده است. ازجمله اولین روش‌های تحلیلی؛ روش‌های تحلیلی ارایه‌شده توسط گودمن^۱ و همکاران (۱۹۶۵) برای آب‌گذری

¹ Goodman

تونل‌های زیر سطح ایستایی است. فریزر و چری^۱ (۱۹۷۹) و هیوور^۲ (۱۹۹۱) تصحیحاتی را بر معادله گودمن در زمینه‌ی تخمین میزان آب ورودی به تونل‌ها لحاظ کردند و به این نتیجه رسیدند که میزان دبی نفوذی به تونل به اندازه‌ی ۳۰ تا ۴۰ درصد با آنچه از رابطه گودمن به دست می‌آید، متفاوت است. تیم^۳ (۱۹۹۸) با ارایه معادله‌ای بر مبنای قانون دارسی برای جریان ورودی به چاه و لی^۴ (۱۹۹۹) در تکمیل تحقیقات رت^۵ (۱۹۹۹) معادله‌ای برای محاسبه میزان نشت آب به درون تونل‌ها برای جریان پایدار درازمدت ارایه دادند. بعد از آن‌ها کارل سرود^۶ (۱۹۹۹) با مطالعه روی معادله گودمن و ال‌تانی^۷ (۱۹۹۹) روش‌هایی را برای بررسی مشکل نشت آب به درون تونل ارایه دادند. روش *SGR*^۸ روشی است که به رده‌بندی کمی و کیفی ساختگاه تونل بر اساس مطالعات اولیه ساختگاه می‌پردازد و اولین بار توسط کتیبه و عالی انوری در سال ۱۳۸۵ ارایه شد. نخستین مدل‌های شبکه شکستگی مجزا در حدود سی سال پیش توسط لانگ^۹ و همکاران (۱۹۸۵) به وجود آمد و بهینه‌سازی و توسعه این مدل‌ها تا به امروز ادامه داشته است، این در حالی است که برای اولین بار مدل دوبعدی جریان نیز توسط لانگ و همکاران (۱۹۸۵) به شبکه سه‌بعدی گسترش داده شد. لابسویچ^{۱۰} (۱۹۹۸) شبکه شکستگی‌های توده سنگ را به‌عنوان مسیرهای ذاتی جریان سیال در توده سنگ معرفی و بررسی کردند. فرهادیان (۱۳۸۸) با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی (المان مجزا-نرم‌افزار *UDEC*) که قابلیت کاربرد در محیط ناپیوسته و انجام تحلیل هم‌زمان هیدرولیکی را دارند، میزان نشت آب زیرزمینی به تونل امیرکبیر را بررسی کرده است. سپس، نتایج حاصله را با نتایج حاصل از رده‌بندی ساختگاه تونل به کمک روش *SGR* مقایسه کرده است. ملایوسفی (۱۳۸۸) ابتدا مناسب‌ترین توابع توزیع احتمال برای پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده سنگ را تعیین کرده است، سپس با استفاده از توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی‌ها و روش شیبیه-سازی مونت کارلو،

¹ Freezr & Chery

² Heuer

³ Theim

⁴ Lie

⁵ Rat

⁶ Kar Isrud

⁷ El-Tani

⁸ Site Groundwater Rating

⁹ Long

¹⁰ Lapcevic

تعدادی مدل DFN ساخته است، که در تعیین مدل عددی جریان سیال به داخل شبکه شکستگی‌های مجزا، بررسی تانسور نفوذپذیری و مدل‌سازی میزان تولید مخازن هیدروکربوری عمیق کاربرد دارد. باغبانان و جینگ (۲۰۰۸) تاثیر اندازه تنش روی نفوذپذیری و تغییر شکل توده سنگ و طول شکستگی‌های توده سنگ و نیز رابطه‌ی همبستگی پارامترهای بازشدگی و طول اثر را بررسی کردند (Baghbanan and Jing, 2008). جولایی و باغبانان (۱۳۸۹) کدهای کامپیوتری $FRACIUT^2D$ و $FRACIUT^3D$ را به منظور تولید شبکه شکستگی مجزای دوبعدی و سه‌بعدی توسعه دادند. فرهمند و شهریار (۱۳۹۰) نفوذپذیری وابسته به تنش توده سنگ را بررسی کردند. شمس (۱۳۹۲) به منظور افزایش سرعت محاسبات و کاهش پیچیدگی در مساله تحلیل جریان در شبکه شکستگی اطراف حفریات زیرزمینی، از روش اتومات سلولی به عنوان یک ابزار کمکی مفید در ترکیب با روش DFN ، جریان ورودی به درون مغار نیروگاه و ترانسفورمر پروژه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه را مدل کرده است. جوادی و شریف‌زاده (۱۳۹۲) کد محاسباتی $FNETF$ را برای ساخت شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال توسعه داده‌اند (جوادی و شریف‌زاده، ۱۳۹۱).

کوه^۱ و همکاران، ژاو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) و کوینکا^۳ (۲۰۱۳) قوانینی را برای جریان سیال در شبکه شکستگی مجزا بررسی و ارایه کردند. بیللوکس^۴ و همکاران (۱۹۸۹)، مالدون^۵ و همکاران (۱۹۹۸) و (۲۰۰۱)، پایلت^۶ (۱۹۹۳) و تات^۷ (۲۰۱۰) ساخت شبکه‌های شکستگی مجزا که می‌تواند به وسیله داده‌های حاصل از روش خط برداشت، پنجره برداشت، لاگ گمانه‌ها، پردازش عکس‌ها و آنالیزهای آماری و استفاده از تابع‌های چگالی احتمال^۸ شدت و چگالی، جهت‌داری، فاصله‌داری، موقعیت و اندازه شکستگی‌ها انجام شود را بررسی کردند. لاکنبی^۹ و همکاران (۲۰۰۵)، لیو و فان^{۱۰} (۲۰۱۲) و ساکریگلای^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۲) حالت واقعی شکستگی‌ها را که ممکن است دقیقاً همان

^۱ Koh

^۲ Zhao

^۳ Cuenca

^۴ Billau

^۵ Mauldon

^۶ Paillet

^۷ Tóth

^۸ probability density function (PDFs)

^۹ Lackenby

^{۱۰} Liu & fan

^{۱۱} Tsakiroglou

مدل صفحه موازی ارایه شده نباشد و همچنین پیچ و خم دار بودن شکستگی‌ها، ارتباط شکستگی‌ها به هم، پرکننده‌ها و شکستگی‌ها متغیر که می‌توانند نقش مهمی در تعیین توزیع جریان آب در شبکه شکستگی داشته باشد را بررسی کردند. سانگ^۱ (۱۹۸۴)، ناکایو^۲ و همکاران (۲۰۰۰)، کولدیز^۳ (۲۰۰۱)، کویاما^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، جوادی و همکاران (۲۰۱۰)، لمرچاند^۵ (۲۰۱۰)، پن^۶ و همکاران (۲۰۱۱) و لاوروف^۷ (۲۰۱۳) از جمله کسانی هستند که قانون‌های جریان سیال در یک شکستگی تنها (بررسی جریان سیال در تک درزه) را بررسی کرده‌اند (Baghbanan and Jing, 2007).

همان‌طور که در ابتدای این بخش هم به آن اشاره شد از جمله پژوهش‌های صورت گرفته مربوط به ارایه رابطه‌های تجربی توسط مدل‌های دوبعدی می‌توان به کار جعفری و تحلیل حساسیت به وسیله مدل‌های سه‌بعدی، می‌توان به کار ایوارس^۸، باغبانان و درنهایت جوادی و همکاران اشاره کرد که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

ایوارس (۲۰۰۶) با استفاده از نرم‌افزار *DEC*^۳ به مطالعه تاثیر عدم قطعیت‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی بکار گرفته شده در مدل‌سازی عددی جریان آب ورودی به یک تونل پرداخت. او با تغییر پارامترهای ورودی در نرم‌افزار، میزان تغییرات نرخ جریان آب وردی به یک تونل دایره‌ای سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داد (Ivars, 2006).

مطالعه انجام‌شده توسط باغبانان بیشتر روی تخمین نفوذپذیری سنگ‌های شکسته به وسیله رابطه بین بازشدگی شکستگی‌های توزیع‌شده و طول اثر آن‌ها متمرکز بوده تا این که به ارایه رابطه تجربی بپردازد. به این صورت که وی تاثیر گشتاور دوم (انحراف استاندارد) توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی روی وجود *REV* و امکان‌پذیری تانسور نفوذپذیری معادل توده سنگ شکسته، به وسیله شبیه‌سازی تعداد زیادی مدل *DFN* با تغییر اندازه و ویژگی‌های شکستگی‌ها (با اندازه و ویژگی‌های مختلف)

¹ Tsang

^۲ Nakao

³ Kolditz

^۴ Koyama

⁵ Lemarchand

^۶ Pan

⁷ Lavrov

⁸ Ivars

بررسی شده است. در مدل سازی DFN فرض می شود که ویژگی های هندسی شکستگی ها مانند موقعیت، طول اثر، جهت داری و بازشدگی به صورت آماری توزیع شده اند. در اکثر بررسی های انجام شده، این ویژگی ها غیر همبسته هستند. این مطالعه با در نظر گرفتن تاثیر ارتباط درونی پارامترها به ویژه بین بازشدگی هیدرولیکی و طول اثر شکستگی روی نفوذپذیری معادل و احتمال ارایه تانسور می پردازد (Baghbanan and Jing, 2007).

بررسی های جعفری و باباداغلی روی یکی از مسایل بحرانی تحت عنوان تخمین عملی نفوذپذیری معادل شبکه شکستگی^۱ ($EFNP$) با استفاده از نرم افزار تجاری $FRACA$ تمرکز دارد. روند کلی مطالعه انجام شده به وسیله جعفری به این صورت است که ابتدا یک بررسی بر روی رابطه بین پارامترهای آماری و فرکتال هندسه شبکه شکستگی و نفوذپذیری شبکه شکستگی صورت گرفته و سپس بر اساس ویژگی های آماری و شبکه های شکستگی فرکتال، ۱۲ الگوی دوبعدی شکستگی که به صورت تصادفی تولید شده است نسبت به نفوذپذیری آزمایش می شود و رابطه های بین آن ها به دست می آید. تقریباً نیمی از ویژگی های نشان داده شده یک رابطه قوی با نفوذپذیری معادل شبکه شکستگی دارند. رابطه ها و نسبت های به دست آمده از تحلیل های برگشتی^۲ چند متغیره روی انواع شبکه های شکستگی تصادفی مختلف و الگوهای شکستگی طبیعی آزمایش می شود. در این پروژه مشخصات شبکه شکستگی شامل چگالی^۳، طول، جهت داری، اتصال و بازشدگی بررسی شده اند. در نهایت از توانایی شبکه عصبی مصنوعی^۴ برای به دست آوردن رابطه های غیرخطی و پیچیده بین پارامترهای فرکتال- آماری و نفوذپذیری معادل شبکه شکستگی دوبعدی برای بهبود مدل های پیش بینی $EFNP$ تجربی استفاده شده است. پس از به دست آوردن این شبکه، از آن برای پیش بینی $EFNP$ استفاده شده است. در آنالیز حساسیت انجام گرفته مشخص شد که بعد فرکتال بیشترین تاثیر را بر نفوذپذیری مدل ها در مقایسه با دیگر پارامترهای شبکه ی شکستگی دارد. همچنین در بین چهار پارامتر اندازه، چگالی،

¹Equivalent Fracture Network Permeability ($EFNP$)

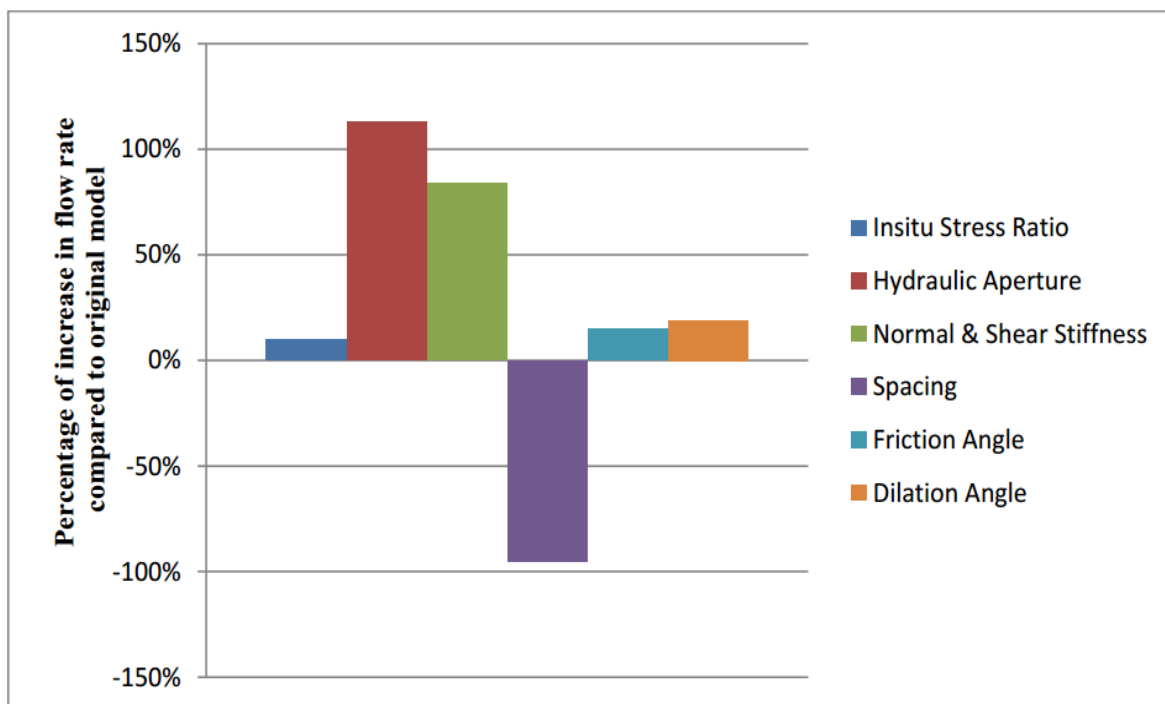
²Regression

³ Density

⁴ Artificial Neural Networks (ANN)

جهت‌داری و بازشدگی درزه‌ها، چگالی و اندازه‌ی شکستگی‌ها بیشترین تاثیر را بر نفوذپذیری مدل‌ها دارند. با کاهش چگالی و اندازه درزه‌ها از یک حد معینی، بازشدگی (هدایت هیدرولیکی) درزه‌های تکی تاثیرگذارترین پارامتر شبکه در نفوذپذیری مدل‌ها هستند. در واقع آن‌ها پیشنهاد کردند که در بررسی نفوذپذیری و هدایت جریان شبکه تاثیر پارامترهای شبکه (چگالی و طول شکستگی‌ها) نسبت به ویژگی‌های تک درزه‌ها همچون بازشدگی بیشتر است.

این نکته در مورد شبکه‌هایی با چگالی و اندازه بزرگ‌تر و درزه‌هایی با بازشدگی زیاد هم صدق می‌کند. همچنین مشاهده شد که *ANN* یک روش قوی‌تر نسبت به تحلیل‌های رگرسیون چند متغیره در کنترل مسایل غیرخطی و پیچیده است. رابطه‌های به‌دست‌آمده و آزمایش‌شده نیز می‌تواند برای محاسبه تانسور *EFNP* در دو بعد به‌طور موثر و دقیق مفید باشد (Jafari and Babadagli, 2012). جوادی و شریف‌زاده (۲۰۱۱) با تحلیل هیدرومکانیکی سنگ پی سد گتوند با استفاده از نرم‌افزار *DEC*^۳ و انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای تاثیرگذار بر نرخ جریان آب عبوری از پی سد به این نتیجه رسیدند که افزایش بازشدگی درزه و نسبت تنش اعمالی به توده سنگ، به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر نرخ جریان عبوری از توده سنگ دارند.



شکل ۱-۱ افزایش نرخ جریان عبوری از توده سنگ با افزایش ۵ درصدی در هر یک از پارامترهای مدل

(فرهمند، ۱۳۹۰)

در این مطالعه به منظور بررسی عدم قطعیت‌هایی که در اندازه‌گیری‌های پارامترهای موثر بر جریان عبوری موجود است، در هر مرحله با ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر مدل به ترتیب یکی از پارامترهای تاثیر گذار به اندازه ۵ درصد افزایش یافته و تاثیر این افزایش در نرخ جریان عبوری از مدل بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تاثیر سه پارامتر بازشدگی، سختی‌های نرمال و برشی و فاصله‌داری نشان داده شده در شکل بیشتر از سایر پارامترها است. (فرهمند، ۱۳۹۰).

۵-۱ روش تحقیق

در این پایان‌نامه ابتدا دلایل لزوم استفاده از مدل‌سازی عددی و برتری این روش به سایر روش‌ها تشریح می‌شود. سپس با تمرکز بر توده سنگ ساختگاه سد مخزنی پارسیان توابع توزیع آماری مربوط به هریک از مشخصات ناپیوستگی‌ها به وسیله نرم‌افزارهای آماری *Easyfit* و *Minitab* با توجه به اولویت قرار دادن توزیع‌های مورد استفاده در سایر پروژه‌های موجود تعیین می‌شود. سپس با استفاده

از نرم افزارهای ساخت DFN^1 یک مدل DFN که معرف شرایط واقعی زمین در اطراف تونل یا سد است، ساخته می شود. در گام بعد، با تحلیل جریان سیال و اعتبارسنجی به وسیله آزمایش لوژان یک مدل واقعی از نفوذپذیری ساختگاه سد ارایه می شود. در ادامه یک مدل ساده و منظم به عنوان مدل مکعبی که تنها بر اساس پارامترهای طول (اندازه) بلوک ها و بازشدگی شکستگی ها است به گونه ای ارایه می شود، که در آن قابلیت هدایت هیدرولیکی سیال برابر با مدل DFN اصلی باشد. سپس تعدادی مدل DFN بر اساس حالت های مختلفی از شرایط توده سنگ که به صورت تغییر یک یا چند پارامتر مربوط به مشخصات شکستگی ها است، ساخته می شود.

در نهایت تحلیل های حساسیت با تمرکز بر تاثیر پارامترهای بازشدگی و P_{33} (این پارامتر برابر با حجم درزه ها و به صورت مجموع حاصل ضرب سطح هر درزه در بازشدگی آن بر حجم واحد تعریف می شود) در مقدار جریان سیال انجام می شود و یک سری رابطه های تجربی به منظور برآورد آب گذاری توده سنگ ارایه خواهد شد.

۶-۱ ساختار پژوهش

این کار پژوهشی به عنوان پایان نامه ی کارشناسی ارشد در ۵ فصل تهیه و تدوین می شود. در فصل اول با عنوان کلیات به صورت خلاصه به عناوینی مشتمل بر هدف، ضرورت، سابقه و روش پژوهش پرداخته می شود.

در فصل دوم فرضیات و پارامترهای هندسی تولید شبکه ی شکستگی مجزا و نیز برخی توابع توزیع آماری تشریح می شود.

در فصل سوم اصول جریان در محیط های سنگی شامل جریان در تک درزه، محیط متخلخل و محیط درزه دار و مبانی جریان سیال در DEC^3 در حد لزوم بحث شده است.

در فصل چهارم ابتدا پروژه سد پارسیان معرفی می شود و در ادامه روند تعیین توابع توزیع

¹ DFN generator

آماري به‌وسيله نرم‌افزارهاي *Esay-fit* و *Minitab*، ساخت و ارايه مدل‌هاي *DFN* و مدل مکعبي متناظر آن به‌وسيله نرم‌افزار *3DEC* و محاسبه نفوذپذيري معادل با استفاده از *3DEC* تشریح می‌شود. در فصل پنجم خلاصه‌ای از نتایج پایان‌نامه آورده می‌شود و پیشنهادهایی در مورد مباحثی که می‌تواند در راستای تکمیل و جبران کاستی‌های این پژوهش انجام شود، ارايه می‌شود.

فصل دوم

عوامل موثر بر جریان سیال در شبکه‌ی شکستگی مجزا

۱-۲ مقدمه

در تمامی مسایل مهندسی سنگ به‌ویژه مطالعه جریان سیال از درون توده سنگ درزه‌دار، توصیف هندسی و شبیه‌سازی هندسی توده سنگ از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مراحل مطالعه هستند. در توده سنگ‌های اطراف فضاهای زیرزمینی، شکستگی‌های طبیعی کنترل‌کننده جریان سیال هستند،

زیرا سیال می‌تواند از طریق آن‌ها با سرعت بیشتر و در فاصله بیشتری نسبت به خلل و فرج سنگ جریان و انتقال یابد (Jafari and Babadagli, 2012). لذا تخمین دقیق‌تر ویژگی‌های جریان در شبکه‌های شکستگی در مدل‌سازی‌های جریان سیال و تراوایی توده سنگ‌های درزه‌دار اطراف فضا‌های زیرزمینی بسیار حایز اهمیت است. بهترین روش‌هایی که به‌صورت متداول در شبیه‌سازی جریان سیال در توده سنگ‌های درزه‌دار فضا‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل روش‌های تخلخل دوگانه و شبکه‌ی شکستگی مجزا است.

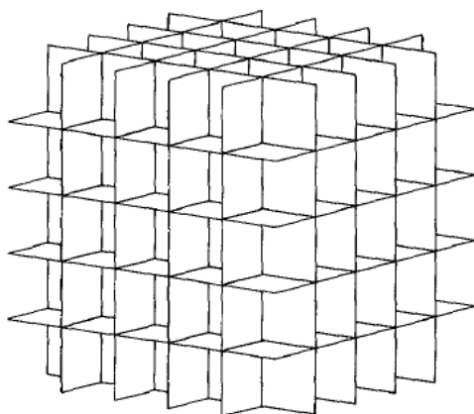
در روش تخلخل دوگانه جریان سیال هم در شبکه‌ی شکستگی‌ها و نیز به‌طور جزئی در خلل و فرج سنگ جریان پیدا می‌کند. این روش محدودیت‌هایی در گرفتن ساختار پیچیده‌ی شکستگی‌ها دارد، هرچند روش مناسبی برای تشریح اندرکنش پیچیده‌ی بین ماتریکس و شکستگی‌ها است. از سوی دیگر روش شبکه شکستگی مجزا در توصیف و تعریف ساختار پیچیده‌ی شبکه‌ی شکستگی‌ها بسیار مفید است. مدل‌های *DFN* قابلیت بالاتری در توصیف و نشان دادن ارتباط بین شکستگی‌ها در شبکه‌ی شکستگی نسبت به روش تخلخل دوگانه دارند (Dershowitz et al, 2000). در این فصل مدل‌های جریان در شبکه‌ی شکستگی مجزا و اصول حاکم بر روند ساخت مدل‌های *DFN* و نیز مهم‌ترین پارامترهای موثر در ساخت این مدل‌ها تشریح می‌شود.

۲-۲ مدل جریان شبکه شکستگی‌های مجزا (*DFN*)

اساس روش شبکه شکستگی مجزا بر این فرض است که جریان و انتقال آب در سنگ‌های بلوری^۱ بیشتر در شکستگی رخ می‌دهد. بنابراین این روش شکستگی‌های تکی موجود در سنگ را شبیه‌سازی و جریان را برای مجموعه‌ای از این شکستگی‌های به هم پیوسته حل می‌کند. در این بخش خلاصه‌ای از چند مدل مفهومی شبکه‌های شکستگی مجزا که به‌منظور نشان دادن شبکه‌ی شکستگی‌ها ابداع شده‌اند، ارائه می‌شود. بیشتر مدل‌های موجود که به‌عنوان اساس روش شبکه

^۱ Crystalline

شکستگی مجزا ارایه شده‌اند بر اساس مدل ارایه شده‌ی درشویتز و اینشتین^۱ (۱۹۸۸) و اشلایس^۲ (۱۹۸۸) است. در مدل‌های اولیه به‌عنوان مثال مدل‌های اسنو^۳ (۱۹۶۹)، شبکه‌ی شکستگی به‌وسیله‌ی مجموعه‌ای از صفحات نامحدود متعامد با فاصله‌داری ثابت یا تصادفی نشان داده شده‌اند (شکل ۲-۱).^۴



شکل ۲-۱ مدل متعامد سه‌بعدی (Dershowitz and Einstein, 1988)

در مدل‌های صفحه‌ی پواسون (یا خط پواسون در دو بعد) که پریست و هادسون^۴ (۱۹۷۶) برای اولین بار به کار بردند، فاصله‌ی یک صفحه‌ی شکستگی نامحدود از یک مبدا دلخواه یک فرایند پواسون است و احتمال جهت‌داری آن‌ها نیز به‌صورت یک توزیع ناهمسانگرد تصادفی است (شکل ۲-۲). این مدل توسط اندرسون^۵ و همکاران (۱۹۸۴) و اندرسون و تانویک^۶ (۱۹۸۶) و محققانی دیگر مورد استفاده قرار گرفت. شکستگی‌ها با اندازه‌ی نامحدود باعث می‌شود که چگالی شبکه‌ی شکستگی وابسته به‌اندازه باشد (Priest and Hudson, 1976).

^۱ Dershowitz and Einstein

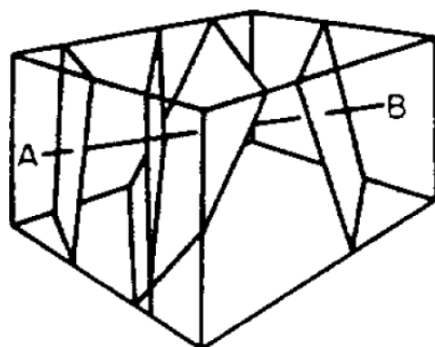
^۲ Schleiss

^۳ Snow

^۴ Priest and Hudson

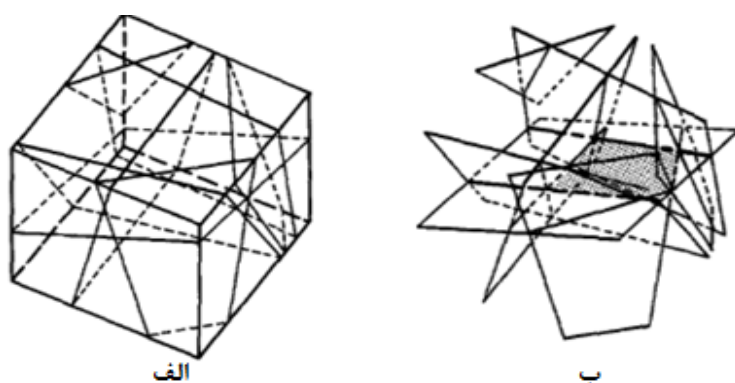
^۵ Andersson

^۶ Andersson and Thunvik



شکل ۲-۲ صفحات شکستگی نامحدود با فاصله‌داری و جهت‌داری تصادفی (Priest and Hudson, 1976)

شبکه‌هایی از شکستگی‌های با اندازه‌ی محدود می‌تواند توسط صفحات مدل پواسون ایجاد شود (Dershowitz and Einstein, 1988). مدل درشویتز به‌وسیله دو فرایند ساخته می‌شود (شکل ۲-۳). فرایند اول تعریف صفحات درزه به‌وسیله‌ی فرایند صفحه‌ی پواسون که موقعیت آن‌ها به‌صورت یکنواخت توزیع شده و جهت‌داری آن‌ها نیز تابع یک توزیع مشخص است. تقاطع بین این صفحات به‌صورت خطوطی روی هر صفحه‌ی درزه نشان داده می‌شود که این خطوط درنهایت یک چندضلعی را می‌سازند. فرایند دوم مربوط به شناسایی و تعریف بخش تداوم یا پایایی چندضلعی صفحه‌ی درزه است. لبه‌های درزه توسط تقاطع صفحات درزه‌ها تعریف می‌شوند.

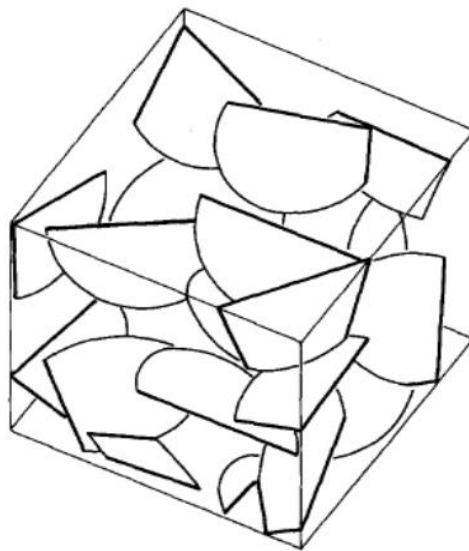


شکل ۲-۳ تولید مدل درزه درشویتز الف- فرایند صفحه‌ی سه‌بعدی پواسون ب- فرایند خط پواسون

بیچر و همکاران در سال ۱۹۷۷ بر اساس مدل بلوم^۱ که از شکستگی‌های محدود ساخته شده،

^۱ Boolean

اقدام به شبیه‌سازی شبکه‌های شکستگی مجزا نمودند. مدل آن‌ها اخیراً به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکستگی‌ها عمدتاً به‌صورت دیسکی شکل و توسط قطر و جهت‌داری‌شان در یک فضا و به‌صورت تصادفی بر اساس توزیع پواسون مشخص می‌شوند. از آنجا که مشخصات شکستگی‌های تکی پارامترهای ورودی مدل هستند، توزیع آن‌ها به آسانی می‌تواند با داده‌های میدانی تطابق داشته باشد. در مدل‌های بلوم، اندازه‌ی شکستگی، جهت‌داری‌ها و موقعیت‌ها مستقل بوده و دارای توابع تصادفی فضایی ثابتی هستند. به این صورت مفهوم همبستگی و ناهمگنی فضایی به آسانی نشان داده می‌شود. کاربردهای دیگر مدل دیسکی بلوم در مطالعات لانگ و همکاران (۱۹۸۵) و اندرسون و ورس‌تورپ^۱ (۱۹۸۷) آورده شده است.

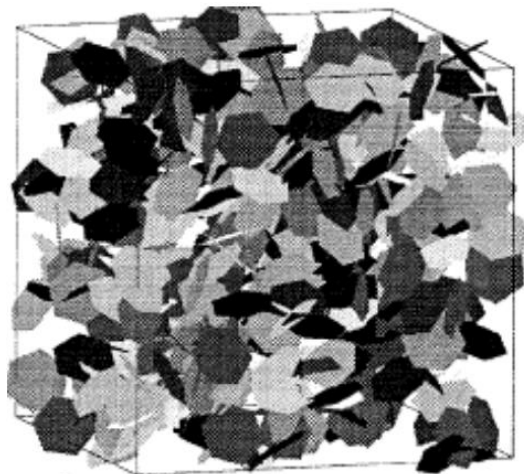


شکل ۴-۲ مدل بیچر (مدل بلوم) (Dershowitz and Einstein, 1988)

هیوزبی^۲ و همکاران (۱۹۷۷) مدل بیچر را برای شکستگی‌های چندضلعی تصادفی یا منظم توسعه دادند (شکل (۲-۵)).

^۱ Andersson and Dverstorp

^۲ Huseby



شکل ۲-۵ مدل توسعه یافته بیچر (Huseby et al, 1997)

لانگ و بیلوکس^۱ (۱۹۸۷) تغییرات چگالی شکستگی‌ها را در یک مدل شبکه‌ی شکستگی دوبعدی برای تولید تجربی واریوگرام‌های چگالی ارائه دادند. اولین مجموعه از نقاط پواسون به صورت احتمالاتی با چگالی ناهمگن فضایی تولید شده است. شکستگی‌های دیسکی شکل به صورت تصادفی در دسته‌هایی در اطراف هر هسته^۲ توزیع می‌شوند (شکل (۲-۶)).



شکل ۲-۶ مدل زایشی حول یک نقطه‌ی تصادفی (Billaux et al., 1989)

مدل‌های مفهومی تشریح شده‌ی فوق اساس نرم‌افزارهای تولید شبکه شکستگی مجزا هستند.

^۱ Long and Billaux

^۲ Seed

اخیرا محققان به پیشرفت‌های زیادی در توسعه این نرم‌افزارها دست یافته‌اند که برتری هریک از آن‌ها بر دیگری به قابلیت پارامترهای هندسی ورودی نرم‌افزار مربوط می‌شود.

۲-۳ تولید شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)

بر اساس بررسی انجام‌شده در زمینه‌ی جریان سیال در توده سنگ، ازجمله تاثیرگذارترین پارامترهای هندسی در مقدار آب‌گذری توده سنگ می‌توان به بازشدگی، چگالی، طول و جهت‌داری شکستگی‌ها اشاره کرد. در اغلب موارد داده‌های لازم برای تعیین این پارامترها، کافی نیستند و بیشتر محدود به اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس گمانه و رخنمون است. برای شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده سنگ، تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها امری ضروری است. به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده سنگ، هر خصوصیت هندسی با تابع توزیع احتمال خاصی در شبیه‌سازی هندسه توده سنگ معرفی می‌شود. در این بخش مواردی چون اختلاف‌نظرهای موجود در تخصیص توابع توزیع آماری به هر یک از پارامترها، که در موردهای مطالعاتی مختلف به یک پارامتر، توابع توزیع متفاوتی اختصاص یافته است، بحث می‌شود.

۲-۳-۱ ویژگی‌های موثر شکستگی‌ها بر جریان سیال در شبکه شکستگی

طبق تعریف ارایه شده توسط پریست^۱ یک ناپیوستگی شامل هر برش مکانیکی مشخص در سنگ می‌شود به عبارتی دیگر یک شکستگی با مقاومت کششی قابل چشم‌پوشی در سنگ، به عنوان ناپیوستگی تعریف می‌شود (Priest, 1993). از نظر زمین‌شناسی اصطلاح‌های مختلفی برای توصیف ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. پرایس^۲ گسل را به صورت «جابجایی‌های متفاوت توده سنگ روی هرکدام از صفحات ناپیوستگی به عنوان یک مشخصه بدیهی آن‌ها» و درزه‌ها را به صورت «ترک‌ها و شکستگی‌هایی در طول سنگ که خیلی کوچک و بدون جابجایی باشند مانند صفحات لایه‌بندی،

¹ Priest

² Price

کلیواژها، شکاف‌ها و دیگر ساختارها» تعریف کرده است (Price, 2015). در این بخش اصطلاح «شکستگی»^۱ به عنوان یک تعریف مشابه برای اصطلاح زمین‌شناسی «ناپیوستگی»^۲ که کاملاً هم یکسان نیستند، استفاده می‌شود. به عبارت دیگر شکستگی به کل ترک‌های طبیعی در سنگ اطلاق می‌شود که نه تنها شامل درزه‌ها بلکه شامل ماکروترک‌ها و میکروترک‌ها که بسته یا باز بودن آن‌ها مهم نیست نیز می‌شود. لایچ^۳ ماکروترک‌ها را به صورت شکستگی‌هایی که با چشم غیرمسلح دیده می‌شوند و میکروترک‌ها را شکستگی‌هایی که با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند، تعریف کرده است (Laubach, 1997).

۲-۳-۱-۱ جهت‌داری

جهت‌داری یک شکستگی می‌تواند توسط امتداد و زاویه شیب یا جهت شیب و زاویه شیب نشان داده شود. جهت‌داری همچنین به صورت خلاصه می‌تواند جهت نرمال شکستگی‌ها باشد. به هر حال کاستی نمودار رز^۴ این است که اطلاعاتی از زاویه شیب ندارد. از روش‌های استفاده شده برای نشان دادن جهت‌داری سه بعدی به طرح‌های استریو گرافیک و نیم کره‌ای می‌توان اشاره کرد (Duncan, 1981). یک خط را به وسیله یک نقطه و یک سطح را به وسیله یک منحنی در طرح نیم کره‌ای (صفحات دایره‌ای مشبک) می‌توان نشان داد. در عمل، کل شکستگی‌های یک دسته درزه موازی هم فرض می‌شوند در حالی که در واقع چنین نیست. در این حالت، جهت‌داری شکستگی‌ها شامل روش اندازه‌گیری، نوع توزیع و توصیف مدل‌ها معرفی می‌شود. جهت‌داری یکی از مهم‌ترین پارامترهای شکستگی‌ها است. به دلیل این که مشکل بودن محاسبه‌ی جهت‌داری‌های کل شکستگی‌ها، ضروری است که جهت‌داری شکستگی‌ها در محل‌هایی چون رخنمون‌ها، گمانه‌ها، ترانشه و امثال این‌ها اندازه‌گیری شده و یک مدل آماری نشان‌دهنده مشخصات جهت‌داری شکستگی‌های توده سنگ ارایه شود.

¹ Fracture

² Discontinuity

³ Laubach

⁴ Rose Diagram

محققان تعدادی از مدل‌ها را که از تناسب خوبی با داده‌های جهت‌داری برخوردارند، مانند توزیع فیشر^۱، توزیع بینگهام و توزیع نرمال نام برده‌اند. ولی عمدتاً از توزیع فیشر استفاده می‌کنند که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

در یک تحلیل اساسی از جهت‌داری‌های آماری، فرض می‌شود که تعدادی مقادیر جهت‌داری حول برخی مقادیر حقیقی (نزدیک به واقعیت) توزیع شده‌اند. این فرض معادل با شکستگی‌های طبیعی توزیع شده حول مقادیر واقعی در یک دسته (دسته‌درزه) است. توزیع چگالی احتمال می‌تواند به صورت رابطه (۱-۲) باشد:

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta \cdot e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (1-2)$$

که در آن، θ زاویه بین عمود بر یک شکستگی و مقدار واقعی آن است. به عبارتی θ زاویه انحراف از میانگین زاویه جهت‌داری است. k ثابت فیشر است که مقیاسی از درجه پراکندگی است. فیشر نشان داد که می‌توان k را به صورت زیر تخمین زد:

$$\frac{e^K + e^{-K}}{e^K - e^{-K}} - \frac{1}{K} = \frac{|r_n|}{N} \quad (2-2)$$

r_n بردار برآیند n تعداد بردار نرمال یکه شکستگی‌ها و N تعداد شکستگی‌ها در نمونه است. احتمال این که مقدار جهت‌داری تصادفی یک زاویه در فاصله بین θ_1 و θ_2 با جهت‌داری واقعی برابر باشد، به صورت زیر است (Chen and Tonon, 2012):

$$P(\theta_1 < \theta < \theta_2) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta) d(\theta) \quad (3-2)$$

۲-۱-۳-۲ اندازه شکستگی

اندازه یکی از مشکل‌ترین ویژگی‌های شکستگی‌ها در فرایند اندازه‌گیری دقیق مقدار آن است، زیرا تنها در حالتی که توده سنگ کاملاً عاری از هر نوع پوششی است، اندازه‌گیری اثر و سطح کامل هر شکستگی ممکن می‌شود. درعین حال این اصلاً با طبیعت توده سنگ سازگار نیست (Priest, 1993).

¹ Fisher

شکل شکستگی‌ها می‌تواند به صورت دیسک‌های دایره‌ای، بیضی، مربع، مستطیل و چندضلعی در نظر گرفته شوند. به دلیل مشکلات موجود در نمونه‌برداری سه‌بعدی شکستگی‌ها، فرضیه‌های ارائه شده در مورد شکل شکستگی‌ها، قابل اثبات یا رد نیست. معمولاً فرضیه‌های دیسکی یا مستطیلی شکل بودن شکستگی‌ها به علت شکل ساده‌ای که دارند استفاده می‌شوند. به دلیل شرایط مرزی ویژه، گاهی اوقات شکستگی‌ها به عنوان صفحات نامحدود تیغه مانند^۱، شکاف مانند^۲ و پولکی شکلی^۳ فرض می‌شوند. در اندازه‌گیری شکستگی‌ها، طول اثر که فصل مشترک شکستگی و رخنمون است اغلب به جای طول واقعی شکستگی اندازه‌گیری می‌شود. مشخصات و پارامترهای اندازه شکستگی‌ها را می‌توان به وسیله شکل، بعد صفحه‌ای یا سطحی (ارتفاع، قطر، طول اثر و ...)، بعد جنبشی یا حرکتی (بازشدگی، جابجایی، بالا زدگی و پایین رفتگی) و بعد فضایی (فاصله‌داری و فراوانی) توصیف کرد. در ادامه به تشریح برخی از مهم‌ترین توزیع‌های مورد استفاده پرداخته شده است (Chen and Tonon, 2012).

الف - توزیع نرمال^۴

توزیع نرمال که توزیع گاوس نیز نامیده می‌شود را می‌توان توسط دو پارامتر میانگین (μ) واریانس (σ^2) تعریف کرد. توزیع نرمال استاندارد، حالتی از توزیع نرمال با میانگین برابر با صفر و واریانس برابر با یک است. نمودار چگالی احتمال توزیع نرمال یک منحنی قوسی شکل مشابه با یک زنگوله و متناسب با میانگین است. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۴-۲)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع نرمال می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$P(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (۵-۲)$$

در این رابطه، Erf تابع خطا است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Blade-like

^۲ Slot-like

^۳ Penny-shaped

^۴ Normal

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (6-2)$$

ب- توزیع لاگ نرمال^۱

توزیع لاگ نرمال، توزیع احتمال یک دنباله‌ای از هر متغیر تصادفی است که لگاریتم آن به صورت نرمال توزیع شده است. اگر Y یک متغیر تصادفی با یک توزیع نرمال باشد، $X = \exp(Y)$ یک توزیع لاگ نرمال است؛ همچنین، اگر X به صورت لاگ نرمال توزیع شده باشد، $\log(X)$ به صورت نرمال توزیع می‌شود. تابع چگالی احتمال توزیع لاگ نرمال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7-2)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع لاگ نرمال می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$P(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right) \quad (8-2)$$

Erf همان تابع خطا در معادله (6-2) است.

پ- توزیع نمایی منفی^۲ یا توزیع نمایی^۳

تابع چگالی احتمال توزیع نمایی منفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p(x, \lambda) = y = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (9-2)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع نمایی منفی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$p(x, \lambda) = Y = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (10-2)$$

اگر از هر دو طرف تابع چگالی احتمال لگاریتم گرفته شود، معادله زیر به دست خواهد آمد:

$$\log(f(x)) = \log(y) = \log(\lambda) - \lambda x, \text{ for } x \geq 0 \quad (11-2)$$

اگر $\log(y)$ و x در سیستم مختصات خطی و y و x در سیستم مختصات لگاریتمی-خطی

¹ Log-normal

² Negative exponential

³ Exponent

رسم شود، خطی با شیب منفی می تواند نشان دهنده این توزیع باشد.

ت- توزیع یکنواخت^۱

تابع چگالی احتمال توزیع یکنواخت به صورت زیر نوشته می شود:

$$p(x) = y = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{for } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{for } x < a \text{ or } x > b \end{cases} \quad (12-2)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع یکنواخت می تواند به صورت زیر نشان داده شود:

$$P(x) = Y = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (13-2)$$

ث- توزیع قانون توان^۲

قانون توان رابطه ای است که نشان دهنده ویژگی تغییرناپذیر مقیاس (مقیاس ثابت) است. بیشتر

قانون های توان عمومی به فرم زیر هستند:

$$f(x) = y = ax^k \quad (14-2)$$

که a و k ثابت هستند. K توان مقیاس^۳ نامیده می شود. برای تابع قانون توان می توان نوشت:

$$f(cx) \propto f(x) \quad (15-2)$$

که در آن c ثابت است. اگر که از دو طرف رابطه، لگاریتم گرفته شود (یا به صورت گرافیکی روی

نمودار لاگ- لاگ رسم شود) رابطه قابل فهم تر می شود.

$$\log(f(x)) = \log(y) = k \log(x) + \log(a) \quad (16-2)$$

این رابطه حالتی از یک رابطه خطی با شیب k است، و مقیاس متغیر مستقل^۴ موجب انتقال

خطی (بالا یا پایین) تابع می شود.

ج- توزیع گاما^۵

¹ Uniform

² Power-law

³ Acaling exponent

⁴ Argument

⁵ Gamma

تابع چگالی احتمال توزیع گاما را می‌توان در اصطلاح تابع پارامتری گاما که k پارامتر شکل و θ پارامتر مقیاس آن باشد، تعریف و به صورت زیر نوشت:

$$f(x; k; \theta) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, \text{ for } x > 0 \text{ and } k, \theta > 0. \quad (17-2)$$

در این رابطه: $\Gamma(z)$ تابع گاما است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (18-2)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع گاما می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$f(x; k; \theta) = \int_0^x f(u; k; \theta) du = \frac{\gamma(k, x/\theta)}{\Gamma(k)} \quad (19-2)$$

در اینجا $\gamma(a, x)$ تابع گامای ناقص^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma(z, x) = \int_0^x t^{z-1} e^{-t} dt \quad (20-2)$$

توزیع گاما هم ویژگی‌های توانی^۲ و هم مقیاسی^۳ را دارا است (Fox et al, 2012).

۳-۱-۳-۲ فاصله‌داری

فاصله‌داری شکستگی، فاصله بین دو شکستگی مجاور از یک دسته‌درزه یکسان در طول یک خط راست عمود بر شکستگی‌ها که معمولاً خط برداشت نامیده می‌شود، است. فاصله‌داری متوسط ($\bar{S}$) شکستگی‌ها با جمع کل فاصله‌داری شکستگی‌های مجاور (S_i) تقسیم بر تعداد شکستگی‌ها (N) محاسبه می‌شود.

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \approx \frac{L}{N} = \frac{1}{F} \quad (21-2)$$

در این رابطه F فراوانی شکستگی‌ها است.

توزیع‌های نمایی منفی، لاگ‌نرمال و قانون توان توزیع‌های معمول‌تر در فاصله‌داری شکستگی‌ها

¹ Lower Incomplete Gamma Function

² Exponential

³ Scaling

محسوب می‌شوند. پریست^۱ و هادسون (۱۹۸۱) اصول کلی روند کاربردی ویژه برای اندازه‌گیری فاصله‌داری داده‌های گمانه‌ارایه دادند. سنگ ناهمگن یک توزیع تصادفی از فاصله‌داری شکستگی‌ها را تولید می‌کند که منجر به توزیع‌های نمایی منفی می‌شود. برخی محققان دیگر نیز از جمله بیچر^۲ و همکاران (۱۹۷۷)، کرودن^۳ (۱۹۷۷a)، اینشتین و بیچر (۱۹۸۳)، هادسون و پریست (۱۹۸۳)، پاینو^۴ (۱۹۸۵) و درشوویتز و اینشتین^۵ (۱۹۸۸) تابع توزیع نمایی منفی را برای فاصله‌داری شکستگی‌ها پیشنهاد داده‌اند. توزیع لاگ‌نرمال برای فاصله‌داری شکستگی‌ها توسط محققانی چون سن و کازی^۶ (۱۹۸۴)، نار و ساپه^۷ (۱۹۹۱)، جانستون^۸ (۱۹۹۲)، بیچر و گروس^۹ (۱۹۹۶)، پاسکال^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۷) و رایوز^{۱۱} و همکاران (۱۹۹۴) پیشنهاد شده است.

انتخاب توزیع قانون توان برای فاصله‌داری شکستگی‌ها در مطالعات بارتن و زوباک^{۱۲} (۱۹۹۰ و ۱۹۹۲)، بیلفیلد و ساویچ^{۱۳} (۱۹۹۵) و گایلاسپه^{۱۴} و همکاران (۱۹۹۹) مشاهده شده است. دیگر توزیع‌ها برای فاصله‌داری تقریباً نامتعارف‌اند هرچند که توزیع نرمال توسط محققانی از جمله جی و ساروواتاری^{۱۵} (۱۹۹۸) و توزیع گاما توسط هانگ و انگلیر^{۱۶} (۱۹۸۹)، گروس (۱۹۹۳) و کاستاینگ^{۱۷} و همکاران (۱۹۹۶) نیز پیشنهاد شده است (Chen and Tonon, 2012).

۲-۳-۱-۴ شدت شکستگی

شدت شکستگی نسبت تعداد شکستگی‌ها به طول، مجموع طول شکستگی‌ها به واحد سطح یا مجموع مساحت سطوح شکستگی‌ها به واحد حجم مشاهده شده است. بنابراین واحد شدت عکس طول است. شدت شکستگی‌ها معمولاً از محدوده مشاهدات یک‌بعدی (مانند خط برداشت) به وسیله تقسیم

^۱ Priest & Hudson

^۲ Baecher

^۳ Cruden

^۴ Pineau

^۵ Dershowitz & Einstein

^۶ Sen & Kazi

^۷ Narr & Suppe

^۸ Johnston

^۹ Gross

^{۱۰} Pascal

^{۱۱} Rives

^{۱۲} Zoback

^{۱۳} Belfield & Sovich

^{۱۴} Gillespie

^{۱۵} Ji and Saruwatari

^{۱۶} Huang & Angelier

^{۱۷} Castaing

تعداد کل شکستگی‌ها (N) بر طول کل خط برداشت (L) تعیین می‌شود:

$$F = N / L \quad (2-22)$$

شدت شکستگی با تغییر در نوع برداشت (منظور روش‌های اندازه‌گیری مختلف با توجه به بعد اندازه‌گیری است) متغیر است. P_1 عکس فاصله‌داری اندازه‌گیری شده‌ی مرسوم در طول یک خط برداشت است. تشریح پارامتر فاصله‌داری شکستگی به دلیل وابستگی بالا به رابطه بین جهت‌داری شکستگی و جهت‌داری خطی که در طول آن اندازه‌گیری شده است، مشکل است. برای دسته شکستگی‌های موازی، فاصله‌داری اندازه‌گیری شده در میدان بر اساس زاویه θ بین قطب متوسط شکستگی‌ها و خط برداشت بیان می‌شود. P_1 نیز متوسط فاصله‌داری وابسته به جهت‌داری است. زیرا P_1 مستقل از مقیاس است (Priest, 1993). تعاریف مربوط به پارامترهای چگالی، شدت و تخلخل با توجه به بعد نمونه‌برداری در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول ۱-۲ اندازه‌گیری شدت و چگالی شکستگی‌ها در ابعاد مختلف (Fox et al, 2012)

بعد ساختاری						
	۰	۱	۲	۳		
نقطه	۰	$P_{..}$			اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای	بعد نمونه‌برداری
خط برداشت و گمانه	۱	$P_{1.}$ ، چگالی خطی	P_{11} ، تخلخل خطی		اندازه‌گیری‌های خطی	
رخنمون، ترانشه و دیواره‌ی تونل	۲	$P_{2.}$ ، چگالی سطحی	P_{21} ، شدت سطحی	P_{22} ، تخلخل سطحی	اندازه‌گیری‌های سطحی	
توده سنگ	۳	$P_{3.}$ ، چگالی حجمی	P_{31}	P_{32} ، شدت حجمی	P_{33} ، تخلخل شکستگی	اندازه‌گیری‌های حجمی
چگالی						شدت
						تخلخل

۵-۱-۳-۲ پرشدگی

سیمانی شدن (پرشدگی) شامل فرایند ته‌نشینی اجزای معدنی محلول در آب در شکاف‌های توده سنگ است. مواد پرکننده ممکن است شامل سیلیکا، کربنات‌ها، اکسیدهای آهن یا رس‌ها باشد. پرشدگی یا سیمانی شدن در شکستگی‌ها یا دیگر بازشدگی‌های موجود در سنگ در نواحی دارای آب‌های زیرزمینی، رخ می‌دهد و یک فرایند دینامیکی و کم‌وبیش معادل با فرایندهای حل‌شدگی و غیر حل‌شدگی است. درجه عدم پرشدگی فضای منفذی در شکستگی‌های بزرگ، عامل موثری در تراوایی شبکه شکستگی‌ها است (Chen and Tonon, 2012).

۶-۱-۳-۲ بازشدگی

یکی از ویژگی‌های هندسی درزه که تاثیر مهمی بر رفتار هیدرولیکی توده سنگ دارد، بازشدگی است. وقتی ویژگی‌های سیال تغییر نکند، یعنی سیال تراکم ناپذیر، ایزوترمال و جریان تک فازی باشد، قابلیت هدایت هیدرولیکی و قابلیت نقل‌وانتقال توده سنگ، تابعی از بازشدگی درزه هستند. به‌طور کلی فرض می‌شود که بازشدگی درزه از توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند (Chen and Tonon, 2012).

۷-۱-۳-۲ آرایش فضایی (موقعیت) شکستگی‌ها

گومز و مارت^۱ تعریف آرایش فضایی شکستگی‌ها را به‌صورت «چگونگی قرارگیری و وضعیت شکستگی‌ها نسبت به هم دیگر در یک فضا، جایی که هر مجموعه‌ی دسته‌درزه، مشخصات (مانند جهت‌داری و پرشدگی) و منشا پیدایش یکسانی دارند» بیان کرده‌اند. تصور کلی آرایش فضایی به وجود یا عدم وجود الگوهایی در موقعیت شکستگی‌ها در فضا باز می‌گردد. لاپوینته^۲ (۱۹۹۳) خلاصه‌ای از چند روش ساخت شبکه شکستگی توده سنگ به‌وسیله مشاهدات و الگوهای توصیفی محدود برای جریان سیال را ارائه داده‌اند. گومز و مارت تحلیل‌های متداول آرایش شکستگی‌ها در فضا، هیر^۳ و مارت

¹ Gomez and Marrett

³ Hare

² La Pointe

تحلیل‌های طیفی آرایش شکستگی‌ها و مارت و همکاران تحلیل‌های پیوستگی آرایش شکستگی‌ها را توسعه داده‌اند (Chen and Tonon, 2012).

به‌طور معمول در شبیه‌سازی‌های DFN فرض بر این است که موقعیت شکستگی‌ها پیرو تابع توزیع پواسون است. موقعیت مرکز شکستگی‌ها به وسیله عددهای تصادفی بر اساس یک الگوریتم بازگشتی که تعیین‌کننده‌ی بخش اعشاری اعداد محاسبه‌شده با پیروی از معادله بازگشتی است، ایجاد می‌شود.

$$R_{i+1} = 27R_i - \text{int}(27R_i) \quad (23-2)$$

در این معادله R_i یک عدد تصادفی در محدوده ۰ تا ۱ و $\text{int}(x)$ قسمت صحیح عدد x است. مقدار اولیه R از الگوریتم تناسب‌های تکثیری (تجانس‌های ضربی)^۱ تعیین می‌شود. اگر فضای تولید (محدوده ایجاد مرکز شکستگی‌ها) در محدوده‌های مختصاتی $x_{g1} < x_{g2}$ و $y_{g1} < y_{g2}$ و در طول یک مجموعه محلی از مختصات دکارتی تعریف شود، می‌توان مختصات نقطه میانی هر شکستگی را از طریق معادلات زیر تولید نمود؛

$$x_i = x_{g1} + R_i(x_{g2} - x_{g1}) \quad (24-2)$$

$$y_i = y_{g1} + R_{i+1}(y_{g2} - y_{g1}) \quad (25-2)$$

که در آن، این الگوریتم برای تولید مختصات مرکز شکستگی‌ها در مدل DFN چرخیده شده بکار گرفته می‌شوند (Baghbanan and Jing, 2007).

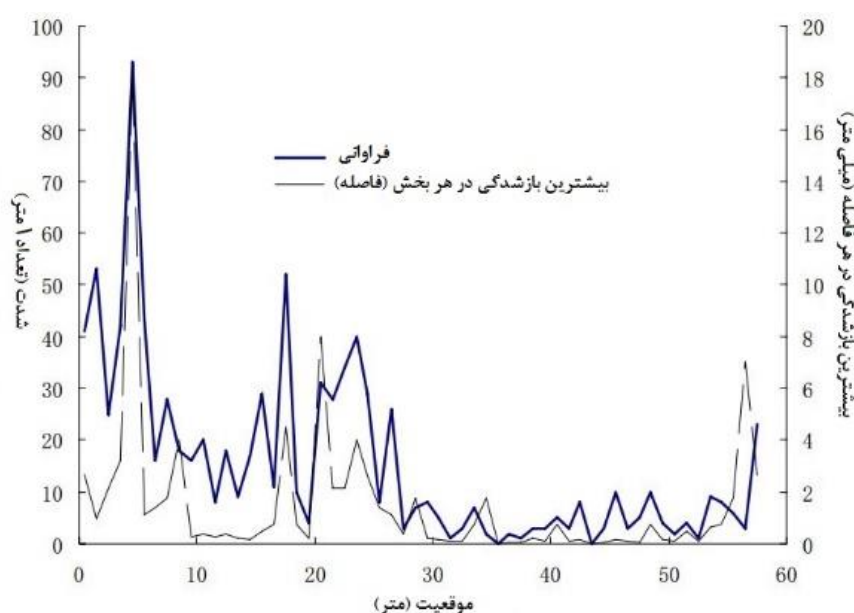
۲-۳-۲ رابطه‌ی پارامترهای موثر در جریان سیال

رابطه‌ی بین پارامترهای موثر در جریان سیال شبکه شکستگی در برخی پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

¹ Multiplicative Congruencies

۱-۲-۳-۲ رابطه‌ی بازشدگی و شدت

مارت و همکاران (۲۰۰۵) حالتی را که در آن شکستگی‌های با بازشدگی زیاد نسبت به شکستگی‌ها با بازشدگی کوچک‌تر، با شدت و تراکم بیشتری در شبکه‌ها (خوشه‌ها) تقسیم می‌شوند را بررسی کرده‌اند (شکل (۷-۲)). گومز و مارت مجموعه داده‌های خط برداشت مربوط به رگه‌های پرشده با کلسیت در مرم‌های موجود در سنگ‌آهک^۱ ایالت پارک تگزاس^۲ را بررسی کرده‌اند. این داده‌ها شامل ۹۱۶ شکستگی در طول ۵۹ متر از یک رخنمون با لایه‌های موازی است. خط برداشت به فاصله‌های یک متر تقسیم شده است.



شکل ۷-۲ مثالی از رابطه فراوانی و بازشدگی (Chen and Tonon, 2012).

در هر بخش، شدت (تعداد شکستگی‌ها بر طول هر بخش) و بیشترین بازشدگی شکستگی‌ها نشان داده شده است که نشان‌دهنده رابطه بین فراوانی و بیشترین بازشدگی محلی است. از این شکل می‌توان دریافت که شکستگی‌ها با بازشدگی بالاتر در نواحی خوشه‌ای که شکستگی‌ها فراوانی بالاتری دارند، وجود دارند (Chen and Tonon, 2012).

¹ Marble Falls Limestone

² Park in Texas

۲-۲-۳-۲ رابطه بین بازشدگی و طول اثر

رابطه بین جابجایی یا بازشدگی به عنوان تابعی از طول برای ویژگی‌های مختلف وابسته به ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ حایز اهمیت است. محققان زیادی از جمله کاوی و شولز^۱ (۱۹۹۲ و ۱۹۹۰)، داورس^۲ و همکاران (۱۹۹۳)، گایلسپی^۳ (۱۹۹۲)، مارت و الماندینگر^۴ (۱۹۹۱)، ورمیلی^۵ و شولز (۱۹۹۵) و والش و واترسن^۶ (۱۹۹۵)، روی رابطه‌ی بین طول و بازشدگی کار کرده‌اند. برای رابطه‌ی بین طول و جابجایی گسل‌ها، پارامتر u که مقیاسی از بیشترین جابجایی‌ها است را به عنوان تابعی از طول l به دست آمده از حالت قانون توان به صورت رابطه‌ی زیر بیان کرده‌اند.

$$u = kl^v \quad (2-26)$$

در این رابطه، k و v مقادیر ثابتی‌اند. شولز و کاوی (۱۹۹۰) و داورس و همکاران (۱۹۹۳) پیروی از رابطه‌ی بین بازشدگی و طول از یک تابع خطی (در حقیقت رابطه‌ی تابع توزیع قانون توان این رابطه برابر با ۱ است) را بررسی کرده‌اند. با توجه به مکانیک الاستیک خطی شکستگی‌ها که توسط پولارد و آیدین^۷ (۱۹۸۸) ارایه شد، یک رابطه‌ی خطی بین مقیاس بازشدگی و طول برقرار است. برخی مشاهدات نیز حاکی از یک رابطه خطی بین بازشدگی و طول اثر است، درعین حال نتایج برخی موارد نشان‌دهنده یک رابطه غیرخطی است. رنشاو و پارک^۸ (۱۹۹۷) اظهار کردند که بازشدگی یک شکستگی نشان‌دهنده انرژی موجود برای رشد شکستگی و کنترل نفوذپذیری شکستگی است، بنابراین رابطه بین بازشدگی و طول اثر شکستگی می‌تواند برای استنباط عوامل موثر بر ایجاد شکستگی در مقیاس‌های طولی مختلف استفاده شود (Chen and Tonon, 2012).

محققان بر اساس مشاهده ویژگی‌های شکستگی از نتایج برداشت میدانی رابطه‌ی بین طول اثر شکستگی و بازشدگی را توسعه داده‌اند. پیشنهاد شده است که بازشدگی یا عرض شکستگی ممکن

¹ Cowie Scholz

^۲ Dawers

³ Gillespie

⁴ Allmendinger

⁵ Vermilye

⁶ Walsh & Watterson

⁷ Pollard & Aydin

⁸ Renshaw & Park

است با یک تابع توانی با طول شکستگی به صورت زیر برآورد شود:

$$h = al^{\beta} \quad (27-2)$$

در این رابطه h بازشدگی و l طول اثر است. β بین ۰/۵ تا ۲ متغیر است. مشاهده قطعات رگه‌ای محدود ایزوله نشان می‌دهد که عرض رگه با طول، نسبتی خطی با $\beta=1$ دارد، درحالی‌که برای بیشتر سیستم‌های چندگانه پیچیده، مقدار β در حدود ۰/۵ است. مطالعه الگوی شکستگی گسلی در قطعات رسی در طول تغییر شکل‌های کششی، یک نسبت مقیاسی جدید برای طول l یک شکستگی به عنوان تابعی از سطح آن را نشان می‌دهد. نتیجه این رابطه مقیاسی این بوده که عرض (بازشدگی) شکستگی با طول به صورت رابطه‌ی زیر مقیاس شده است.

$$w \approx l^{(1-\beta)/\beta} \quad (28-2)$$

در این مورد پارامتر توان به صورت $\frac{1-\beta}{\beta} = 0.47$ است.

واضح است که با مشاهده داده‌های اندازه‌گیری‌های موجود، یک قانون معتبر کلی برای ارتباط بازشدگی و طول اثر شکستگی نمی‌تواند ارائه شود. از سوی دیگر، مطالعات اخیر صورت گرفته نشان‌دهنده این واقعیت است که بازشدگی و طول اثر به هم مرتبطاند، حتی اگر یک رابطه کلی معتبر را باهم نداشته باشند. این مطالعات و رابطه‌های پیشنهاد شده بر اساس مشاهده اندازه شکستگی‌ها در محدوده سانتی‌متر تا متر، در سایت‌های مختلف است. اما در مدل‌های پیچیده هندسی مانند مدل‌های DFN ، تعداد زیادی شکستگی کوچک با بازشدگی هیدرولیکی کوچک و تعداد خیلی کمی شکستگی بزرگ با بازشدگی بالا مشاهده می‌شود. در کل بازشدگی شکستگی طبیعی به صورت همبسته با طول اثر ظاهر می‌شوند و تنها در مواردی که یک سری ساده‌سازی‌ها برای تسهیل مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شود، غیر همبسته هستند. برای بررسی تاثیر همبستگی بازشدگی — طول اثر روی نفوذپذیری سنگ‌های شکسته، یک معادله همبستگی بر اساس توزیع لاگ‌نرمال کوتاه شده ($TCDF$) بازشدگی و تابع توان طول شکستگی توسعه داده شده است. کلید این همبستگی، تابع‌های توزیع ترکیبی^۱ است

¹ Cumulative

که می‌تواند به صورت تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در محدوده صفر تا ۱ ایجاد شود. تابع توزیع ترکیبی برای طول شکستگی‌ها به صورت زیر است:

$$\left[\begin{aligned} TCDF &= F_{LNTR}(l) \\ F_{LNTR}(l) &= F \\ F &= \frac{l^{-D} - l_{\min}^D}{l_{\max}^D - l_{\min}^D} \end{aligned} \right. \quad (29-2)$$

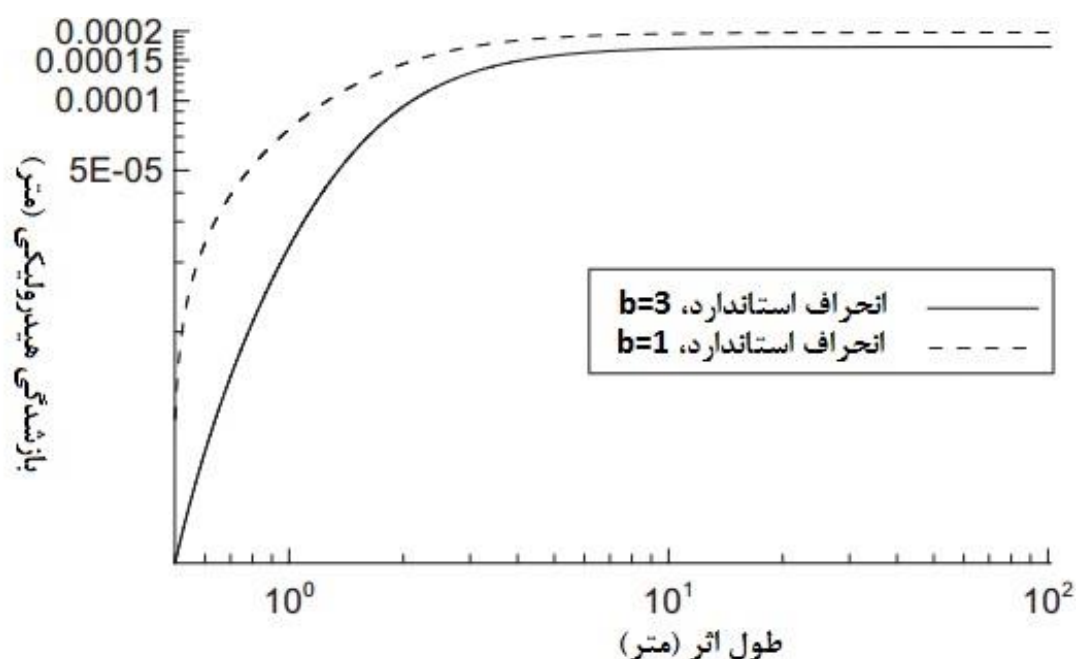
با بررسی معادله (۲۹-۲) برای توزیع لاگ نرمال کوتاه شده بازشدگی، رابطه همبستگی زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{l^{-D} - l_{\min}^D}{l_{\max}^D - l_{\min}^D} = \frac{g(h) - g(h_a)}{g(h_b) - g(h_a)} \quad (30-2)$$

که در نهایت منجر به یک رابطه بین بازشدگی و طول اثر به صورت زیر می‌شود:

$$l = \left(l_{\min}^D + \left[\frac{g(h) - g(h_a)}{g(h_b) - g(h_a)} \right] (l_{\max}^D - l_{\min}^D) \right)^{-1/D} \quad (31-2)$$

شکل (۲-۸) نشان‌دهنده رابطه بین بازشدگی و طول اثر برای مقادیر مختلف مماس دوم b است که به وسیله معادله تعریف شده است.



شکل ۲-۸ نسبت بازشدگی به طول اثر در مقادیر مختلف مماس دوم b (Baghbanan and Jing, 2007).

خط‌چین و خط ممتد به تغییرات بازشدگی با افزایش طول اثر برای مواردی که b برابر با ۱ و ۳ است، مربوط می‌شود. نمودار نشان می‌دهد که احتمال داشتن یک بازشدگی بزرگ با افزایش b ، افزایش می‌یابد (Baghbanan and Jing, 2007).

۴-۲ جمع‌بندی

همان‌گونه که بحث شد پارامترهای زیادی در انتقال جریان در توده سنگ درزه‌دار تاثیر دارند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای هندسی موثر در جریان سیال می‌توان به جهت‌داری شامل شب و جهت شیب، پایایی، بازشدگی، چگالی و شدت شکستگی‌ها اشاره کرد. برای بررسی و تاثیر دادن این پارامترها در مطالعه جریان سیال توده سنگ ابتدا باید صحت روند برداشت داده‌ها بررسی شود. از جمله روش‌های متداول در برداشت درزه‌ها روش‌های برداشت خطی و پنجره برداشت است که در صورت استفاده از هر کدام از این روش‌ها پارامترهای خاصی از ناپیوستگی‌های توده سنگ به دست می‌آیند. در ساخت و ارایه مدل‌های پیچیده هندسی توده سنگ (DFN) باید در حد امکان و با توجه به قابلیت نرم‌افزار موردنظر، تمامی پارامترهای موثر در ساخت مدل و مطالعه‌ی جریان سیال آن لحاظ شوند. مدل‌های DFN یک مدل آماری بوده و هر یک از پارامترهای آن از تابع توزیع خاصی تبعیت می‌کند. در انتخاب توابع توزیع باید به این نکته دقت شود که دقت و حساسیت توابع توزیع به تعداد مولفه‌های این توابع وابسته است و انتخاب توابع تا حدی می‌تواند منوط به حساسیت پروژه باشد. همان‌طور که بحث شد توابع توزیع مناسب برای هر پارامتر هندسی ممکن است در پروژه‌های مختلف با توجه به همبستگی داده‌ها متفاوت باشد. همبستگی پارامترها از دیگر مواردی است که بسته به مورد مطالعاتی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در نتایج پروژه داشته باشد.

فصل سوم

اصول حاکم بر جریان سیال در محیط‌های سنگی

درزه‌دار

۱-۳ مقدمه

برای توضیح پدیده‌های طبیعی از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. روش‌های مشاهده‌ای و آزمایشگاهی از جمله قدیمی‌ترین این روش‌ها به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر توسعه‌ی روش‌های مبتنی بر ریاضیات و استفاده از امکانات کامپیوتری در جهت تسهیل روند محاسباتی وابسته، کمک فراوانی در جهت بررسی پدیده‌های طبیعی و پیش‌بینی آن‌ها نموده است. از جمله مهم‌ترین این روش‌ها، استفاده از روش‌های عددی است که به ابزار قدرتمندتری در جهت حل مسایل مختلف نظیر مسایل مکانیک جامدات، جریان و نظایر آن تبدیل شده است. مهم‌ترین مزایای روش‌های عددی پاسخ دقیق و قابل اطمینان در مدت زمان نسبتاً کم و دربرداشتن هزینه‌های کم نسبت به روش‌های آزمایشگاهی است. برای بررسی یک مساله مهندسی خاص قبل از هر چیز، مطالعات مربوطه‌ی نظری به‌منظور توضیح ریاضی پدیده‌های حاکم صورت می‌گیرد.

در مرحله بعد با استفاده از مبانی ریاضی به دست آمده و اعمال فرضیات لازم، معادلات ریاضی

حاکم بر مساله مورد نظر استخراج می‌شود. این معادلات که معمولاً به صورت معادلات دیفرانسیل مقدار مرزی هستند در میدان مساله مورد نظر حل می‌شود و از پاسخ‌های به دست آمده به منظور پیش‌بینی پدیده‌ی مورد نظر استفاده می‌شود. در مورد توده سنگ با توجه به طبیعت پیچیده‌ی رفتار حاکم بر آن، به دست آوردن پاسخ کاملاً دقیق، عملاً امکان‌پذیر نبوده و مدل‌سازی آن همراه با یک سری فرضیات فیزیکی قابل مشاهده و شرایط مرزی موجود انجام می‌شود (Zhang and Sanderson, 1996; Jing and Hudson, 2002; عباسی، ۱۳۸۷).

با استفاده از روش‌های عددی مختلفی که به منظور مدل‌سازی رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ گسترش یافته‌اند، می‌توان بسیاری از فرضیات ساده کننده‌ای که در روش‌های تحلیلی بکار برده شده است را تعدیل نمود و نتایج به دست آمده را تا حد زیادی به واقعیت نزدیک کرد. به عنوان مثال در مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ به روش‌های تحلیلی فرضیات ساده کننده‌ی زیر به طور معمول برای محاسبه‌ی نفوذپذیری در نظر گرفته می‌شود:

- ثابت بودن بازشدگی هیدرولیکی درزه‌ها (در قانون صفحات موازی)
- هر درزه در سراسر زون شکسته شده گسترش دارد و به طور کامل زون مورد مطالعه را قطع کرده است.
- هیچ کاهش هدی بین درزه‌های متقاطع وجود ندارد.
- درزه‌ها تشکیل دسته‌های موازی می‌دهند.

همان گونه که اشاره شد در نظر گرفتن این فرض‌ها موجب به وجود آمدن خطاهای چشمگیری در برآورد رفتار هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار موجود در طبیعت می‌شود. در نتیجه به منظور اجتناب از این گونه ساده‌سازی‌ها و به دست آوردن فهم دقیق‌تری از رفتار توده سنگ استفاده از روش‌های عددی ضروری به نظر می‌آید.

در روش‌های عددی توضیح ریاضیاتی پدیده مورد بررسی به صورت مجموعه‌ای از معادلات حاکم

بر رفتار محیط است که برای رسیدن به جواب، در حوزه مساله مورد نظر حل می‌شوند. برای به دست آوردن این معادلات از تکنیک‌های تحلیلی مناسب استفاده می‌شود. به همین خاطر توجه ویژه به روابط تحلیلی اساسی به کار رفته برای منظور نمودن هرچه بهتر پارامترهای تاثیرگذار در مدل‌سازی‌های عددی نقش اساسی را ایفا می‌کنند. امروزه در جهت تسهیل در استفاده از روش‌های عددی، این روش‌ها در قالب کدهای کامپیوتری قدرتمند بکار می‌روند و به این ترتیب به راحتی و در زمان کمتری می‌توان اقدام به حل معادلات بکار رفته، نمود. در زمینه مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ، مدل‌های عددی فراوانی پیشنهاد شده‌اند. اساس تمام این روش‌ها تبدیل یک محیط با درجه آزادی بینهایت به محیطی با درجه آزادی محدود، در تعدادی مشخص از نقاط محیط است (*Jing and Hudson, 2002*). به طور کلی می‌توان روش‌های عددی را به دو گروه عمده‌ی پیوسته معادل و ناپیوسته تقسیم نمود:

- روش‌های پیوسته:
 - روش تفاضل محدود^۱
 - روش المان محدود^۲
 - روش المان مرزی^۳
- روش‌های ناپیوسته:
 - روش المان مجزا^۴
 - روش شبکه شکستگی مجزا
 - روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا- روش المان مجزا^۵

¹ Finite Difference Method

² Finite Element Method

³ Boundary Element Method

⁴ Discrete Element Method (DEM)

⁵ Hybrid DFN-DEM Method

۲-۳ روش‌های حاکم بر حل مسایل هیدرولیکی

ساده‌سازی و کاربردی سازی مسایل پیچیده عموماً با استفاده از روش‌های مدل‌سازی انجام می‌شود. پیچیدگی شرایط موجود در توده سنگ محققین را ناگزیر به استفاده از مدل‌های مختلف برای ساده‌سازی مسایل می‌کند. در محیط‌های سنگی به‌طور کلی مسایل مربوط به انتقال و جریان سیال در چهار فرایند فیزیکی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (Adler and Thovet, 1999):

۱- انتقال و جریان سیال در داخل یک درزه

۲- انتقال و جریان سیال از طریق شبکه شکستگی

۳- انتقال و جریان سیال از طریق محیط سنگی متخلخل

۴- عکس‌العمل بین محیط متخلخل و شکستگی‌ها

۱-۲-۳ روش‌های پیوسته

روش‌های پیوسته عمدتاً بر پایه‌ی رابطه‌ها و فرضیات حاکم در مباحث مربوط به مکانیک محیط‌های پیوسته طرح ریزی شده‌اند. معادلات تعادل حاکم بر محیط‌های پیوسته را به دو صورت زیر می‌توان به دست آورد:

۱- از طریق نوشتن معادلات در جزیی بسیار کوچک از محیط مورد بررسی

۲- به کار بردن رابطه‌های انتگرالی مبتنی بر برخی از پدیده‌های فیزیکی مشاهده‌شده در مساله

(نظیر قضیه‌ی انرژی پتانسیل حداقل در مکانیک جامدات) به‌منظور به دست آوردن معادله‌ی

تعادل حاکم

در تمامی روش‌های بکار رفته در مدل‌سازی‌های عددی پیوسته، معادله حاکم به دست آمده برای دستیابی به مقادیر میدان (تغییرهای اولیه) در محیط مورد بررسی، حل می‌شود. این متغیرها در تحلیل مکانیکی شامل جابجایی‌ها و تنش، در مسایل انتقال حرارت شامل میدان دمایی و در مسایل

جریان شامل تابع جریان یا تابع پتانسیل می‌باشند (فرهمند، ۱۳۹۰).

همان‌گونه که گفته شد، برای مدل‌سازی پیوسته رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ و اندرکنش‌های بین آن‌ها (فرآیندهای توامان)، نیاز به حل معادلات تعادل مکانیکی توده سنگ است. این معادلات باید به‌طور هم‌زمان در میدان مربوطه ارضا شوند و این امر مستلزم استفاده از روش‌های محاسباتی ویژه مانند الگوریتم تکرار است.

در روش‌های پیوسته، جریان سیال از طریق یک جسم جامد به‌تنهایی یا به‌صورت ترکیب با مسایل مکانیکی (فرایند توامان) تحلیل می‌شود و معادلات موجود با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌شوند. روش تفاضل محدود، تقریبی مستقیم از معادلات دیفرانسیل جزئی بنیادی است که از جایگزینی مشتقات جزئی با تفاضلات نقاط گرهی تعریف شده در محدوده مساله به دست می‌آید. در اثر این فرآیند معادلات دیفرانسیل جزئی اولیه به معادلات جبری بر حسب مجهولات مورد نظر در نقاط گرهی تبدیل می‌شوند، سپس با اعمال شرایط مرزی به سیستم می‌توان معادلات را حل نموده و پارامترهای مجهول را به دست آورد. بنابراین برای حل مسایل شبکه، یک دستگاه معادلات دیفرانسیل بر حسب میزان فشار و درجه اشباع برای هر نقطه شبکه^۱ تعیین می‌شود (Cammarata et al, 1999; Bai et al, 2006). درجه اشباع و میزان فشار توسط میانگین‌گیری از مقادیر گرهی محیطی به دست می‌آیند. در این معادلات دو مساله مهم وجود دارد:

۱- معادلات سیال و شرایط مرزی بر حسب فشار تعریف شوند.

۲- نفوذپذیری به‌صورت ضریب تحریک‌پذیری یا همان فشار حفره‌ای در قانون دارسی که نسبت نفوذپذیری ذاتی به ویسکوزیته دینامیکی سیال است، بیان شود.

در این معادلات اگر شتاب جاذبه برای گشتاور چرخشی در نظر گرفته نشود، معادلات طبق قانون دارسی برای یک محیط متخلخل و همسان‌گرد، در نظر گرفته شده و بردار سرعت در هر گره به

^۱ Grid point

دست می‌آید. سپس نرخ جریان حجمی با استفاده از بردارهای سرعت محاسبه می‌شود. اگر تاثیر شتاب جاذبه در نظر گرفته شود، گرادیان در فرمول دارسی تغییر می‌کند و با توجه به این تغییر، فرمول اصلاح می‌شود. برای انجام تحلیل و رسیدن به پایداری عددی از گام زمانی استفاده می‌شود که بتواند تغییر شکل‌های داخل بلوک را ارضا نماید. زمانی که در گره مرکزی یک ناحیه، به علت افزایش جریان گرهی، فشار افزایش یابد می‌توان گام زمانی را به دست آورد. با تغییر در فشار حفره‌ای گره‌های اشباع، جریان نامتعادل می‌شود و حجم گره در اثر تغییر شکل‌های مکانیکی شبکه (به علت افزایش فشار) افزایش می‌یابد. در این روش‌ها می‌توان فشار حفره‌ای را نادیده گرفت. به این ترتیب که محدودیتی برای مقاومت کششی سیال تعریف می‌شود. اگر فشار گرهی از منفی مقاومت کششی بیشتر شود، فشار صفر می‌شود و گره‌ها به عنوان محل جریان خروجی به کار می‌روند تا درجه اشباع کاهش پیدا کند و فشار، صفر باقی می‌ماند تا درجه اشباع به کمتر از یک برسد. در این روش اگر سیال از طریق ناحیه غیراشباع مهاجرت کند، باید دو عامل در نظر گرفته شود:

- برای نواحی غیراشباع، نفوذپذیری کاهش پیدا می‌کند (برای نواحی با درجه اشباع صفر، میزان نفوذپذیری صفر می‌شود).
- سیال نمی‌تواند از گره‌هایی با درجه اشباع صفر خارج شود.

بنابراین جریان عبوری در ضریبی وابسته به درجه اشباع محیط ضرب می‌شود. به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت برای یک ناحیه کاملاً اشباع، نفوذپذیری ثابت و برای ناحیه‌هایی با درجه اشباع صفر، نفوذپذیری صفر است (Bai et al, 1999؛ فرهمند، ۱۳۹۰).

روش‌های پیوسته برای حل مسایل انتقال، از قانون دارسی و برای مسایل ترکیبی از قوانین ترکیب بر اساس معادله عکس‌العملی برای سیال حفره‌ای که وابسته به درجه اشباع است، استفاده می‌کنند. در موارد کاملاً اشباع، کششی بالاتر از حد نهایی تحمل می‌کند و تراکم‌پذیری ذرات نادیده گرفته می‌شود. برای موارد نیمه اشباع عکس‌العمل سیال حفره‌ای می‌تواند به صورت معادلات اشباع،

رابطه بین فشار و درجه اشباع و یا رابطه بین نفوذپذیری نسبی (نسبت بین نفوذپذیری ظاهری و نفوذپذیری اشباع) و درجه اشباع بیان شود و برای موارد با درجه اشباع صفر، جریان و معادلات جریان تنها به وسیله جاذبه هدایت می شوند.

با این حال بزرگترین محدودیت این روش ارتباط مستقیم اندازه مدل با ابعاد محیط است، به طوری که با افزایش ابعاد مدل حجم اطلاعات مورد نیاز و زمان لازم برای اجرای محاسبات به شدت افزایش می یابد. همچنین با توجه به مش بندی داخلی، روش های تفاضل محدود و المان محدود نمی توانند محیط های بزرگ با ابعاد بی نهایت را شبیه سازی کنند. بدین ترتیب کارایی این روش ها در شرایط مذکور کاهش پیدا می کند. همچنین برای شبیه سازی اندرکنش های هیدرومکانیکی در توده سنگ از نظریه تحکیم بایوت^۱ استفاده می شود.

۳-۲-۲ روش های ناپیوسته

یکی از عیب های استفاده از روش های تحلیل پیوسته در محیط های سنگی این است که نمی توانند به حل مدل هایی که دارای تعداد زیادی درزه می باشند، بپردازند. برنامه های پیوسته ای وجود دارند که المان های سطوح تماس یا خط های لغزش را تعریف کرده اند و ایجاد محیط غیر پیوسته را تا حدی امکان پذیر می کنند. هرچند رابطه های نوشته شده برای این مسایل معمولاً به یکی از طرق زیر محدود می شود (Bai et al, 1999؛ ناطقی، ۱۳۸۷):

- منطق استفاده شده، هنگامی که تعداد مقاطع فصل مشترک زیاد باشد، غیر معتبر خواهد بود.
- هیچ ایده ای برای شناسایی فصل مشترک های جدید وجود نداشته باشد.
- رابطه ها، محدود به تغییر شکل های کوچک و یا دوره هایی ناچیز باشد.

¹ Biot theory

به دلایل فوق، مدل‌های پیوسته، در کاربردهای خود برای محیط‌های شکسته با محدودیت‌های زیادی روبرو می‌شوند. برای شبیه‌سازی رفتار توده سنگ‌هایی که دارای تعداد زیادی درزه هستند، می‌توان از روش‌های ناپیوسته استفاده نمود. تفاوت یک محیط پیوسته با غیر پیوسته، در وجود سطوح تماس^۱ (محل‌های برخورد) و فصل مشترک^۲ بلوک‌های مجزایی است که سیستم را تشکیل می‌دهند. این دسته از روش‌های عددی باید نمایشگر دو قسمت از یک سیستم که شامل ناپیوستگی‌ها و ماده جامدی که بلوک‌ها را تشکیل می‌دهد، باشند.

برنامه‌های کامپیوتری که به کدهای المان گسسته مشهورند، قابلیت نمایش حرکت تعداد زیادی از ناپیوستگی‌ها را به صورت صریح فراهم می‌آورند. این روش قابلیت‌های زیر را دارد:

- امکان جابجایی و دوران بلوک‌های مجزا را به انضمام جدایش کامل فراهم می‌آورد.
- در حین پیشرفت محاسبات، به صورت خودکار مرزها و سطوح تماس جدید را مشخص می‌کند.

روش المان مجزا برای سنگ‌هایی که دارای شکستگی هستند، بسیار مناسب است. این روش تاکنون بارها برای مدل‌سازی توده سنگ‌های درزه‌دار به کار گرفته شده است (ناطق، ۱۳۸۷، Cammarata et al, 2006; Bai et al, 1999).

در این پایان‌نامه برای حل عددی مدل‌ها از روش تلفیقی شبکه‌ی شکستگی مجزا- المان مجزا در محیط DEC^3 استفاده خواهد شد.

۳-۳ تاریخچه‌ای از روش‌های محاسبه نفوذپذیری شبکه‌ی شکستگی مجزا

چندین روش برای محاسبه نفوذپذیری موثر شبکه‌ی شکستگی ارائه شده است. اودا^۳ (۱۹۸۵) روشی را برای محاسبه‌ی تانسور نفوذپذیری معادل شکستگی‌ها با استفاده از هندسه‌ی شبکه‌ی

¹ Contact

² Interface

^۳ Oda

شکستگی ارایه داد. این روش به شبیه‌ساز جریان برای محاسبه نفوذپذیری نیازی ندارد. از سویی دیگر قادر نیست ارتباط خوبی بین شکستگی‌ها برقرار کند، بنابراین محدود به شبکه‌هایی با ارتباط خوب بین شکستگی‌ها است. به عبارتی دیگر زمانی که چگالی شکستگی‌ها کم است مقادیر نفوذپذیری از واقعیت به دور هستند. لانگ و همکاران (۱۹۸۵) و کاکاس^۱ و همکاران (۱۹۹۰) مدل‌های سه‌بعدی جریان شکستگی‌ها را توسعه دادند و سپس ماسونیت و مانیس^۲ (۱۹۹۴) مدل‌های سه‌بعدی جریان شکستگی‌ها را برای محاسبه ماتریس نفوذپذیری ارایه دادند (Cacas et al, 1990).

لانگ و همکاران (۱۹۹۶) یک مدل دوبعدی جریان در شکستگی‌ها را به‌منظور محاسبه‌ی ماتریس جریان سه‌بعدی بکار گرفتند. اولدینگ^۳ (۱۹۹۲) یک مدل دوبعدی را توسط بررسی تانسور نفوذپذیری ارایه داد. بعدها بوربیاوکس^۴ و همکاران (۱۹۹۶) روشی را برای محاسبه‌ی نفوذپذیری معادل توسط اعمال افت فشار بین دو طرف شبکه‌ای با لوله‌های موازی در شرایط مرزی ویژه پیشنهاد دادند. با استفاده از این مدل‌ها، نفوذپذیری معادل برای جریان‌های پایدار تراکم‌ناپذیر درون شبکه‌ی شکستگی واقعی سه‌بعدی محاسبه می‌شود.

مین^۵ و همکاران (۲۰۰۴) روشی را برای محاسبه‌ی تانسور نفوذپذیری معادل شکستگی‌های توده سنگ با استفاده رویکرد تصادفی المان حجم معرف ارایه دادند (Min et al, 2004). در این روش مقادیر نفوذپذیری معادل با استفاده از کد المان مجزای دوبعدی UDEC محاسبه شد. تحلیل‌های نیمه کمی^۶ نشان داده است که مشخصات شبکه‌ی شکستگی تاثیر مستقیمی در نفوذپذیری شبکه‌ی شکستگی دارد. به‌ویژه، ارتباط شکستگی‌ها، طول، چگالی، بازشدگی و جهت‌داری پارامترهای بحرانی هر شبکه‌ی شکستگی در کنترل نفوذپذیری شبکه نقش دارند. در این خصوص، باباداغلی^۷ (۲۰۰۱) نیز اظهار داشته است که اگر جهت‌داری شکستگی‌ها عمود بر جهت جریان باشد، نفوذپذیری کاهش

^۱ Cacas

^۲ Massonnate and Manisse

^۳ Odling

^۴ Bourbiaux

^۵ Min

^۶ Semi-quantitative

^۷ Babadagli

می‌یابد.

همچنین ژانگ^۱ (۱۹۹۶) نشان داد که افزایش بازشدگی و چگالی باعث افزایش نفوذپذیری شبکه‌ی شکستگی می‌شود. پارامترهایی نظیر طول شکستگی، چگالی، بازشدگی و جهت‌داری نقشی اساسی در نفوذپذیری معادل شبکه‌ی شکستگی دارند که تاثیر دادن و وارد کردن این پارامترها در ساخت شبکه‌ی شکستگی تاثیر قابل توجهی در دقت محاسبات مربوط به نفوذپذیری دارد (Babadagli, 2001).

۳-۴ هیدرولیک درزه^۲

در بسیاری از توده سنگ‌ها، بیشترین مقدار جریان سیال عبوری از میان درزه‌ها، گسل‌ها، و یا شکستگی‌ها اتفاق می‌افتد و مقدار کمی از سیال از میان جسم سنگ جریان می‌یابد. در بعضی از موارد سیال از درون یک ناپیوستگی تکی جریان می‌یابد و در موارد دیگر جریان سیال در میان یک شبکه به هم متصل از درزه‌ها عبور می‌کند.

تقریباً نیمی از ذخایر هیدروکربنی شناخته شده و بیشتر ذخایر ژئوترمال در توده سنگ‌های درزه‌دار واقع هستند. همچنین فهم چگونگی جریان سیال در درزه‌ها از اهمیت خاصی در پیش‌بینی و بررسی عملکرد سیالات ذخیره شده در زیرزمین برخوردار است. در نتیجه مطالعه جریان سیال در میان درزه‌ها دارای اهمیت خاصی در مطالعات ژئوتکنیکی است.

فرایندهای هیدرولیکی در ژئوتکنیک از جنبه‌های مختلف مانند فشار منفذی^۳ (در محیط‌های پیوسته)، فشار بلند کننده^۴ (در محیط‌های ناپیوسته)، جریان، انتقال و حمل مواد^۵ و تاثیر شیمیایی سیال بر سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

محیط‌های جریان سیال در زمین به سه نوع تقسیم می‌شوند:

^۱ Zhang

^۲ Fracture hydraulic

^۳ pore pressure

^۴ Uplift pressure

^۵ Particle transport

- محیط متخلخل^۱ (محیط پیوسته)
- محیط درزه‌دار^۲ (محیط ناپیوسته)
- محیط تخلخل دوگانه^۳ (محیط پیوسته – ناپیوسته)

محیط‌های متخلخل شامل خاک‌ها و سنگ‌هایی که در آن‌ها جسم سنگ دارای تخلخل بالا است. در سنگ‌های سختی که دارای شکستگی هستند و خلل و فرج سنگ دارای نفوذپذیری ناچیزی باشد، محیط را می‌توان محیط ناپیوسته در نظر گرفت. در صورتی که توده سنگ دارای تخلخل و شکستگی‌های زیادی باشد، توده سنگ را محیط متخلخل دوگانه در نظر می‌گیرند. در اغلب موارد به‌خصوص در سنگ‌های سخت مانند سنگ‌های کریستالین، عبور جریان سیال از شبکه درزه‌ها بیشترین مقدار جریان عبوری از توده سنگ را تشکیل می‌دهد و عبور جریان از جسم سنگ بسیار کم است و اغلب از عبور جریان جسم سنگ صرف نظر می‌شود.

در اینجا باید به این نکته اشاره شود که در بسیاری از موارد جریان سیال در میان توده سنگ به‌صورت جریان گذرا است. به عنوان نمونه در معادن، به علت حفاری، بارگذاری و باربرداری‌های متوالی که در توده سنگ اتفاق می‌افتد، جریان سیال در میان درزه‌ها از حالت پایدار به‌صورت تبدیل می‌شود (Sullivan, 2007). جریان گذرا در درزه‌ها ممکن است موجب تغییر فشار سیال شده و تغییر شکل در درزه‌ها ایجاد کند. همچنین در پی سدها در مواقع آب‌گیری، فشار آب در درزه‌ها افزایش می‌یابد و افزایش فشار ممکن است موجب افزایش بازشدگی درزه‌ها شود و رژیم جریان در توده سنگ را تغییر دهد. این فرایندها لزوم تحلیل هیدرودینامیکی برای به دست آوردن شناخت درستی از رفتار آب‌گذری توده سنگ را برجسته می‌کند (Cammarata et al, 2006).

¹ Porous media

² Fractured media

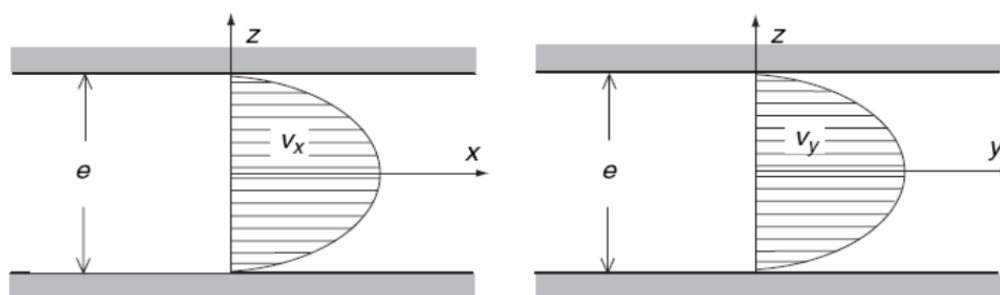
³ Dual porosity

۳-۴-۱ جریان سیال در محیط‌های درزه‌دار

در بررسی جریان سیال در محیط‌های درزه‌دار، اغلب از جریان سیال در جسم سنگ صرف‌نظر می‌شود و نفوذپذیری درزه‌ها، نفوذپذیری کلی توده سنگ را تعیین می‌کند. جریان سیال درون یک درزه سنگی می‌تواند به صورت‌های زیر اتفاق افتد:

- جریان از داخل یک درزه با صفحات صاف و موازی
- جریان از داخل یک درزه با صفحات زبر و موازی
- جریان از داخل یک درزه با صفحات صاف و غیر موازی
- جریان از داخل یک درزه با صفحات زبر و غیر موازی

جریان سیال از داخل یک درزه با صفحات صاف و موازی رایج‌ترین مدل به کار گرفته شده برای مدل‌سازی جریان در میان تک درزه سنگی است. رابطه‌های جریان در میان یک درزه سنگی با دو سطح صاف با بازشدگی e (شکل (۳-۱))، از معادله ساده شده ناویر - استوکس به دست می‌آید و به آن صفحات موازی یا قانون دارسی در مکانیک سنگ، گفته می‌شود.



شکل ۳-۱ جریان در میان دو صفحه صاف و موازی (Jing and Stephansson, 2007)

معادلات رینولدز^۱ با فرض اینکه سیال در داخل دو صفحه موازی و بدون زبری به صورت آرام، پایدار و خطی جریان دارد، از معادلات ناویر-استوکس به دست می‌آیند. در معادله‌ی رینولدز فاصله

^۱ Reynolds equations

بین دو صفحه موازی را بازشدگی درزه می‌گویند و با e ، نشان می‌دهند. نرخ جریان عبوری از یک درزه از رابطه (۱-۳) که به قانون مکعبی^۱ معروف است، به دست می‌آید.

$$Q = \rho_f \cdot g \cdot e^3 / 12\mu \quad (1-3)$$

در رابطه فوق Q نرخ جریان، e بازشدگی درزه، ρ_f چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی سیال است.

در نتیجه هدایت هیدرولیکی یک درزه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{ge^3}{12\nu} \quad (2-3)$$

$$k = \rho_f g \frac{e^3}{12\mu}$$

قانون مکعبی با این فرض که سیال درون درزه‌های صاف و موازی جریان دارد و بر اساس شرایط جریان لایه‌ای، اشباع و غیرقابل تراکم به صورت تحلیلی نتیجه شده است. ژیل و ریون^۲ در سال ۱۹۸۰ نشان دادند که قانون مکعب برای جریان از درزه‌های شکل‌پذیر صادق نیست، زیرا که تماس دو دیواره درزه تغییرات زیادی در جریان به وجود می‌آورد. در تحقیقات آن‌ها بر خلاف قانون مکعب، جریان با توان بالاتر از ۳ با بازشدگی ارتباط پیدا می‌کند.

ژیل در سال ۱۹۸۲ به این نتیجه رسید که قانون مکعب برای درزه‌های مصنوعی در تنش‌های عمودی بالاتر از ۲۰ مگا پاسکال و برای درزه‌های طبیعی در تنش‌های پایین‌تر، دیگر صادق نیست. علاوه بر این مسیر جریان در درزه‌های زبر را به صورت مارپیچ فرض می‌کند که این فرض با قانون مکعب در تضاد است (فرهمند، ۱۳۹۰). سانگ در سال ۱۹۸۴ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی خود به این نتیجه رسید که مقدار جریان محاسبه شده از قانون مکعب خطای بسیار زیادی نسبت به جریان واقعی عبوری از یک درز دارد. سانگ و ویترا سپون^۳ در سال ۱۹۸۱ نشان دادند که فقط در تنش‌های پایین، در شرایطی که درزه باز بوده و هیچ تماسی بین سطوح درزه وجود نداشته باشد، می‌توان قانون

¹ Cubic law

² Jiil & Raven

³ Witherspoon

مکعب را بکار گرفت. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وقتی سطوح تماس بیش از ۳۰ درصد باشد، جریان واقعی ۲ تا ۳ برابر کوچک‌تر از جریان برآورد شده توسط قانون مکعب خواهد بود (Tsang and Witherspoon, 1981).

در اکثر مسایل مهندسی می‌توان با تقریب از قانون مکعب استفاده کرد، زیرا جریان به دلیل سرعت‌پایین در محیط‌های سنگی در محدوده لایه‌ای رفتار کرده و می‌توان با تقریب از این رابطه‌ها استفاده نمود. درعین‌حال برای شناسایی اینکه برای سیستم تراوش موجود در محیط مورد مطالعه، قانون مکعب قابل کاربرد است یا نه باید به این موضوع توجه داشت که عدد رینولدز در چه بازه‌ای قرار دارد. برای دانستن این مطلب عدد رینولدز از رابطه (۳-۳) به دست می‌آید.

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (3-3)$$

که در آن D_h قطر هیدرولیکی درزه (دو برابر بازشدگی)، V سرعت جریان در هر درزه و ν لزجت سینماتیکی سیال است. لوییس در سال ۱۹۷۴ عدد رینولدز بحرانی برای درزه‌ها را برابر ۲۳۰۰ در نظر گرفت. در حالی که ایوای در ۱۹۷۶ این مقدار را برابر ۱۰۰ برآورد کرد.

در حالت کلی شرط برقراری رابطه رینولدز و به دنبال آن قانون مکعب برای درزه‌ها را به صورت زیر می‌توان در نظر گرفت:

$$\alpha \frac{\rho u_c V_{max}}{\mu} \ll 1 \quad (4-3)$$

در این رابطه α زاویه بین سطوح محصور کننده جریان، u_c بعد مشخصه عمودی و V_{max} حداکثر سرعت جریان است (عباسی، ۱۳۸۷).

۳-۵ جریان سیال در $3DEC$

در $3DEC$ ، جریان سیال در توده سنگ تنها به صورت جریان در شکستگی‌ها بررسی و نشان داده می‌شود و از جریان در داخل بلوک‌ها صرف‌نظر می‌شود. سطوح شکستگی‌ها به صورت صفحات

جداکننده‌ی بلوک‌های نفوذناپذیر نشان داده می‌شوند. مساحت سطح مقطع^۱ یک درزه خیلی بزرگ‌تر از مساحت سطح مقطع منافذ درون توده سنگ بکر است. بنابراین، نرخ جریان سیال درون درزه‌ها چندین برابر بزرگ‌تر از نرخ جریان درون منافذ سنگ بکر است و جریان سیال در توده سنگ به‌وسیله درزه‌ها کنترل می‌شود (Itasca Consulting Group, 2015).

در DEC^3 مدل‌سازی جریان سیال در درزه‌ها بدون بررسی تاثیر فشار سیال روی تغییر شکل‌های سنگ و یا تاثیر تغییر شکل‌های سنگ روی پراکندگی جریان سیال امکان‌پذیر شده است. این حالت از تحلیل‌ها توأمان نشده^۲ یا جریان محض^۳ نامیده می‌شود، زیرا حجم ویژه جریان توسط جریان تراکم پذیر کنترل می‌شود و توده سنگ بی‌نهایت سخت (صلب) در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل‌های جریان سیال، سیال به‌صورت جریان گذرا (که در آن زمان بسیار مهم است) یا پایدار (که در آن تنها فشار در مدت زمان طولانی مورد نیاز است) در نظر گرفته می‌شود. در DEC^3 روش حل همواره به‌صورت گذرا است. اگر روش پایدار در نظر گرفته شود، مسایل گذرا تا زمانی که فشار منفذی تغییرات طولانی نداشته باشد، به‌سادگی اجرا می‌شود. توجه شود که کاهش مدول حجمی سیال در یک تحلیل جریان سیال، زمان محاسبات را افزایش نمی‌دهد. کاهش مدول حجمی گام زمانی و نیز زمان رسیدن به حالت پایدار را افزایش می‌دهد. بنابراین، برای تحلیل حالت پایدار، انتخاب مدول حجمی (K_w) اهمیت بالایی ندارد. برای تحلیل حالت گذرا، انتخاب K_w برای رسیدن به مقیاس زمانی درست دارای اهمیت است. اگر مدول حجمی صحیح سیال استفاده شود، به این معنی است که توده سنگ صلب است و تغییر شکل‌پذیری خلل و فرج نسبت به مقیاس زمان فرایندهای پراکندگی (انتشار سیال) کاملاً نادیده گرفته شده است. به‌هرحال تحت شرایط ویژه شبیه‌سازی رفتار جریان ممکن می‌شود اما محاسبه تغییر شکل‌پذیری توده سنگ (به‌عنوان مثال ذخیره متناسب با تغییر شکل) به‌وسیله کاهش مدول استفاده شده انجام می‌گیرد. در این روش، به دست آوردن مقیاس زمانی درست

¹ Cross-sectional area

² Uncoupled

³ Fluid-only

در مدل بدون انجام شبیه‌سازی‌های زمان‌بر توامان^۱ ممکن می‌شود. نرخ انتشار فشار در یک محیط اشباع به وسیله نفوذ (تراوش) نشان داده می‌شود:

$$c = \frac{k_H}{S} \quad (5-3)$$

در این رابطه k_H هدایت هیدرولیکی (دارای واحد طول به زمان)، S مقدار ذخیره یا به عبارتی اندازه مخزن است (دارای واحد عکس طول). اگر سختی درزه نادیده گرفته شود، ذخیره‌سازی در درزه‌های اشباع می‌تواند به صورت زیر ارایه شود:

$$S = \frac{1}{\rho_w g} \left(\frac{u_h / s}{K_w} + \frac{1}{K + 4/3G} \right) \quad (6-3)$$

در این رابطه، u_h بازشدگی هیدرولیکی است، s فاصله‌داری درزه‌ها، K_w مدول حجمی سیال، K مدول حجمی سنگ و G مدول برشی سنگ است. از آنجا که در یک تحلیل جریان سیال، سنگ به صورت صلب فرض می‌شود، عبارت دوم رابطه فوق صفر است. برای در نظر گرفتن تغییر شکل سنگ، می‌توان مدول حجمی ظاهری سیال را به صورت زیر نشان داد:

$$K a_w = \frac{u_h / s}{\frac{u_h / s}{K_w} + \frac{1}{K + 4/3G}} \quad (7-3)$$

توسط نتایج حاصل از رابطه‌های فوق می‌توان مقادیر ذخیره (مقدار حجم) دقیق^۲ (رابطه (۶-۳)) و بنابراین انتشار دقیق^۳ (رابطه (۵-۳)) و مقیاس زمان را در تحلیل‌های جریان سیال محاسبه نمود (Itasca Consulting Group, 2015).

۶-۳ حجم معرف اولیه (REV)

المان حجم معرف به عنوان یکی از مهم‌ترین بحث‌های جریان در محیط‌های سنگی شناخته می‌شود و تاثیر بسزایی در نتایج مدل‌سازی‌ها دارد. به عبارتی دیگر قبل از انجام اعتبارسنجی‌های مربوط

¹ Coupled

² Correct storage

³ Correct Diffusivity

به نتایج باید ابتدا از صحت اندازه المان معرف اطمینان حاصل کرد. توده سنگ به صورت مجموعه‌ای از فضاهای خالی (شکستگی‌ها و حفرات خالی) و ماتریکس سنگی (ماده سنگ) در نظر گرفته می‌شود. یک نمونه به اندازه کافی بزرگ در داخل دامنه (و یا از توده سنگ مورد بررسی) به مرکزیت نقطه مورد بررسی که بتواند رفتار سیال در نقطه مورد نظر و یک همسایگی از آن را به طور مناسبی برآورد کند تحت عنوان حجم معرف اولیه (*REV*) نامیده می‌شود. حجم اولیه از لحاظ آماری پرمعنا بوده و بایستی شرایط زیر را برآورده کند (*Min et al, 2004*):

- اندازه *REV* باید به گونه‌ای باشد که پارامترهای نشان‌دهنده توزیع فضای خالی (شکستگی‌ها و حفرات) و ماتریکس سنگی از نظر آماری معنادار باشد و مقادیر میانگین‌گیری شده مربوط به متغیرهای مورد بررسی در این حجم بایستی مستقل از اندازه و شکل و جهت‌داری *REV* باشد.
- اندازه *REV* باید از مقیاس ماکروسکوپی، مثل تغییرات رخسار در سنگ متخلخل و یا تغییرات لیتولوژی مربوط به تغییرات دانسیته درزه‌داری در توده سنگ درزه‌دار، کوچک‌تر باشد.
- اندازه *REV* باید از اندازه ناهمگنی‌های میکروسکوپی، مثل ابعاد فضای خالی و یا ناهمگنی‌های ماکروسکوپی مانند فاصله‌داری شکستگی‌ها در توده سنگ درزه‌دار، بزرگ‌تر باشند.
- اندازه *REV* باید خیلی کوچک‌تر از ابعاد دامنه مورد بررسی باشد.

بیر^۱ (*REV* ۱۹۹۳) را به صورت کوچک‌ترین حجم یا محدوده‌ای که در آن خواص دامنه به طور اساسی ثابت بماند تعریف کرده است (*Min et al, 2004*).

^۱ Bear

۷-۳ تخمین تانسور نفوذپذیری دوبعدی

در گذشته روش‌های گوناگونی برای تخمین مولفه‌های تانسور نفوذپذیری توسط محققین ارایه شده است. در یکی از این روش‌ها با به‌کارگیری دو هد هیدرولیکی ثابت در دو طرف نمونه و در نظر گرفتن شرایط مرزی بدون جریان در دو طرف دیگر مدل، تانسور نفوذپذیری به دست می‌آید (Panda and Kulatilake, 1999). در برخی پژوهش‌ها از روشی که توسط لانگ در سال ۱۹۸۵ برای تخمین مولفه‌های نفوذپذیری گسترش یافت، استفاده شده است. در این روش با اعمال دو هد هیدرولیکی ثابت در دو طرف مدل‌ها و دو گرادیان هیدرولیکی در دو طرف دیگر مدل‌های چرخیده شده‌ی شبکه شکستگی، مولفه‌های جریان به دست می‌آید و سپس شرایط وجود تانسور نفوذپذیری معادل با استفاده از معیار میانگین مربع خطا نرمالیز شده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Long et al, 1982). لی و همکاران در سال ۱۹۹۵ با در نظر گرفتن ویژگی‌های آماری هندسه‌ی شبکه‌ی درزه‌ها (بازشدگی، اندازه و جهت‌داری) تانسور نفوذپذیری توده سنگ را به دست آوردند. روش دیگر توسط ژانگ در سال ۱۹۹۶ بر اساس نظریه جمع آثار گسترش یافت (Zhang and Sanderson, 1996). جکسون در سال ۲۰۰۰ از رویکرد دیگری برای محاسبه نفوذپذیری استفاده کرد که در آن در لبه‌های شبکه شکستگی یک گرادیان هیدرولیکی ثابت به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شد. در این رویکرد که سپس توسط بلووم در سال ۲۰۰۴ بکار گرفته شد، از مدل‌های چرخیده شده و با اعمال گرادیان‌های هیدرولیکی برای به دست آوردن تانسور نفوذپذیری استفاده شده است (Blum, 2004).

۸-۳ جمع‌بندی

مطالعه رفتار جریان سیال درون شکستگی و شبکه شکستگی با هدف افزایش کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی در سازه‌های زیرزمینی به‌عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی مطرح است. با به‌کارگیری مدل مناسب برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده سنگ اطراف حفریات زیرزمینی، مثل تونل و مغارهای زیرزمینی، می‌توان دقت مطالعات طراحی و ایمنی را افزایش داد. ساده‌سازی و

کاربردی سازی مسایل پیچیده عموماً با استفاده از روش‌های مدل‌سازی انجام می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار پیچیده‌ی هیدرولیکی سنگ لازم است که پارامترها و عوامل موثر در رفتار هیدرولیکی توده سنگ بررسی شود. اغلب پژوهشگران با توجه به طبیعت ناپیوسته‌ی توده سنگ و عدم قطعیت‌های بسیاری که با آن روبرو هستند، استفاده را از روش‌های عددی را در شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته ترجیح می‌دهند. اهمیت این موضوع موجب ساخت نرم‌افزارهای سه‌بعدی با قابلیت شبیه‌سازی توده سنگ درزه‌دار و تحلیل جریان سیال آن شده است. منطق جریان سیال در DEC ۳ و روابطی که در تحلیل جریان سیال توسط آن بکار گرفته می‌شود، به‌طور خلاصه بحث شد. روش محاسبه و همچنین شرایط لازم برای رسیدن به اندازه REV که تاثیر قابل ملاحظه‌ای در رسیدن به قابل اعتمادترین و ایده‌آل‌ترین جواب دارد، تشریح شد.

فصل چہارم

مدل سازی هندسی و تخمین نفوذپذیری توده

سنگ ساختمگاه سد پارسیان

۴-۱ مقدمه

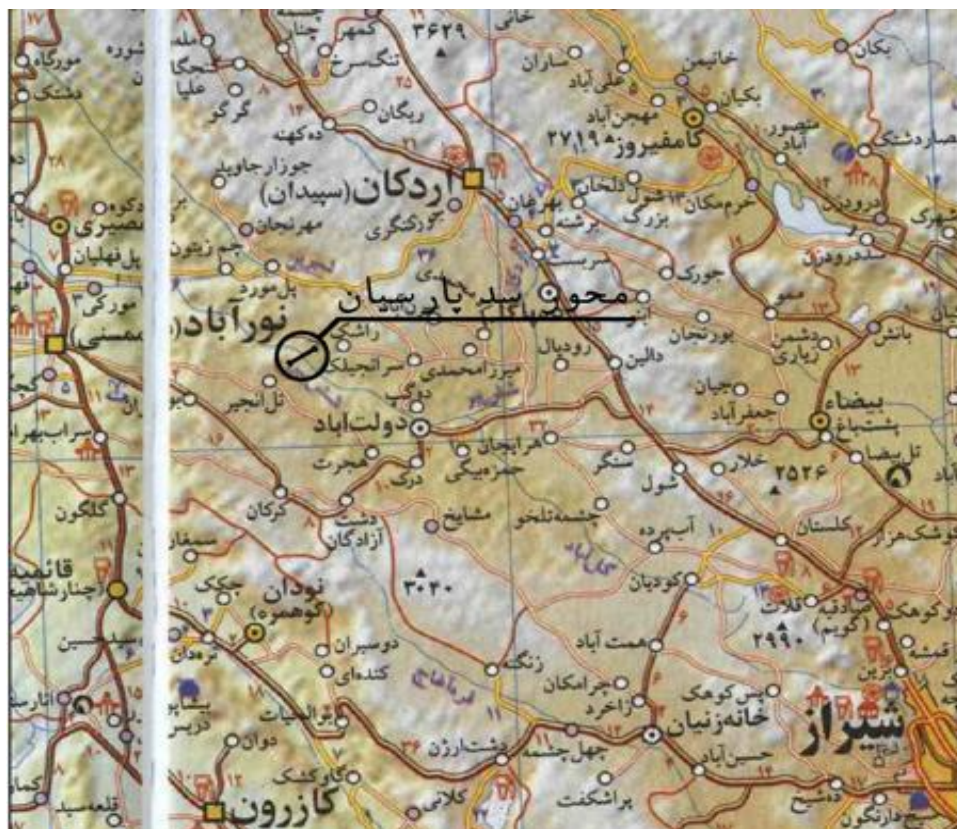
در فصل‌های پیشین مفاهیم مربوط به فرایندهای هیدرولیکی در سنگ‌های درزه‌دار و اصول مدل‌سازی جریان سیال در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش به منظور مطالعه اثر ویژگی‌های هندسی درزه‌ها بر نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار و نیز تاثیر این عوامل بر تانسور نفوذپذیری معادل، از روش شبکه شکستگی مجزا استفاده شده است. برای این منظور در این فصل با تمرکز بر ساختگاه سد مخزنی پارسیان، به بررسی فرض‌های اولیه و توابع توزیع به کار گرفته شده در تولید شبکه شکستگی مجزا و چگونگی تولید مدل‌های شبکه شکستگی با استفاده از مدل *DFN* پرداخته می‌شود. از آنجا که موفقیت در مدل‌سازی رفتار توده سنگ در گرو اختصاص مدل‌های رفتاری مناسب به جسم سنگ و درزه‌های موجود در مدل است، در خصوص مدل‌های رفتاری بکار رفته در مدل‌سازی درزه‌ها توضیحاتی ارائه خواهد شد. سپس نحوه به دست آوردن تانسور نفوذپذیری توده سنگ و نیز روند تحلیل حساسیت مربوط به پارامترهای هندسی موثر بر جریان سیال توسط نرم‌افزار تجاری *DEC3* تشریح می‌شود.

۴-۲ ویژگی‌های پروژه سد مخزنی پارسیان

به منظور استفاده بهینه از منابع آب کشور برای تامین آب کشاورزی مورد نیاز دشت‌های پایین‌دست، تولید انرژی برقابی و کنترل سیلاب‌ها مطالعات طرح سد مخزنی پارسیان واقع بر روی رودخانه شول در نزدیکی روستای گورک از توابع شهرستان نورآباد در استان فارس انجام گرفته است.

۴-۲-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

گستره‌ی مورد مطالعه در استان فارس و در حدود ۱۳۵ کیلومتری شمال غربی شهر شیراز و در ۵۴ کیلومتری شرق شهرستان نورآباد ممسنی واقع است، همان‌طور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است مختصات سد در طول $31^{\circ}33'35''$ شمالی و عرض $51^{\circ}48'20''/07$ شرقی و عرض $31^{\circ}33'35''/61$ شمالی واقع شده است.



شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیای و راه‌های دسترسی ساختگاه سد پارسیان (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۹۳).

۴-۲-۲ خلاصه‌ای از زمین‌شناسی عمومی و مهندسی

گستره‌ی مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری- رسوبی ایران زمین در ناحیه زاگرس چین‌خورده قرار دارد. در حوضه آبریز رودخانه شول که ساختگاه سد پارسیان بر روی آن قرار دارد، سنگ‌های گوناگون متعلق به سازندهای مختلف از دوران میانه زیستی تا زمان حاضر رخمون دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌های شناخته‌شده در گستره طرح، آهک و آهک‌های دولومیتی هستند که با سنی معادل ژوراسیک فوقانی در قسمت شمال شرقی حوضه آبریز به صورت محدود، رخمون داشته و جوان‌ترین سازندها متعلق به نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر است که در بستر رودخانه در حال تشکیل است. در این ناحیه راستای چین‌خوردگی‌ها در جهت شمال غربی- جنوب شرقی است و صفحه‌های محوری آن‌ها به صورت مارپیچ مانند و تاب‌خورده است. در این ناحیه، تاقدیس‌ها، بلندی‌ها را تشکیل می‌دهند و ناودیس‌ها، فرورفتگی‌های پهنه زاگرس را می‌سازند (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۹۳).

۱-۲-۲-۴ واحدهای سنگ چینه‌شناسی

کهن‌ترین سنگ‌هایی که در گستره حوضه آبریز برون‌زد دارد، گروهی از سنگ‌های آهکی هستند که تحت عنوان گروه خامی تقسیم‌بندی شده‌اند. این گروه از سنگ‌ها به زمان ژوراسیک بالایی تا کرتاسه پایینی نسبت داده می‌شوند.

۲-۲-۲-۴ واحدهای سنگ چینه‌ای ساختگاه

واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون یافته در موقعیت ساختگاه سد پارسیان از قدیم به جدید شامل سازندهای آسماری، گچساران، بختیاری و همچنین نهشته‌های کواترنر است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگ چینه‌ای رخنمون یافته در موقعیت ساختگاه سد پارسیان متعلق به سازند آسماری است. سازند آسماری در طول محور تاقدیس پارسیان (گورک) با زاویه میل حدود ۵ درجه به طرف شرق، از موقعیت دهانه ورودی به دره گورک موجب رخنمون شدن واحدهای سنگ چینه‌ای این سازند شده است. واحدهای سنگ چینه‌ای تشکیل‌دهنده سازند آسماری در محدوده ساختگاه به سه بخش فوقانی، میانی و تحتانی به شرح ذیل قابل تفکیک است:

الف- آسماری تحتانی

آسماری تحتانی (با نماد As^c) در فاصله حدود ۱۵۰۰ متری (به خط خمیده) از ابتدای ورودی به دره گورک در کف و حاشیه بستر و هر دو تکیه‌گاه رخنمون داشته و به تدریج در راستای محور تاقدیس (شرقی - غربی) با شیب ملایم از کف بستر به طرف پایین‌دست رودخانه ارتفاع می‌گیرد. این واحد از آهک‌های کریستالین فسیل دار بزرگ تا ضخیم لایه همراه با میان لایه‌های آهک مارنی تشکیل شده است و ضخامت این واحد بر اساس حفاری‌های انجام شده حدود ۱۵۰ متر اندازه‌گیری شده است.

ب- آسماری میانی

این واحد سنگ چینه‌ای (با نماد As^b) از آهک و آهک‌های مارنی نازک تا متوسط لایه همراه با

میان لایه‌های مارن به ضخامت ۱ تا ۳ سانتی‌متر تشکیل شده است. واحد مذکور به ضخامت حدود ۷۰ - ۱۰۰ متر پهنه میانی هر دو تکیه‌گاه سد را شامل می‌شود. فرسایش‌پذیری نسبتاً بیشتر و مقاومت کمتر واحدهای تشکیل‌دهنده این بخش از سازند آسماری نسبت به بخش تحتانی، موجب ایجاد شیب نسبتاً ملایم (۳۵ تا ۵۵) در هر دو دیواره کرانه راست و چپ در این واحد می‌شود.

پ- آسماری فوقانی

آسماری فوقانی (با نماد A_s^a) در محدوده ساختگاه شامل آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه، لایه‌های نازک مارن و آهک مارنی است و در قسمت تحتانی آن آهک‌برشی دیده می‌شود. آهک‌های مزبور صخره ساز بوده و در ترانشه‌های حاشیه دره آثار و شواهد کارست‌های متعدد توسعه‌یافته در آن دیده می‌شود. ضخامت این واحد حدود ۳۵ تا ۵۰ متر تخمین زده می‌شود.

۴-۲-۳ نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری در ساختگاه سد

روند انجام آزمایش‌های لوژان در ساختگاه سد به این صورت بوده که در هر گمانه پکرها در فاصله‌های ۵ متری قرار داده شده‌اند، به عبارتی طول گمانه برای اجرای آزمایش لوژان برابر ۵ متر بوده است. طوری که در هر گمانه به‌ویژه گمانه‌های ۱S و ۵S با عمق‌هایی برابر با ۲۲۵/۶۵ و ۲۱۶/۸۶ متر که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، آزمایش لوژان به ترتیب ۳۲ و ۳۰ بار انجام شده است. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه انجام آزمایش‌های لوژان در گمانه‌های ۱S و ۵S به ترتیب تا عمق‌های ۶۵ و ۷۵ متری میسر نبوده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری در تکیه‌گاه‌ها و بستر ملاحظه می‌شود که در بیشتر آزمایش‌ها، نفوذپذیری‌ها در جناحین و بستر سد، در رده‌ی نفوذپذیری کم (۳ تا ۱۰ عدد لوژان) قرار دارد.

به‌طوری که در جناح راست و بستر، ۶۳ درصد آزمایش‌ها و در جناح چپ ۴۸ درصد مقادیر نفوذپذیری به دست آمده در رده‌ی نفوذپذیری کم را نشان می‌دهند. در سنگ‌های بستر رودخانه که

محدوده‌ی مورد مطالعه‌ی این پژوهش محسوب می‌شود، عمده‌ی نفوذپذیری‌های محاسبه شده با انجام آزمایش‌های لوژان برابر با ۱۰ تا ۲۰ واحد لوژان است. همچنین به‌طور محلی در گمانه‌های ۱S و ۵S که در طرفین گسل *FU* حفر شده‌اند (شکل ۴-۲)، عمده‌ی نفوذپذیری‌ها در رده‌ی نفوذپذیری کم (۳ تا ۱۰) تا متوسط (۱۰ تا ۲۰) قرار می‌گیرند.

با توجه به نتایج تمامی آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده، به‌خوبی می‌توان تشخیص داد که بین مقادیر آزمایش‌های انجام شده در پهنه گسل و دیگر بخش‌ها هیچ‌گونه تفاوت بارز و چشمگیری دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر مقادیر نفوذپذیری در پهنه گسل در حد نفوذپذیری آهک‌ها است. به‌طور کلی عمده نفوذپذیری‌ها در محدوده ساختگاه پارسیان در رده متوسط تا کم قرار دارد (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۹۳).



شکل ۴-۲ نمایی از موقعیت گسل *FU* و گمانه‌ی ۱S

۳-۴ مطالعات میدانی

عملیات برداشت سطحی درزه معمولاً به دو صورت برداشت خطی و پنجره‌ای انجام می‌شود.

که در این پژوهش بخشی از داده‌های مربوط به برداشت خطی توسط شرکت مهندسين مشاور لار و داده‌های مربوط به پنجره برداشت توسط محقق پایان‌نامه انجام شده است. در برداشت خطی معمولاً از یک نوار یا متر استفاده می‌شود که بر روی یک رخنمون صاف از سنگ قرار داده می‌شود. تمامی درزه‌هایی که با نوار برخورد می‌کنند در نظر گرفته شده و مشخصات آن‌ها از قبیل شیب، امتداد شیب، طول خط اثر، مقدار بازشدگی و پرشدگی ثبت می‌گردد. امتداد نوار نیز باید به‌منظور تصحیح شیب و امتداد درزه‌های برداشت‌شده، ثبت شود.

اصول برداشت پنجره‌ای نیز مشابه برداشت خطی است، با این تفاوت که در این روش تمامی درزه‌هایی که تمام یا بخشی از آن‌ها در پنجره‌ای برداشت قرار گرفته باشد در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این روش باعث ایجاد خطای کمتری در تعیین سیستم درزه‌ی منطقه می‌گردد. یکی از مزایای دیگر این روش، قابلیت تعیین بعد فراکتالی درزه‌هاست که به‌وسیله‌ی آن می‌توان توزیع طول درزه‌های موجود در منطقه را مشخص نمود.

۴-۴ تحلیل آماری و تخصیص توابع توزیع مناسب ویژگی‌های هندسی درزه‌ها

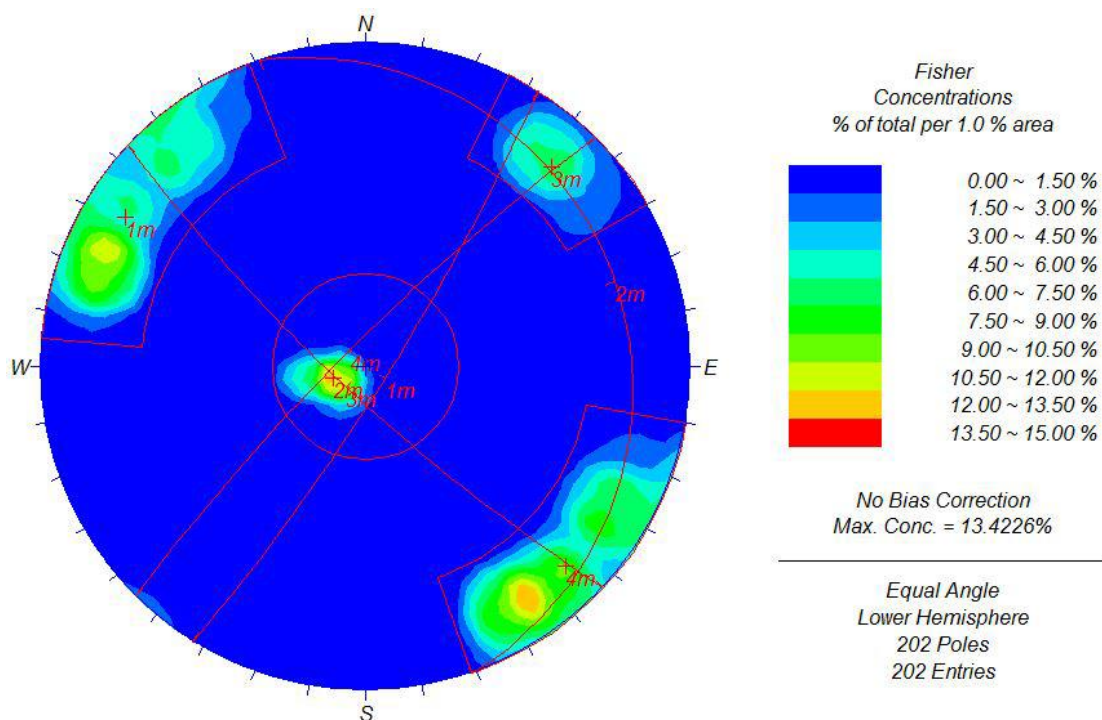
به‌طورمعمول جمع‌آوری داده‌ها به روش‌های برداشت خطی، بررسی گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی، پنجره برداشت و پردازش عکس‌های گمانه‌ها انجام می‌شود. در این پژوهش از داده‌های مربوط به برداشت خطی و گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی حفر شده توسط شرکت مهندسين مشاور لار استفاده شده و داده‌های مربوط به پنجره برداشت توسط محقق جمع‌آوری شده است.

تحلیل‌های آماری روی پارامترهای هندسی توده سنگ به‌وسیله نرم‌افزارهای *Minitab*، *Dips* و *Easyfit* انجام شده است. مهم‌ترین نکته در روند مدل‌سازی، صحت و قابل‌اعتماد بودن داده‌ها و مهم‌تر از هر موردی توانایی استفاده از این داده‌ها است، به‌طوری که این داده‌ها در نرم‌افزارهای مورد نظر قابل تعریف باشند. برداشت داده‌ها ممکن است در آزمون‌ها و امتدادهای مختلفی انجام شود و باید به این نکته توجه کرد که داده‌های مربوط به آزمون‌های مختلف را نمی‌توان به‌صورت ترکیبی تجزیه و

تحلیل کرد. به طور مثال داده‌های حاصل از برداشت در آزمون‌های عمود بر هم را نمی‌توان در یک گروه تحلیل کرد و این داده‌ها باید به طور حتم در یک جهت و یا در جهت مخالف (۱۸۰ درجه) برداشت شده باشند تا این قابلیت را داشته باشند که تحلیل‌های آماری روی آن‌ها صورت گیرد. در این صورت می‌توان به داده‌های این درزه نگاری برای ورود به مرحله مدل‌سازی اعتماد کرد. به این منظور، حین برداشت درزه‌ها، امتداد خود خط برداشت نیز در نظر گرفته شده است.

۱-۴-۴ توزیع جهت‌داری

در این پژوهش به منظور تحلیل داده‌های درزه‌نگاری مبتنی بر شیب و امتداد شیب از نرم‌افزار *Dips* استفاده شده است. به این منظور ابتدا داده‌های برداشت‌شده وارد نرم‌افزار *Dips* شد تا تعداد دسته درزه‌ها، شیب، جهت شیب و ثابت فیشر هر کدام از دسته درزه‌ها تعیین شود (شکل (۳-۴)).



شکل ۳-۴ جدایش دسته‌درزه‌ها در شبکه اشمیت

بعد از تحلیل درزه‌ها در *Dips* مشخص شد که درزه‌های ساختگاه سد را می‌توان در ۴ دسته درزه تقسیم‌بندی کرد. مقادیر وزن‌دار شیب، جهت شیب و ثابت فیشر مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها در

جدول (۱-۴) آورده شده است. همان‌طور که ذکر شد، جهت یافتگی درزه‌ها دارای دو مولفه جهت شیب و زاویه شیب است. این دو مولفه به‌صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود در مدل DFN تولید می‌شوند. بیشتر تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است نشان داده که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

جدول ۱-۴ پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌های برداشت‌شده

دسته درزه‌ها	جهت‌داری دسته‌درزه		ثابت توزیع فیشر (k)
	شیب	جهت شیب	
۱	۸۱	۱۲۲	۳۱/۵
۲	۱۱	۷۱	۵۰/۵
۳	۸۰	۲۲۳	۹۶
۴	۸۱	۳۱۵	۳۴/۵

۴-۲-۴ اندازه‌ی خط اثر درزه‌ها

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در ساخت شبکه شکستگی و به‌ویژه در تحلیل جریان سیال مدل، طول خط اثر یا اندازه شکستگی است. از آنجا که درزه‌ها در DEC ۳ به‌صورت دیسکی در نظر گرفته و مدل می‌شوند (Itasca Consulting Group, 2015)، طول خط اثر به‌نوعی تعیین‌کننده اندازه درزه است. در این شرایط، توزیع طول خط اثر درزه که در رخنمون قابل‌اندازه‌گیری است را به‌عنوان توزیع قطر درزه دیسکی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر مربوط به پایایی هر کدام از دسته درزه‌ها در جدول (۲-۴) ارائه شده است. هر یک از پارامترهای هندسی از یک تابع توزیع آماری خاصی پیروی می‌کنند که در شرایط پروژه‌های مختلف با توجه به فراوانی و پراکندگی داده‌ها ممکن است تبعیت یک پارامتر از یک تابع تغییر کند.

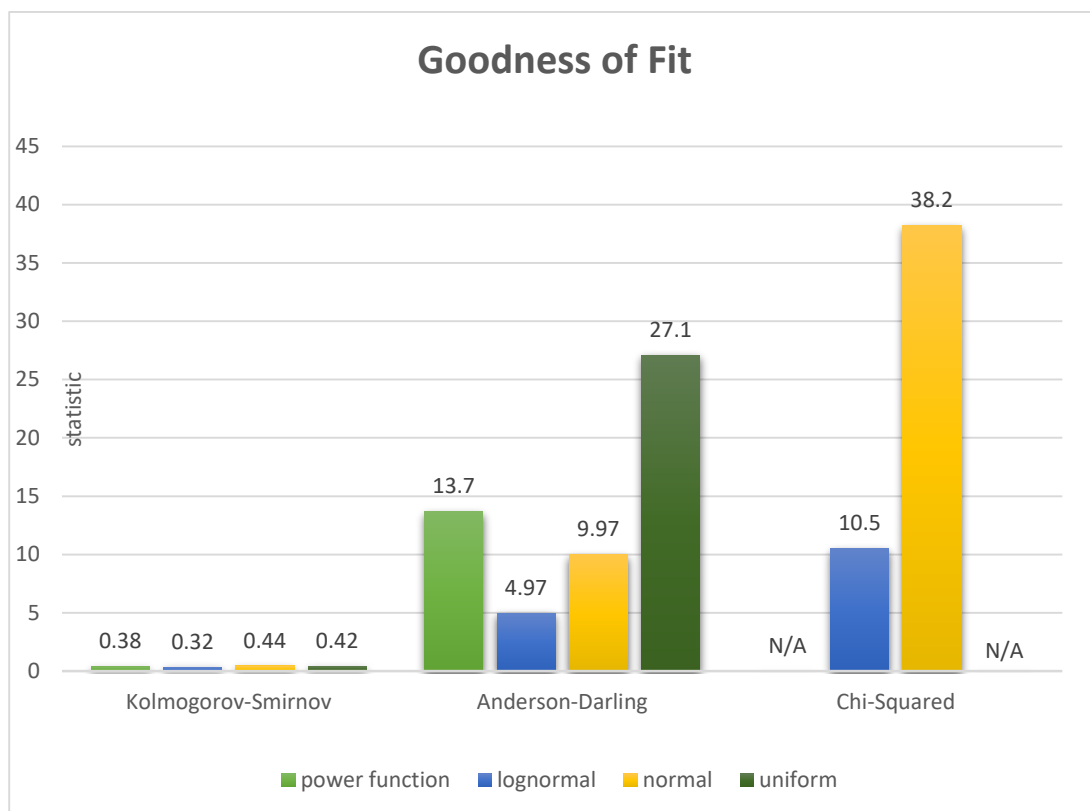
جدول ۴-۲ متوسط پایایی مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها

دسته درزه‌ها	متوسط پایایی (m)
۱	۳/۵
۲	۱۴/۷
۳	۴/۴
۴	۳/۲

در این پژوهش، داده‌های مربوط به پایایی هر کدام از دسته درزه‌ها به صورت جداگانه توسط نرم‌افزارهای *Easy_fit* و *Minitab* تحلیل و مناسب‌ترین توابع توزیع مربوط به پایایی مشخص می‌شود.

در این پژوهش برای مشخص شدن توابع توزیع حاکم بر پارامتر پایایی مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها، توابع ذکر شده در نرم‌افزارهای *Easy_fit* و *Minitab* تحلیل شده‌اند. این نرم‌افزارها مناسب‌ترین توابع توزیع مربوط به هر کدام از پارامترهای هندسی را ارائه می‌دهند. در این نرم‌افزار توابع توزیع زیادی تعریف شده است، اما به دلیل اینکه تعداد زیادی از این توابع توزیع در نرم‌افزار *DEC* ۳ قابل تعریف نیست و نیز با توجه به اینکه ممکن است پیروی داده از یک تابع توزیع در پروژه‌ای نسب به پروژه‌ی دیگر متغیر باشد بر اساس تاریخچه، متداول‌ترین تابع توزیع برای هر کدام از پارامترها انتخاب می‌شود.

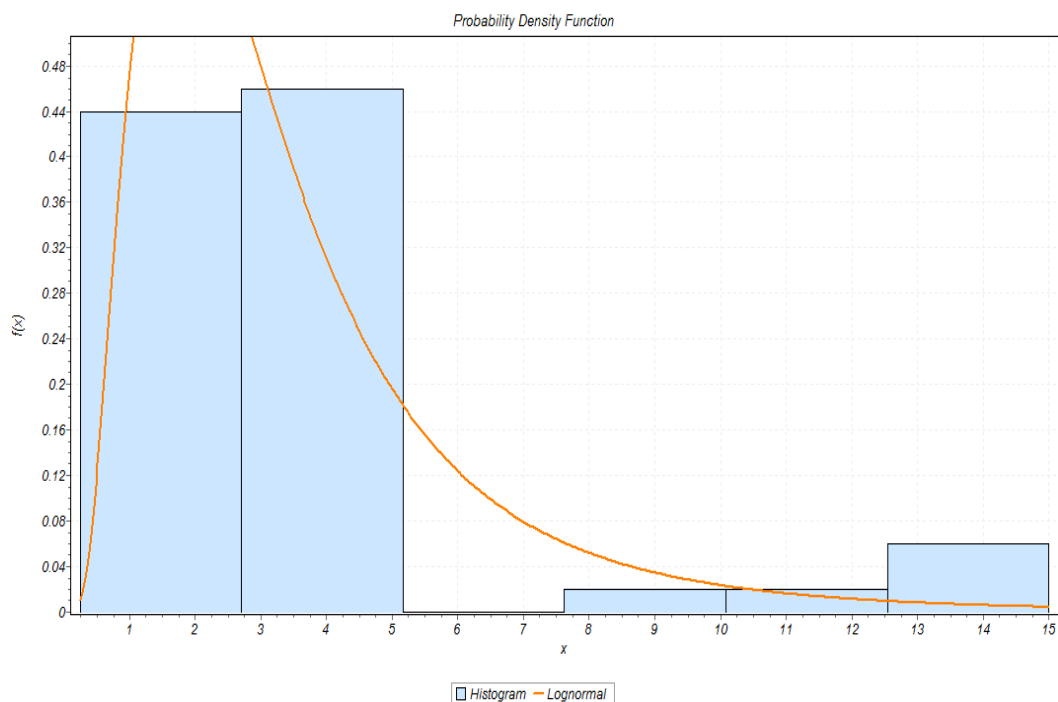
همان‌طور که در تاریخچه پژوهش هم به آن اشاره شد، تا به امروز محققان توابع توزیع توانی، لاگ‌نرمال و یکنواخت را به عنوان مناسب‌ترین تابع توزیع برای پایایی بررسی و استفاده کرده‌اند. با توجه به توزیع لاگ‌نرمال برای پایایی در نرم‌افزار *DEC* ۳ تعریف نشده است، توزیع نرمال نیز به لیست فوق اضافه می‌شود تا با تغییراتی در داده‌ها بر توزیع نرمال که در نرم‌افزار *DEC* ۳ قابل تعریف است، تبدیل شود. در شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۱۱ و جدول‌های (۴-۳) تا (۴-۶) نتایج برازش توابع توزیع مناسب برای پایایی هر یک از دسته درزه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۱

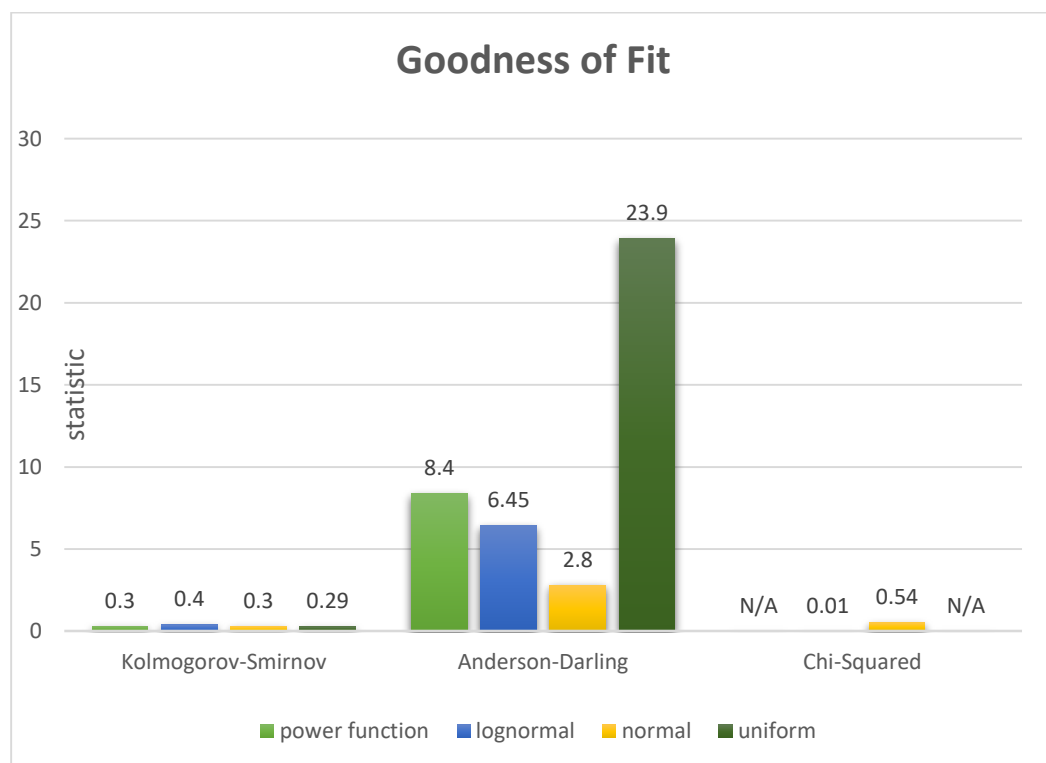
جدول ۳-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌های، دسته‌درزه ۱

ردیف	توزیع	کولموگروف-اسمینوروف	اندرسون-دارلینگ	کای-سکویر
		رتبه	رتبه	رتبه
۱	لاگ‌نرمال	۱	۱	۱
۲	نرمال	۴	۲	۲
۳	تابع توان	۲	۳	N/A
۴	یکنواخت	۳	۴	N/A



شکل ۴-۵ تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۱

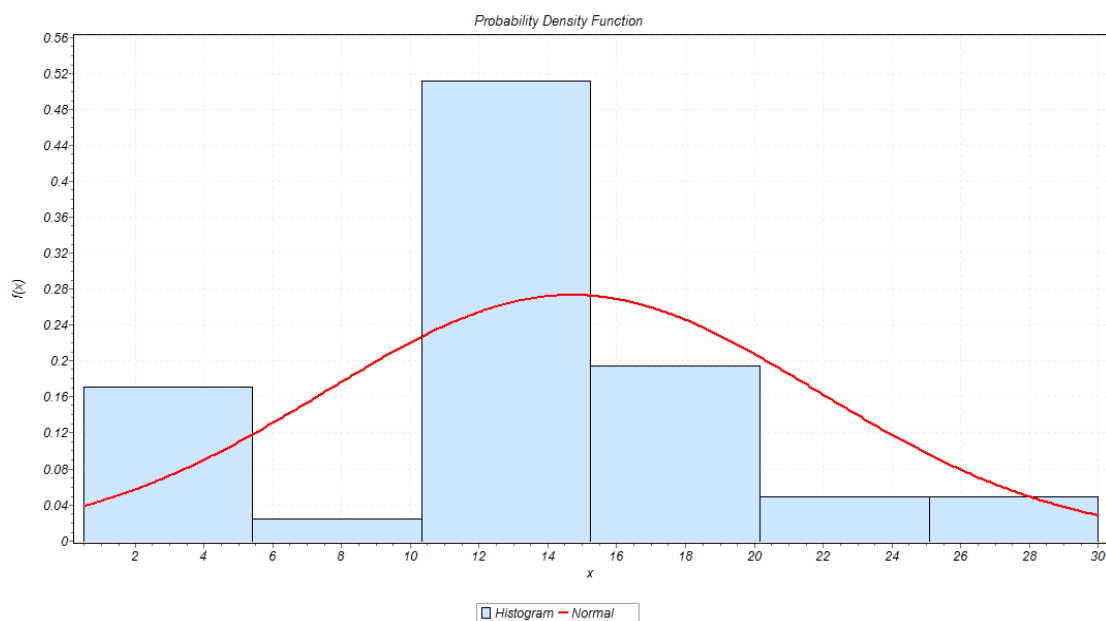
بعد از تحلیل‌های آماری داده‌های درزه نگاری مربوط به دسته درزه ۱ مشخص شده که مناسب‌ترین توزیع آماری برای پایایی دسته درزه ۱ توزیع لاگ نرمال است.



شکل ۴-۶ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۲

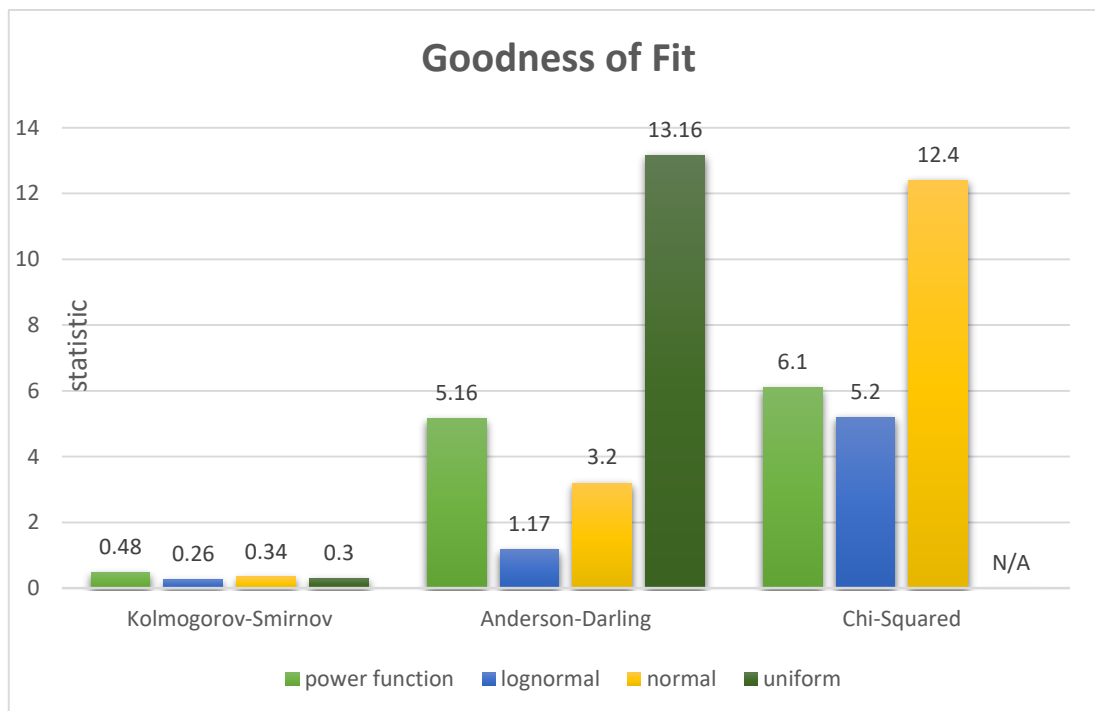
جدول ۴-۴ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۲

ردیف	توزیع	کولموگروف-اسمینوروف	اندرسون-دارلینگ	کای-سکویر
		رتبه	رتبه	رتبه
۱	لاگ‌نرمال	۴	۲	۱
۲	نرمال	۲	۱	۲
۳	تابع توان	۳	۳	N/A
۴	یکنواخت	۱	۴	N/A



شکل ۴-۷ تابع توزیع نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۲

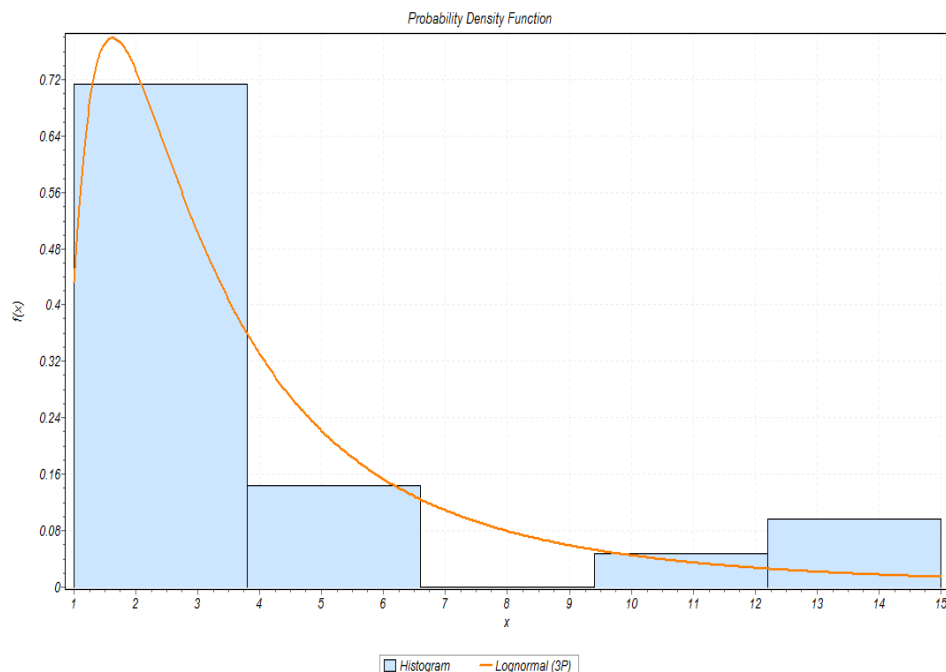
همان‌طور که در نمودارها نشان داده شده است، بعد از تحلیل‌های آماری داده‌های درزه نگاری مربوط به دسته درزه دوم مشخص شد که مناسب‌ترین توزیع آماری برای پایایی دسته درزه توزیع نرمال است.



شکل ۴-۸ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۳

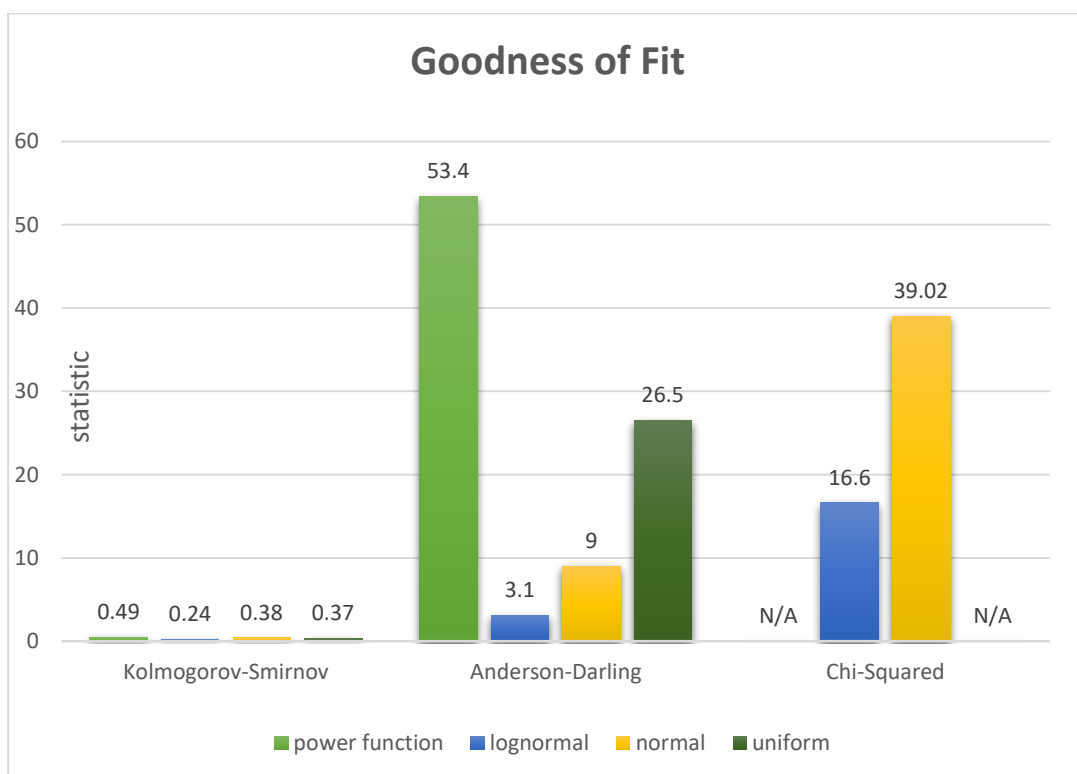
جدول ۴-۵ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۳

ردیف	توزیع	کولموگوروف-اسمینوروف	اندرسون-دارلینگ	کای-سکویر
		رتبه	رتبه	رتبه
۱	لاگ‌نرمال	۱	۱	۱
۲	نرمال	۳	۲	۳
۳	تابع توان	۴	۳	۲
۴	یکنواخت	۲	۴	N/A



شکل ۴-۹ تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۳

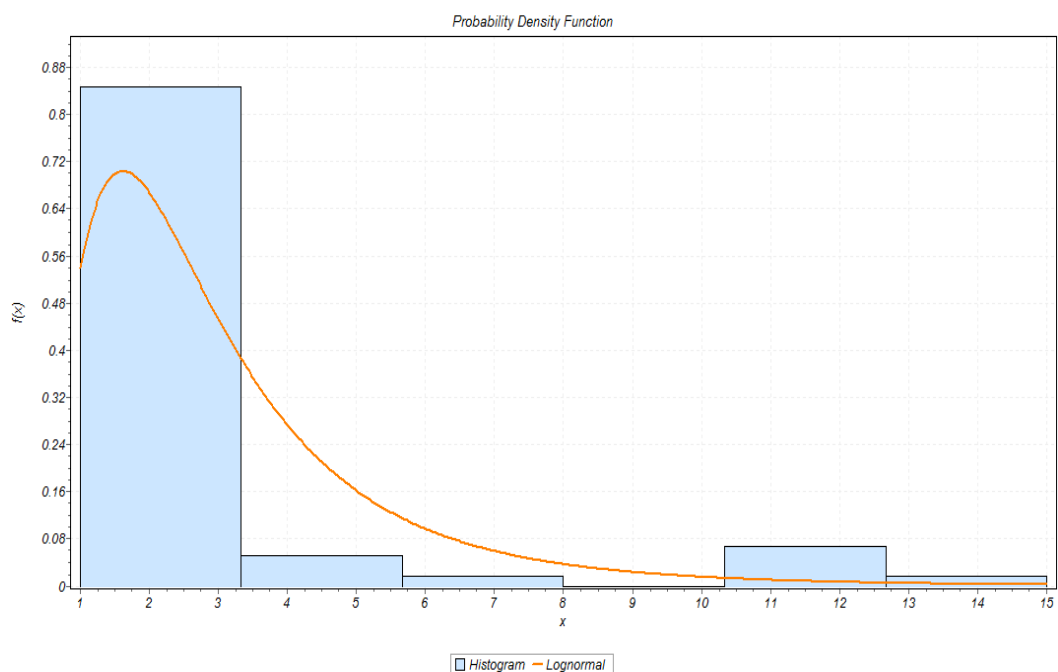
بعد از تحلیل‌های آماری داده‌های درزه نگاری مربوط به دسته درزه سوم مشخص شد که برای این دسته درزه نیز مناسب‌ترین توزیع آماری برای پایایی دسته درزه، توزیع لاگ نرمال است.



شکل ۴-۱۰ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش، دسته‌درزه ۴

جدول ۴-۶ رتبه‌بندی مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر پایایی درزه‌ها، دسته‌درزه ۴

ردیف	توزیع	کولموگروف-اسمینوروف	اندرسون-دارلینگ	کای-سکویر
		رتبه	رتبه	رتبه
۱	لاگ‌نرمال	۱	۱	۱
۲	نرمال	۳	۲	۲
۳	تابع توان	۴	۴	N/A
۴	یکنواخت	۲	۳	N/A

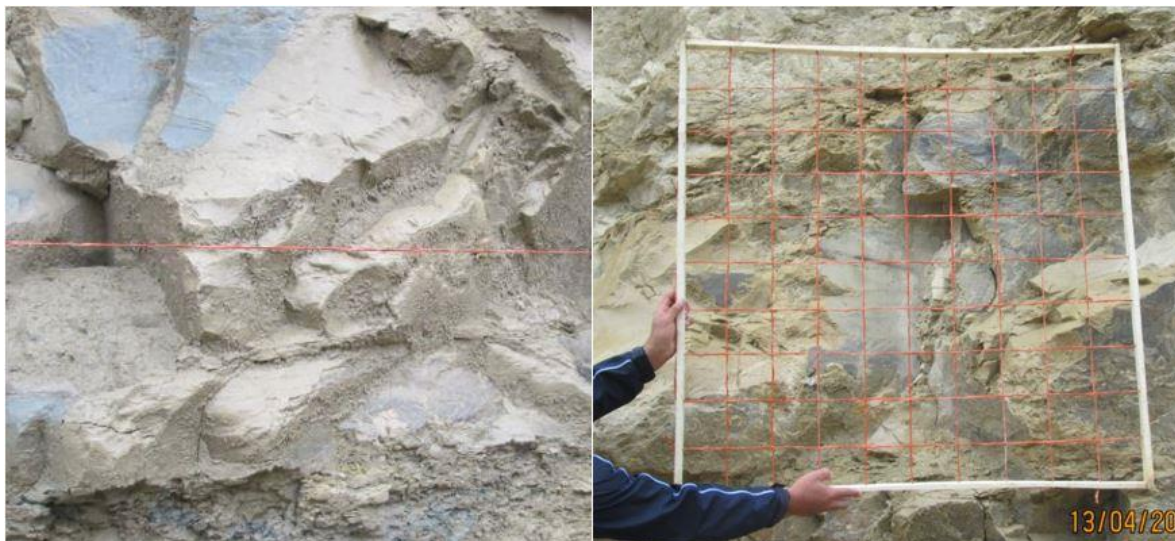


شکل ۴-۱۱ تابع توزیع لاگ‌نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت‌شده، دسته‌درزه ۴

روند تحلیل آماری برای دسته درزه چهارم نیز تکرار شد که در نهایت مناسب‌ترین تابع توزیع برای این دسته درزه هم توزیع لاگ‌نرمال تشخیص به دست آمده است.

۴-۴-۳ چگالی و شدت درزه‌ها

چگالی درزه‌ها با توجه به بعد و روش‌های برداشت، مقادیر مختلفی دارد. شکل (۴-۱۲) نمایی از روش‌های برداشت توسط محقق را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ نمایی از برداشت‌های خطی و پنجره‌ای انجام شده

چگالی و شدت می‌توانند تعاریف متمایزی با توجه به اختلاف بعد اندازه‌گیری و بعد مورد بررسی داشته باشند. در ساخت DFN به‌وسیله نرم‌افزار DEC ۳ امکان تعریف چگالی و شدت برای تعیین پارامتر تراکم شکستگی‌ها وجود دارد. چگالی و شدت شکستگی‌ها اصولاً جایگزینی برای پارامتر فاصله‌داری که تنها محدود به یک بعد (برداشت خطی و گمانه) است، در نظر گرفته می‌شود.

در روش‌های مدل‌سازی مقادیر پارامتر P_{10} که معرف چگالی درزه‌ها از طریق برداشت داده‌های خطی و مغزه‌های گمانه‌های حفاری‌شده است، محاسبه می‌شود. پارامتر P_{32} نیز که به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده شدت حجمی شکستگی‌ها شناخته می‌شود، با استفاده از پارامتر P_{21} مطابق با داده‌های از روش برداشت پنجره‌ای (شکل (۴-۱۳)) و کاربرد روابط ژانگ و اینیشیتین (که در ادامه آورده شده‌اند) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر عددی این پارامترها در مدل‌سازی وارد می‌شود و نیازی به تعریف توابع توزیع آماری برای این دو پارامتر نیست.

پارامتر سه‌بعدی شدت درزه، P_{32} ، به‌صورت مساحت کلی سطح درزه‌دار بر واحد حجم تعریف می‌شود. این پارامتر مانند پارامتر P_{21} مستقل از مقیاس و به‌عنوان پارامتری حجمی، مستقل از جهت نیز هست. به‌طور کلی مقدار شدت حجمی درزه P_{32} (بر حسب مترمربع بر مترمکعب)، از مقادیر شدت سطحی برداشت شده P_{21} (بر حسب متر بر مترمربع)، به دست می‌آید.



شکل ۴-۱۳ نمایی از برداشت پنجره‌ای به روش محاسبه $P_{۳۱}$

ژانگ و انیشتین در سال ۲۰۰۰ رابطه‌ی زیر را برای محاسبه $P_{۳۲}$ پیشنهاد کردند:

$$P_{۳۲} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (۴-۱)$$

در این رابطه، N_T تعداد کلی درزه‌های برداشت شده، $E(A)$ مساحت متوسط درزه و V حجم واحد است.

$E(A)$ با رابطه‌ی زیر و با فرض دایره‌ای بودن درزه محاسبه می‌شود.

$$E(D) = \frac{۱۲۸\mu_l^2}{3\pi^2(\mu_l^2 + \sigma_l^2)} \quad (۴-۲)$$

در این رابطه، $E(D)$ قطر متوسط درزه، μ_l طول اثر متوسط و σ_l برابر با انحراف استاندارد است.

در این پایان‌نامه، درزه‌های قابل برداشت با چشم غیرمسلح با استفاده از یک چارچوب ۱ مترمربعی دارای شبکه مش بندی ۱۰ سانتی‌متر مربعی با روش برداشت پنجره‌ای در محل ساختگاه سد شمارش شده‌اند. در این روش، درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌ای شمارش شده در چارچوب ۱ مترمربعی به‌عنوان چگالی سطحی درزه تعریف شده است.

با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۲ مقادیر $P_{۳۲}$ برای هر

دسته‌درزه به‌طور جداگانه محاسبه شده که به‌طور خلاصه در جدول (۷-۴) ارایه شده است.

جدول ۷-۴ مقادیر عددی مربوط به شدت شکستگی‌ها به تفکیک دسته درزه‌ها

دسته درزه	۱	۲	۳	۴
شدت شکستگی‌ها $(P_{rr} \left(m^2 / m^3 \right))$	۸/۰۹	۱۹/۹۵	۵/۲۳	۳/۰۲

۴-۴-۴ بازشدگی درزه‌ها

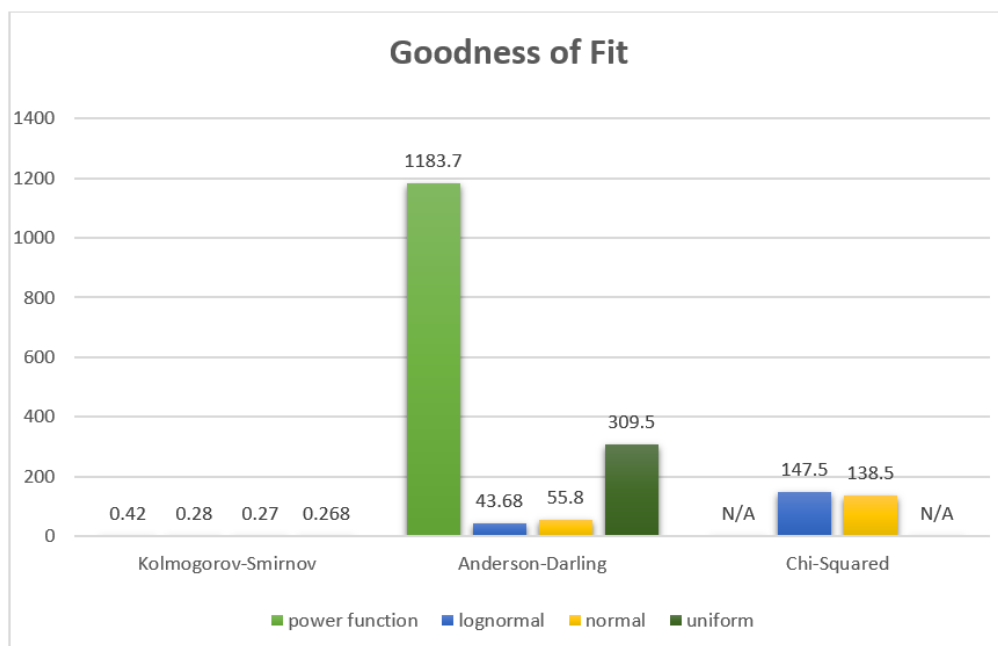
همان‌طور که در جدول (۸-۴) نشان داده شده است، در خصوص مورد مطالعاتی این تحقیق، نیز مشاهده می‌شود هم مقادیر عددی بازشدگی‌های مربوط به برداشت خطی میدانی و همچنین بازشدگی‌های مربوط به مغزه‌های گمانه‌ها در دسترس است. از طرفی بازشدگی شکستگی‌ها با توجه به تاثیر بسزایی که در هدایت جریان در مدل دارد باید به‌طور کاملاً دقیق اندازه‌گیری و در مدل لحاظ شود. بنابراین در این تحقیق، داده‌های مربوط به بازشدگی مغزه‌های گمانه‌های حفاری شده در محور سد که آزمایش‌های لوژان نیز در آن‌ها انجام شده است، انتخاب شده و در نرم‌افزارهای آماری تحلیل و در نهایت در مدل‌های DFN وارد شده است.

جدول ۸-۴ مقادیر بازشدگی مربوط به براشت‌های میدانی و گمانه‌ها

دسته درزه‌ها	متوسط بازشدگی (mm)	
	برداشت خطی	گمانه‌ها
۱	۲/۹	۲/۱
۲	۳/۶	۲/۱
۳	۲/۵	۲/۱
۴	۳/۵	۲/۱

با توجه به مقادیر حاصل از هر یک از روش‌های اندازه‌گیری بازشدگی شکستگی‌ها مشخص می‌شود که این مقادیر اختلاف چندانی با هم ندارند. همان‌طور که در فصل اول هم اشاره شد،

اعتبارسنجی نفوذپذیری مدل‌ها به وسیله‌ی داده‌های عدد لوژان انجام می‌شود، لذا به منظور افزایش دقت مدل‌سازی‌ها از مقادیر بازشدگی‌های مربوط به مغزه‌های گمانه‌های ۱S و ۵S که آزمایش‌های لوژان در آن‌ها انجام شده است، استفاده می‌شود. در نتیجه بدین ترتیب اعتبار سنجی نفوذپذیری‌ها از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار خواهد بود. همان‌طور که در جدول (۴-۸) مشاهده می‌شود مقادیر بازشدگی گمانه‌ها کمتر از بازشدگی‌های محاسبه شده در برداشت‌های صحرایی است. به عبارتی دیگر تاثیر کاهش بازشدگی‌های شکستگی‌ها در اثر فشار ناشی از روباره نیز در مدل‌ها دیده می‌شود. از طرفی از آنجا که آزمایش لوژان نیز در اعماق بیشتر از ۶۵ متر انجام شده است، این مورد نیز می‌تواند توجیهی برای استفاده از بازشدگی‌های محاسبه شده توسط مغزه‌ها به جای بازشدگی‌های محاسبه شده به روش برداشت‌های خطی میدانی باشد. طبق آنچه در تاریخچه ذکر شد، تا به امروز پرکاربردترین و مناسب‌ترین تابع توزیع برای بازشدگی، توزیع لاگ‌نرمال بوده است. به منظور بررسی و تعیین مناسب‌ترین تابع توزیع، توابع توزیع لاگ‌نرمال، نرمال، توانی و یکنواخت در نرم‌افزارهای *Easy_fit* و *Minitab* تحلیل می‌شوند. نتایج مربوط به تحلیل‌های آماری روی بازشدگی درزه در شکل (۴-۱۴) و جدول (۴-۹) آورده شده است.



شکل ۴-۱۴ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش بازشدگی گمانه ۱S

جدول ۴-۹ رتبه‌بندی توابع توزیع حاکم بر بازشدگی درزه‌ها- گمانه ۱S

ردیف	توزیع	کولموگروف-اسمینوروف	اندرسون-دارلینگ	کای-سکویر
		رتبه	رتبه	رتبه
۱	لاگ‌نرمال	۳	۱	۲
۲	نرمال	۲	۲	۱
۳	تابع توان	۴	۴	N/A
۴	یکنواخت	۱	۳	N/A

در نهایت با توجه به روند فوق مشخص است که توزیع نرمال مناسب‌ترین توزیع برای پارامتر بازشدگی است.

۵-۴ مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال در نرم‌افزار ۳DEC

نرم‌افزار ۳DEC یک برنامه سه‌بعدی است که بر اساس روش اجزای مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، به کار می‌رود. ویرایش جدید نرم‌افزار ۳DEC قابلیت تولید DFN را دارد. هر DFN مجموعه‌ای از دیسک‌ها است که در آن هر شکستگی یک المان نامیده می‌شود. DFN می‌تواند طبق الگوهایی که در آن‌ها مجموعه‌ای از پارامترهای آماری توصیف‌کننده‌ی توزیع شکستگی‌ها است، ایجاد شود.

در این روش، درزه‌ها به همان صورتی که برداشت‌شده‌اند نشان داده نمی‌شوند. مجموعه درزه‌ها به صورت حالات تصادفی منطبق با واقعیت^۱ ایجاد می‌شوند. با مدل DFN، تعداد شکستگی‌هایی که در توده سنگ وجود دارد به عنوان یک مجموعه مجزا، صفحه‌ای (مسطح) و در اندازه‌های محدود نشان داده می‌شود. معمولاً به صورت پیش‌فرض شکستگی‌ها به صورت دیسکی هستند. در ۳DEC مشخصات هندسی درزه‌ها به وسیله توزیع‌های آماری اندازه شکستگی (قطر)، جهت‌داری و موقعیت DFN پشتیبانی می‌شوند. وابسته به یک هسته‌ی تصادفی، تعداد زیادی حالات تصادفی مختلف DFN

^۱ Realizations

می‌تواند ایجاد شود. شکستگی‌ها به صورت صفحاتی که جداکننده بلوک‌های سنگی نفوذناپذیر هستند، نشان داده می‌شوند (Itasca Consulting Group, 2015).

۴-۵-۱ مدل *DFN*

برای تدوین مناسب‌ترین مدل *DFN* که بتواند نزدیک‌ترین مدل به حالت واقعی توده سنگ باشد، موارد بسیاری تاثیر گذار و دخیل هستند. همان‌طور که پیش‌تر هم بحث شد، جهت‌داری شکستگی‌ها شامل شیب و جهت شیب، اندازه شکستگی‌ها که تحت عنوان پایایی به آن پرداخته می‌شود، چگالی و شدت شکستگی که در نرم‌افزار *3DEC* به صورت پارامترهای P_{10} و P_{32} که به نوعی به عنوان جایگزین پارامترهای فاصله‌داری و فراوانی شکستگی‌ها قابل تعریف هستند و در نهایت بازشدگی شکستگی‌ها، به عنوان مهم‌ترین پارامترهای هندسی موثر در ساخت مدل *DFN* و نیز تحلیل جریان سیال در مدل‌ها، بررسی می‌شوند. در مورد توابع توزیع مربوط به پایایی و بازشدگی شکستگی‌ها، با توجه به عدم قابلیت نرم‌افزار *3DEC* در تعریف توابع توزیع پیشنهادی توسط نرم‌افزارهای آماری، یک سری معادل‌سازی‌ها روی توابع توزیع انجام گرفته است. به طور مثال پایایی برخی از دسته‌درزه‌ها از تابع توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند درحالی‌که توزیع لاگ‌نرمال در نرم‌افزار *3DEC* برای پایایی تعریف نشده است. اگر یک مجموعه داده پیرو تابع توزیع لاگ‌نرمال باشد، لگاریتم با مبنای عدد نپر این داده‌ها پیرو تابع توزیع نرمال می‌شود. به عبارتی اگر یک مجموعه داده پیرو تابع توزیع نرمال باشند، مقادیر لگاریتم این مجموعه پیرو تابع توزیع لاگ‌نرمال می‌شود. در نتیجه توزیع لاگ‌نرمال با توزیع نرمال معادل‌سازی شده است. این پارامترها که به عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار تجاری *3DEC* مطرح هستند در نهایت یک مدل *DFN* نزدیک به واقعیت از توده سنگ ساختگاه سد پارسیان ارایه می‌دهد.

با توجه به ذات آماری مدل‌های *DFN*، تعداد درزه‌های مدل شده از اهمیت قابل توجهی به‌ویژه در تعیین *REV* برخوردار است. در ساخت مدل‌های *DFN* می‌توان تعداد قابل توجهی درزه را بدون

بروز هیچ مشکلی در نظر گرفت. البته این تعداد درزه در مدل *DFN* فقط می‌تواند به‌منظور نشان دادن آماری بودن درزه‌ها و صرفاً انجام یک سری تحلیل‌های هندسی ساخته شود. مدل‌هایی با این تعداد درزه با یک مشکل جدی تحت عنوان پهنه‌بندی که لازمه تحلیل‌های جریان سیال و نیز تحلیل‌های دینامیکی است، روبرو خواهد بود.

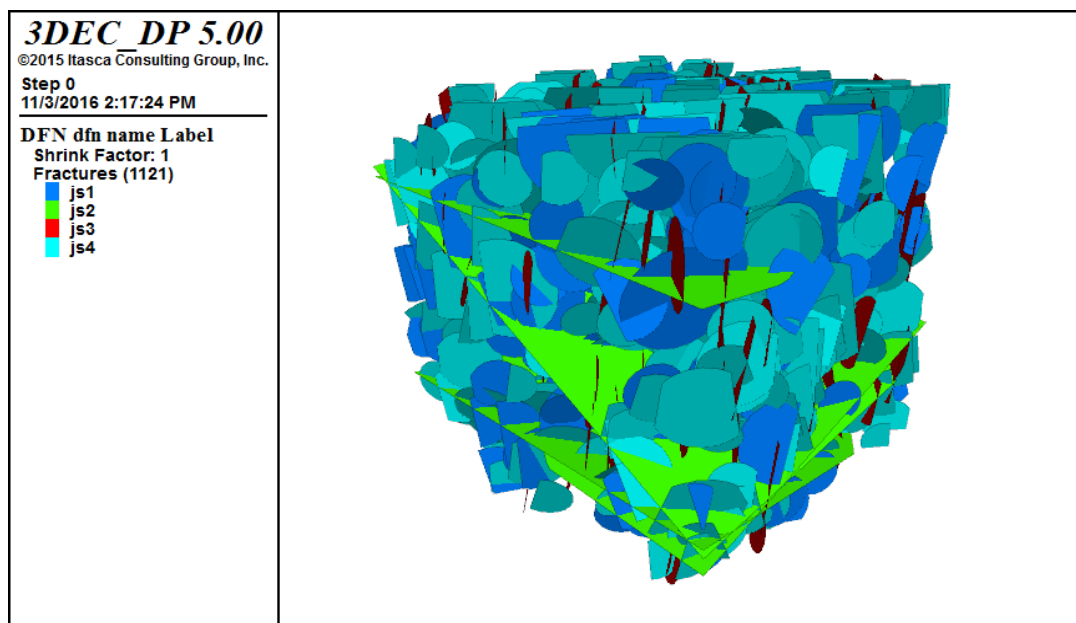
طبق مطالعات انجام شده در بخش سابقه پژوهش مهم‌ترین موردی که در مطالعات قبلی کاملاً نادیده گرفته شده است، محدوده‌ی تعداد درزه‌هایی است که قابلیت انجام تحلیل‌های جریان سیال را دارند. مورد ذکرشده به‌شدت محدوده تعیین *REV* را تحت تاثیر قرار می‌دهد و می‌توان ادعا کرد که در مطالعات قبلی هیچ محدوده‌ی *REV* قابل اطمینانی تعیین و ارایه نشده است.

دلیل این مورد وابستگی شدید نرم‌افزار *DEC ۳* به مشخصات سیستم‌های کامپیوتری است. به‌نحوی که متناسب با توان این سیستم‌ها و داده‌های مطالعه موردی مدنظر تعداد درزه‌ها در محدوده‌ی ۲۳ (اصفهانی، ۱۳۹۳؛ محمود پور، ۱۳۹۴) تا ۱۵۱۷ درزه قابل مدل کردن می‌شود. به عبارتی دیگر در مطالعات گذشته، مدل‌هایی با بیش از ۲۳ درزه ساخته نشده است، اما در این پژوهش در روند تعیین *REV*، مدلی با ۱۵۱۷ درزه نیز ساخته شده است. در این پژوهش با توجه به در دسترس بودن سیستم کامپیوتری نسبتاً پرسرعت این امکان ایجاد شد که تعداد درزه‌های مدل در حد قابل توجهی به شرایط واقعی ساختگاه سد نزدیک شود. در نهایت با توجه به موارد تاثیر گذاری از جمله *REV* بر تعداد درزه‌های مدل ارایه شده، مدلی با ۱۱۲۱ درزه ساخته شد. با توجه به گسترده بودن منطقه مورد مطالعه و تنوع زمین‌شناسی عمومی و مهندسی آن، می‌توان مدل‌های *DFN* را برای بخش‌های مختلف این پروژه ارایه داد و به‌طور جداگانه بررسی کرد و یا یک حالت میانگین از شرایط منطقه به دست آورد و مدل *DFN* متناظر آن را ارایه نمود. مدل ارایه شده به‌شدت به‌دقت و صحت داده‌های ورودی نرم‌افزار شامل شیب، جهت شیب، ثابت فیشر، پایایی، بازشدگی و شدت شکستگی‌های توده سنگ حساس است و خطاهای این مدل می‌تواند ناشی از خطا در داده‌های ورودی شامل محدودیت‌های مربوط به روش‌های برداشت و خطاهای مربوط به مشکلات نرم‌افزاری و توان سیستم‌های کامپیوتری

در دسترس باشد. اما با این تفاسیر، هنوز مدل *DFN* مناسب‌ترین مدل برای نشان دادن مشخصات هندسی واقعی توده سنگ است.

۴-۱-۵-۱ هندسه مدل

همان‌طور که در بخش‌های قبلی به تفصیل بحث شد، هندسه‌ی شبکه‌ی شکستگی توده سنگ در محل ساختگاه با توجه به پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده و پارامترهای توابع توزیع آماری حاکم بر پایداری، بازشدگی و جهت‌داری به‌عنوان ورودی مدل عددی با استفاده از نسخه‌ی آخر نرم‌افزار *3DEC* که قابلیت ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزای توده سنگ را دارد، تولید شده است. نمایی از مدل *DFN* ساخته شده توسط نرم‌افزار *3DEC* در ابعاد $10 \times 10 \times 10$ مترمکعب در شکل (۴-۱۵) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۵ مدل *DFN* متشکل از ۱۱۲۱ درزه در بلوک $10 \times 10 \times 10$ مترمکعبی

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، درزه‌ها به صورت دیسکی مدل شده‌اند. نرم‌افزار *3DEC* این قابلیت را دارد که با تعریف تابع توزیع برای پایداری، شکستگی‌ها را به صورت دیسکی و بر اساس معادل‌سازی طول خط اثر درزه با قطر دیسک، درزه‌های دیسکی را در مدل ایجاد کند. با دقت به شکل

مشاهده می‌شود که چند درزه چهارضلعی شکل نیز در مدل وجود دارد، دقت شود که این درزه‌ها نیز در واقع دیسکی هستند اما چون قطر دیسک که بر اساس پایایی توزیع می‌شود از بعد بلوک بزرگ‌تر است، به صورت چهارضلعی نشان داده شده‌اند، به عبارتی این دسته درزه با مرزهای بلوک برخورد کرده و شکل چهارضلعی به خود گرفته‌اند.

۴-۵-۱-۲ تخصیص ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سیال به *DFN*

سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سطح درزه‌ها به عنوان خواص مکانیکی درزه‌های توده سنگ، در مدل‌ها لحاظ می‌شوند. اگر زاویه اتساع درزه صفر قرار داده شود یعنی سطح درزه‌ها صاف در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر عددی مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی سطح درزه‌ها و مدول الاستیسیته‌ی ماده سنگ در آزمایشگاه و توسط شرکت مهندسی مشاور لار تعیین شده‌اند.

مقادیر سختی برشی و سختی نرمال توسط روابط (۳-۴) و (۴-۴) و (۵-۴) با استفاده از نرم‌افزار *Roc Data* محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

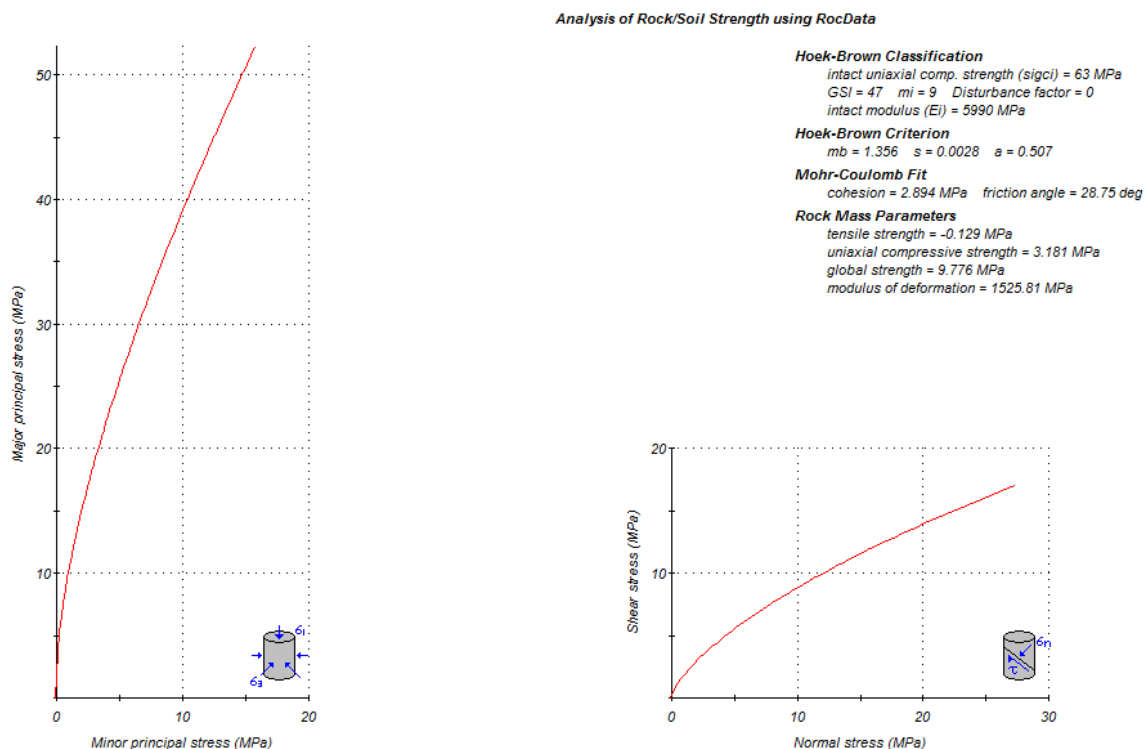
$$k_n = \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \quad (۳-۴)$$

$$k_s = \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)} \quad (۴-۴)$$

$$k_n = ۲.۸۶ k_s \quad (۵-۴)$$

در این روابط، E_r مدول الاستیسیته سنگ بکر، S فاصله‌داری ناپیوستگی‌های توده سنگ و E_m تغییر شکل‌پذیری توده سنگ است که با استفاده از پارامترهای E_r ، مقاومت فشاری تک‌محوره و برخی پارامترهای دیگر نظیر GSI در نرم‌افزار *Roc Data*، که در شکل (۴-۱۶) آورده شده، محاسبه می‌شود. G_r مدول برشی سنگ بکر و G_m مدول برشی توده سنگ است (Itasca Consulting Group, 2015).

در جدول (۴-۱۰) مقادیر این پارامترها آورده شده است.



شکل ۴-۱۶ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ با استفاده از Roclab

جدول ۴-۱۰ خواص مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی (شرکت مهندسين مشاور لار، ۱۳۹۳).

دسته درزه	سختی نرمال (Gpa/m)	سختی برشی (Gpa/m)	زاویه اتساع (درجه)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (Mpa)
۱	۸/۵۲	۲/۹۸	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۲	۷/۰۵	۲/۴۶	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۳	۱۲/۷۸	۴/۴۶	۳	۳۳	۰/۰۳۳
۴	۱۴/۱	۴/۹۳	۳	۳۳	۰/۰۳۳

در ادامه‌ی این روند، تعیین و تخصیص خواص سیال (آب) مانند مدول بالک، ویسکوزیته و دانسیته که

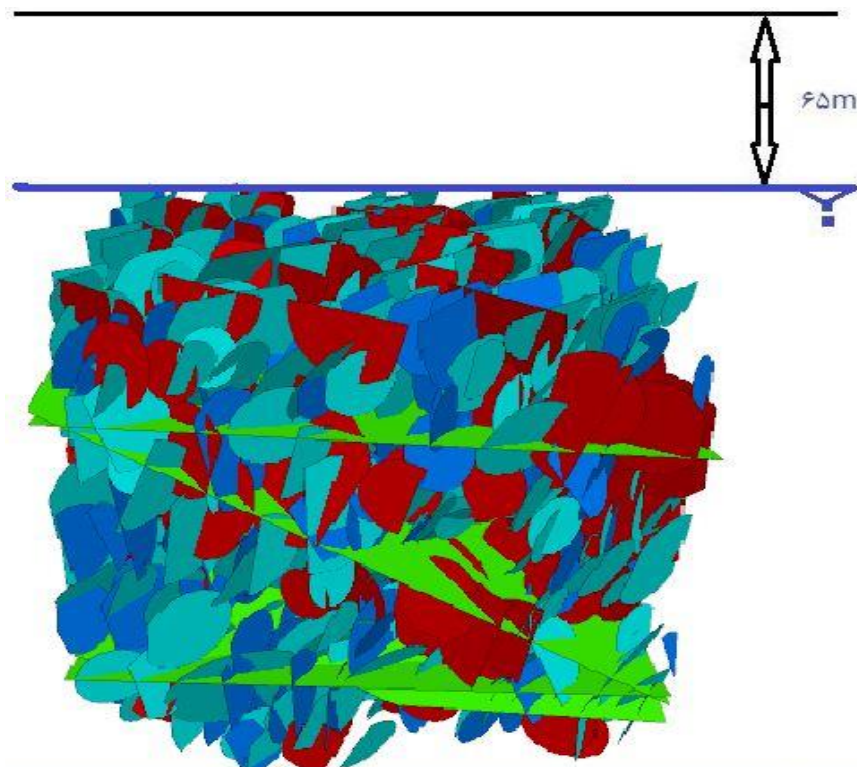
مقادیر آن‌ها در جدول (۴-۱۱) آورده شده، در نرم‌افزار وارد و در مدل‌ها لحاظ می‌شوند.

جدول ۱۱-۴ ویژگی‌های هیدرولیکی سیال (Itasca Consulting Group, 2015)

خواص سیال	مدول بالک (Gpa)	ویسکوزیته (Pa.s)	دانسیته (kg/m^3)
مقادیر	۲	۰/۰۰۳	۱۰۰۰

۴-۵-۱۲ اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل

مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب و با شرایط واقعی زمین معادل می‌شوند که در تخصیص فشار ناشی از روباره به مدل، هم‌ارتفاع روباره‌ی خشک و هم روباره‌ی اشباع لحاظ شوند. به عبارتی دیگر مرز بالای بلوک مدل مماس با سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. موقعیت مدل نسبت به سطح زمین و سطح ایستابی جایگذاری مدل در شکل (۴-۱۷) به صورت شماتیک نشان داده شده است. سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ی ۱S در عمق ۶۵ متری و در گمانه‌ی ۵S در عمق ۷۵ متری قرار دارد. موقعیت مکانی مدل در گمانه‌های ۱S و ۵S به ترتیب در عمق‌های ۶۵ و ۷۵ متری از سطح زمین قرار دارد.



شکل ۴-۱۷ نمایی از جایگذاری مدل DFN در عمق ۶۵ متری زمین

سنگ‌ها در عمق تحت تاثیر تنش‌های ناشی از وزن طبقات بالایی قرار می‌گیرند. اطلاع از بزرگی و جهت این تنش‌های برجا در زمان طراحی حفاریات زیرزمینی بسیار حایز اهمیت است. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تاثیر تنش‌های برجای موجود در زمین در مدل‌ها لحاظ گردد. در حالت ایده‌آل اطلاعات در مورد این‌گونه تنش‌ها از اندازه‌گیری سر زمین به دست می‌آید، ولی وقتی اندازه‌گیری سر زمین مقدور نیست می‌توان با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین تنش‌ها را برآورد کرد. تنش قائم توسط رابطه‌ی (۴-۶) تعیین می‌شود.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (۴-۶)$$

که در این رابطه، σ_v تنش عمودی (Pa)، $\square$ مخصوص طبقات بالایی (N/m^2) و z عمق از سطح زمین (m) است.

روند تخمین تنش‌های افقی^۱ در سنگ بسیار مشکل‌تر از تنش عمودی است. در حالت طبیعی میانگین تنش افقی وابسته به تنش عمودی است و با ضریب k (نسبت تنش افقی به تنش عمودی) به‌صورت رابطه (۴-۷) بیان می‌شود. همچنین برای تعیین مقدار k روابطی پیشنهاد شده که در جدول (۴-۱۲) بیان شده است (Stille and Palmström, 2008).

$$\sigma_{have} = k\sigma_v = k\gamma z \quad (۴-۷)$$

در تعیین مقدار k ، با توجه به عمق مدل مورد بررسی و در نظر گرفتن اعتبار روابط، سه رابطه‌ی شیوری (۱۹۹۴)، شیوری (۲۰۰۱) و رومل (۲۰۰۲) مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر به دست آمده برای k توسط هر کدام از سه رابطه‌های ذکر شده، به ترتیب برابر با ۱/۰۳، ۱/۳۹ و ۱/۷۶ به دست آمده است. این مقادیر نسبت به مقادیر به دست آمده برای k توسط روابط دیگر ارایه شده در جدول (۴-۱۲) تطابق قابل ملاحظه‌ای با هم دارند.

^۱ Horizontal Stress

جدول ۴-۱۲ روابط تجربی برای تعیین مقدار k (Hudson 2005)

منبع	تغییرات مقدار k بر اساس عمق یا نسبت پواسون (ν)	مکان و بازه عمقی (m)
Terzaghi and Richart (1952)	$k = \frac{\nu}{1-\nu}$	-
Van Heerden (1976)	$k = 0.448 + \frac{248}{z}, (r = 0.85)$	آفریقای جنوبی (۰ تا ۲۵۰۰)
Hoek and Brown (1980)	$0.3 + \frac{100}{z} < k < 0.5 + \frac{1500}{z}$	گستره‌ی جهانی (۰ تا ۳۰۰۰)
Li (1986)	$0.3 + \frac{100}{z} < k < 0.5 + \frac{440}{z}$	چین (۰ تا ۵۰۰)
Rummel (1986)	$0.5 + \frac{150}{z} < k < 0.98 + \frac{250}{z}$	گستره‌ی جهانی (۵۰۰ تا ۳۰۰۰)
Herget (1987)	$k = 1/25 + \frac{267}{z}$	کانادا (۰ تا ۲۰۰)
Sheorey (1994)	$k = 0.25 + 7E_h(0.001 + \frac{1}{z})$	-
Sheorey (2001)	$k = 0.33 + 9/5E_h(0.001 + \frac{1}{z})$	-
Rummel (2002)	$0.66 + \frac{72}{z} < k < 1/3 + \frac{110}{z}$	هنگ کنگ (۰ تا ۲۰۰)

با توجه به این که معادله شیوری تطابق بسیار خوبی با رابطه هوک و براون دارد و به عبارتی تصحیح کننده و محدود کننده بازه‌ی حاصل از رابطه هوک و براون است، به عنوان رابطه‌ای برای تعیین مقدار k در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت مقدار k برابر با $1/39$ که به نوعی می تواند میانگین مقادیر ذکر شده نیز باشد، انتخاب و در مدل ها وارد شد. مهم ترین توجیه برای انتخاب این مقدار این است که مدل در عمقی نزدیک به سطح زمین (عمق کمتر از ۱۰۰ متر) جایگذاری شده است، در نتیجه انتظار می رود مقدار k بیشتر از ۱ باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده، مقادیر تنش های اولیه در محل مورد نظر، با توجه به عمق جایگذاری مدل، در جدول (۴-۱۳) بیان شده است.

جدول ۴-۱۳ مقادیر تنش‌های اولیه و فشار حاصل از طبقات بالایی محاسبه شده

ردیف	مشخصه	علامت	مقدار	واحد
۱	نسبت تنش افقی با قائم	k	۱/۳۹	-
۲	تنش قائم	σ_v	۱/۶۳	MPa
۳	تنش‌های افقی	σ_{yy}, σ_{xx}	۲/۲۸	MPa

۴-۵-۳ حل عددی جریان سیال در شبکه شکستگی

پیش از حل عددی جریان در شکستگی‌ها، لازم است برخی فرضیات و برخی معادلات حاکم بر انتقال سیال بررسی شوند. یکی از فرضیات اساسی در این زمینه اشباع شدن شکستگی‌ها از سیال بوده و دیگری آرام بودن جریان سیال در شکستگی‌ها است. باید این نکته نیز مدنظر قرار گیرد که هر دو فرض مطرح‌شده با اندکی تسامح و اغماض همواره در طبیعت برقرارند که نتیجه این فرضیات برقراری معادله دارسی در این شبکه‌ها است.

$$Q = A \frac{k \Delta p}{\mu L} \quad (۴-۸)$$

در این رابطه که رابطه اساسی تمامی روش‌های محاسبه‌ی جریان و نفوذپذیری است، پارامتر Q به دبی یا به عبارتی نرخ سیال گذری در واحد زمان اشاره دارد. A سطح مقطع عبور سیال، k تانسور نفوذپذیری، Δp اختلاف فشار در مرزهای مدل، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال و L مسافت طی شده توسط سیال است.

۴-۶ تعیین نفوذپذیری با انجام آزمایش لوژان

آزمایش لوژان به منظور تعیین میزان نفوذپذیری توده سنگ برجا استفاده می‌شود و به دو صورت پکر منفرد و پکر مضاعف صورت می‌پذیرد. در روش پکر منفرد محدوده‌ی انتهایی گمانه به وسیله‌ی یک محصور، و عملیات تزریق سیال (آب) در حدفصل و انتهای چاه انجام می‌شود.

درحالی که درروش پکر مضاعف قطعه‌ای از چاه در فاصله‌ی دو عدد پکر محصور، و نفوذپذیری دیواره‌ی چاه در محدوده‌ی مذکور اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش عموماً در پنج پله‌ی فشار انجام می‌شود، به این طریق که از فشار کم شروع شده و در پله‌ی سوم به فشار بیشینه رسیده و دوباره به کمترین فشار برگردانده می‌شود. به‌منظور برآورد عدد لوژان معرف حاصل از پنج پله‌ی فشار، باید نمودار ستونی اعداد لوژان محاسبه‌شده را ترسیم نمود و با نمودارهای استاندارد آن مقایسه کرد. برای محاسبه‌ی عدد لوژان متناظر با هر پله‌ی فشار از رابطه‌ی (۴-۹) استفاده می‌شود.

$$Lu = \frac{1.0Q}{L.P} \quad (۴-۹)$$

که در آن P فشار برحسب اتمسفر، Q دبی برحسب لیتر بر دقیقه و L طول قطعه‌ای تحت آزمایش برحسب متر است (Wittke, 2014).

۴-۶-۱ رابطه بین لوژان و نفوذپذیری

تلاش‌های زیادی برای یافتن رابطه‌ای بین لوژان و نفوذپذیری (K) صورت گرفته است. برخی از این تجربیات در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.

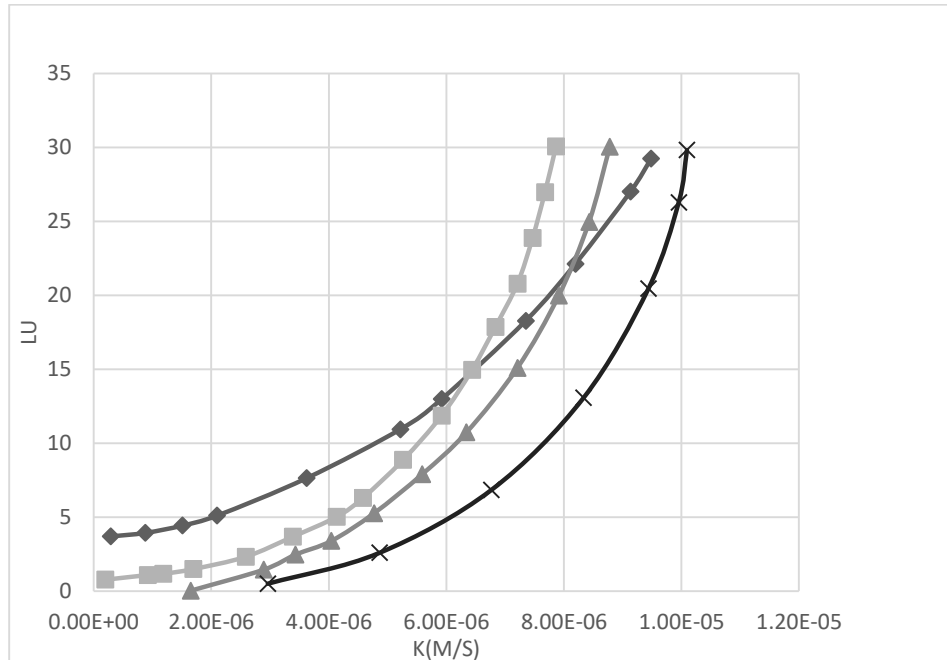
نمودارهای ارایه شده در شکل (۴-۱۸)، به‌صورت خلاصه‌ای از روابط تجربی به دست آمده توسط محققان در پروژه‌های تحقیقاتی مختلف ارایه شده است. این نمودارها در اکثر مطالعات مربوط به نفوذپذیری به‌عنوان مبنای معادل‌سازی عدد لوژان با مقادیر تانسور نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفته است.

علاوه بر رابطه‌های مذکور که به‌صورت تجربی حاصل شده‌اند، رابطه‌هایی تحلیلی نیز وجود دارد که از جمله‌ی آن‌ها، رابطه‌ای ارایه‌شده توسط مویه^۱ (۱۹۶۷) است (رابطه‌ی (۴-۱۰)).

$$K = \frac{Q}{2\pi.L.H} \left(1 + \ln \left(\frac{L}{2r} \right) \right) \quad (۴-۱۰)$$

^۱ Moye

که در آن، K ضریب نفوذپذیری (m/s)، Q دبی (m^3/s)، r شعاع گمانه (m)، L طول مقطع آزمایش (m) و H ارتفاع هیدرو استاتیکی در مرکز مقطع آزمایش (m) است.



شکل ۴-۱۸ رابطه تجربی بین لوژان و نفوذپذیری (کرد نظیری، ۱۳۹۰).

هورسلف^۱ (۱۹۵۱) نیز رابطه‌ی (۴-۱۱) را برای این منظور پیشنهاد کرده است (کرد نظیری،

۱۳۹۰).

$$K = \frac{Q}{\pi L H} \left(\frac{L}{2r} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r} \right)^2} \right) \quad (4-11)$$

پارامترهای موجود در این رابطه، مشابه مورد قبل هستند. با توجه به همپوشانی قابل قبول منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۴-۱۸) و اندک بودن محدوده‌ی تغییرات نفوذپذیری محاسبه شده در یک عدد لوژان معین و نیز گسترده بودن بازه‌ی تغییرات نفوذپذیری‌های محاسبه شده توسط روابط تحلیلی (۴-۱۰) و (۴-۱۱)، مشخص می‌شود که مقادیر به دست آمده از منحنی‌های شکل (۴-۱۸) قابلیت اعتماد بالاتری دارد. لذا اعتبار تخمین نفوذپذیری مدل به‌وسیله روابط تجربی بیشتر است.

¹ Hvorslev

۷-۴ محاسبه تانسور نفوذپذیری مدل‌های DFN و اعتبار سنجی به وسیله عدد لوژان

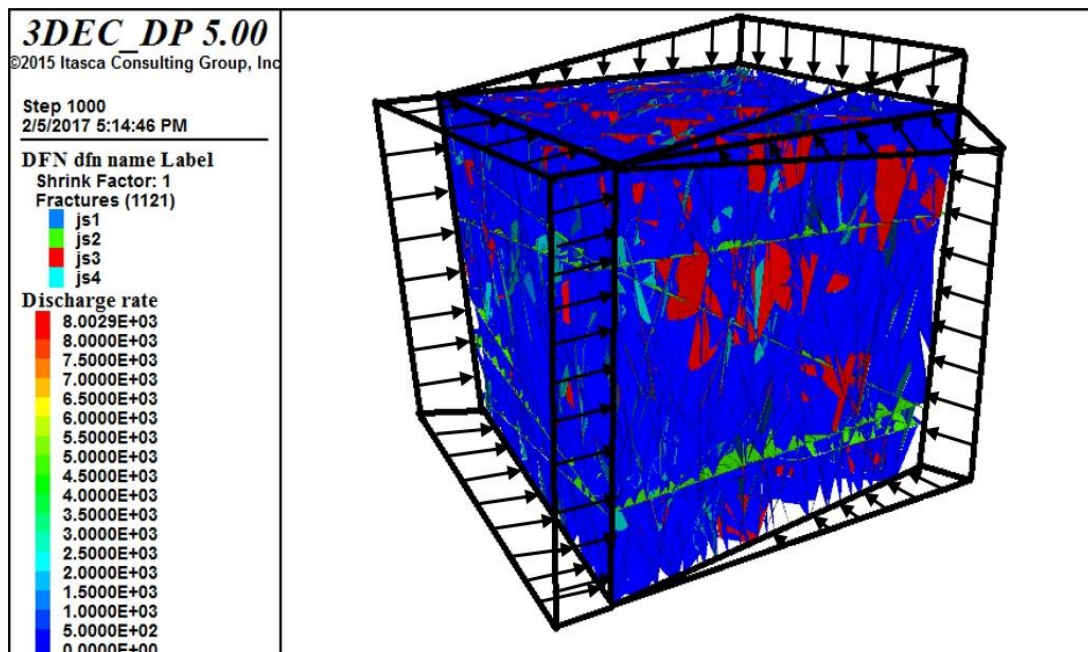
به طور کلی یک توده سنگ درزه دار پتانسیل بالایی در ایجاد ناهمسانگردی در بسیاری از خواص مکانیکی و هیدرولیکی دارد. جریان در این محیط‌ها اغلب، گرایش به حرکت در جهت خاصی را از خود نشان می‌دهد که ناشی از وجود ناهمسانگردی در هدایت هیدرولیکی است. از این رو در صورت امکان تلاش در طراحی جهت حفر تونل به گونه‌ای که کمترین دبی نفوذی آب به درون آن را در پی داشته باشد، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. این امر با تعیین مقدار جریان سیال عبوری از مدل در جهات مختلف ممکن می‌شود.

برای محاسبه نفوذپذیری و مقایسه با عدد لوژان باید تانسور نفوذپذیری محاسبه شود. ویرایش اخیر نرم‌افزار DEC^3 ، این قابلیت را دارد که جریان سیال عبوری از مدل یا به عبارتی نفوذپذیری و تراوایی مدل را به صورت بردارهای نرخ جریان، فشار منفذی و بازشدگی محاسبه و ارائه دهد. که در این مدل‌ها کنتور نرخ جریان مدنظر قرار گرفته است (شکل ۴-۱۹).

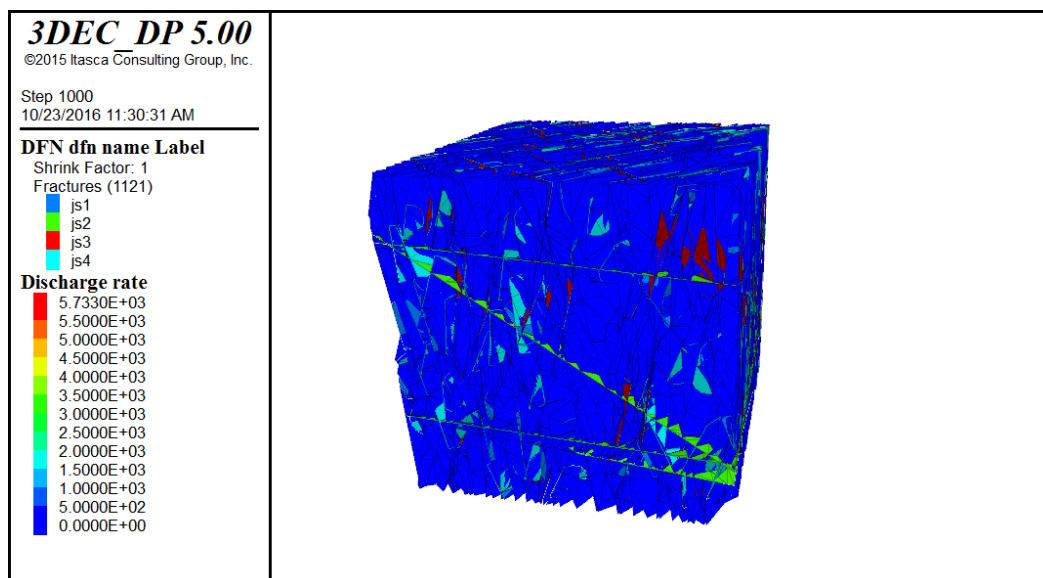
با توجه به این که اعتبارسنجی جریان سیال هر یک از مدل‌ها توسط داده‌های حاصل از آزمایش‌های لوژان برای اندازه‌گیری نفوذپذیری انجام می‌گیرد، در این پژوهش خروجی‌هایی از نوع نرخ جریان مدنظر قرار می‌گیرد. به منظور محاسبه تانسور نفوذپذیری، در روند مدل‌سازی، جریان در جهت‌های مختلف اعمال می‌شود. در برخی پژوهش‌های انجام شده برای محاسبه نفوذپذیری، مدل‌های DFN با یک زاویه چرخش ثابت چرخانیده شده و تحت اعمال فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرند که این روش بیشتر در مدل‌سازی‌های دوبعدی به کار می‌رود. روش متداول در محاسبه تانسور نفوذپذیری مدل‌های سه‌بعدی DFN ، ثابت نگه داشتن مدل و اعمال فشار ناشی از روباره به مرزهای مدل است.

در تحلیل‌های هیدرولیکی فشار وارد بر مرزهای مدل توسط محاسبه فشار ناشی از روباره‌ی خشک و اشباع در نظر گرفته می‌شود. اعمال فشار ناشی از روباره بر مدل DFN به منظور محاسبه هر کدام از درایه‌های تانسور نفوذپذیری به ترتیب در جهت‌های xx ، xy ، xz ، yx ، yy ، yz ، zx ، zy و zz صورت

می‌گیرد، که یک مورد از آن‌ها در قالب شکل‌های (۴-۲۰) آورده شده است.



شکل ۴-۱۹ نمایی از مدل *DFN* بعد از اعمال جریان سیال در جهت *xx*



شکل ۴-۲۰ مدل *DFN* بعد از اعمال جریان سیال در جهت *zz*

به‌منظور محاسبه‌ی هر کدام از درایه‌های تانسور نفوذپذیری باید جریان در جهت متناظر آن اعمال

شود، بدین ترتیب یک تانسور از نرخ جریان ارایه می‌شود که در ادامه با کاربرد رابطه‌ی داری می‌توان

تانسور نفوذپذیری را ارایه کرد.

بدین ترتیب نفوذپذیری مدل *DFN* به صورت تانسوری ارایه می شود. بدیهی است که اندازه تانسور نفوذپذیری برابر با دترمینان ماتریس است، لذا عدد نفوذپذیری که باید توسط روابط تجربی نمودارهای شکل (۴-۱۸) با عدد لوژان معادل سازی شود برابر با دترمینان ماتریس نفوذپذیری است. با انجام روند ذکر شده و استفاده از رابطه (۴-۱۲) و نیز کاربرد قابلیت دترمینان گیری در نرم افزار اکسل، اندازه تانسور نفوذپذیری همان طور که در رابطه ی (۴-۱۳) نشان داده شده است، برابر با 7.22×10^{-6} متر بر ثانیه محاسبه و ارایه شده است.

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} 2.285 & 0.161 & 0.143 \\ 0.227 & 2.285 & 0.227 \\ 1.638 & 1.638 & 1.638 \end{bmatrix} \times 10^{-6} = 7.22 \times 10^{-6} (m/s) \quad (4-13)$$

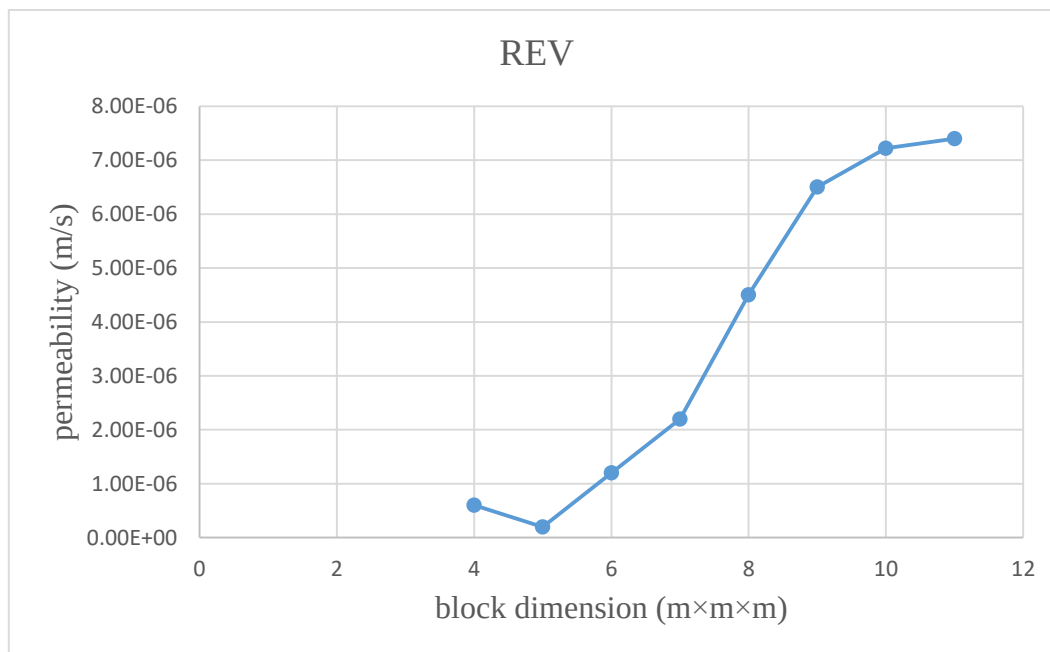
$$Det|k| = 7.22 \times 10^{-6} (m/s)$$

همان طور که در بخش مربوط به نتایج آزمایش های لوژان نیز آورده شد، عدد لوژان مربوط به پروژه ی سد پارسیان در رده ی کم (۳ تا ۱۰) تا متوسط (۱۰ تا ۲۰) اندازه گیری شده است. پیش تر هم به آن اشاره شد که آزمایش لوژان در هر ۵ متر از طول گمانه انجام شده است. بنابراین این مدل به وسیله ی عددهای لوژان مربوط به فاصله ی ۶۵ تا ۷۰ و ۷۰ تا ۷۵ متری از طول گمانه ی ۱۵ اعتبار سنجی می شود. اندازه ی نفوذپذیری محاسبه شده توسط مدل سازی عددی برابر با 7.22×10^{-6} متر بر ثانیه است. بنابراین با توجه به نمودارهای شکل (۴-۱۸) که به منظور معادل سازی اندازه نفوذپذیری با عدد لوژان ارایه شده است، مشاهده می شود که عدد لوژان مربوط به مدل در همین رده قرار می گیرد. در نهایت می توان مشاهده کرد که مدل ارایه شده و نتایج تحلیل های آب گذاری از دقت قابل قبولی برخوردار است و می تواند به عنوان مبنای مطالعات و تحلیل های حساسیت پارامترهای موثر در آب گذاری مورد استفاده قرار گیرد.

۸-۴ رویکرد تصادفی برای محاسبه حجم اولیه معرف

سیستم‌های درزه در توده سنگ‌ها از نقطه نظر هندسی بسیار پیچیده هستند. همچنین کمیت و کیفیت پارامترهای هندسی اندازه‌گیری شده که از برداشت‌های برجا به دست می‌آیند، دارای مقدار زیادی عدم قطعیت هستند. به‌منظور کاهش چنین عدم قطعیت‌هایی در نمایش دادن سیستم درزه‌ها در زیرزمین، استفاده از رویکرد مدل‌سازی تصادفی شبکه شکستگی مجزا، با فرض پارامترهای هندسی درزه‌ها به‌صورت آماری در شبکه توزیع شده است، طی دهه‌ی گذشته موردتوجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. با استفاده از تعداد زیادی از حالات تصادفی مختلف شبکه شکستگی مجزا می‌توان عدم قطعیت در داده‌های هندسی دسته‌درزه‌ها برای تخمین حجم اولیه معرف را تا حدی کاهش داد. این فهم از واقعیت‌ها و محدودیت‌های موجود در بررسی رفتار توده سنگ، محققان را به استفاده از یک رویکرد تصادفی برای به دست آوردن حجم اولیه معرف هدایت می‌کند. این رویکرد توسط بلوم (۲۰۰۴)، مین (۲۰۰۴)، و باغبانان و جینگ (۲۰۰۷)، برای تخمین رفتار هیدرولیکی و هیدرو مکانیکی وابسته به‌اندازه توده سنگ و تخمین حجم اولیه معرف استفاده شده است. برای بررسی نحوه‌ی جهت یافتگی جریان، آزمایش‌ها باید بر روی اندازه‌ی نمونه‌ی معرف صورت گیرد.

شرط رسیدن مدل به حجم المان معرف این است که در این اندازه و بزرگ‌تر از آن، تغییر محسوسی در مقدار تانسور نفوذپذیری ایجاد نشود. همچنین با اضافه یا کم کردن اندازه‌ی مدل DFN به مقدار کم، تغییر محسوسی در نفوذپذیری معادل به وجود نیاید. در این پژوهش روند و روش معمول تعیین REV که در بالا به آن پرداخته شد، مورد استفاده قرار گرفته است. لذا به‌منظور رسیدن به REV منطقه‌ی مورد بررسی، ابتدا مدل‌هایی با اندازه‌های $۹ \times ۹ \times ۹$ ، $۸ \times ۸ \times ۸$ ، $۷ \times ۷ \times ۷$ ، $۶ \times ۶ \times ۶$ ، $۵ \times ۵ \times ۵$ ، $۴ \times ۴ \times ۴$ ، $۱۰ \times ۱۰ \times ۱۰$ و $۱۱ \times ۱۱ \times ۱۱$ ساخته شده و سپس تانسور نفوذپذیری مربوط به هر کدام از این ابعاد محاسبه شده که نتایج این روند در نمودار مربوط به شکل (۴-۲۱) آورده شده است. اندازه‌ی REV حول مدل‌هایی با ابعاد $۹ \times ۹ \times ۹$ ، $۱۰ \times ۱۰ \times ۱۰$ و $۱۱ \times ۱۱ \times ۱۱$ می‌تواند در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۲۱ تعیین REV

در ادامه مدل $9 \times 9 \times 9$ با توجه به تعداد کم درزه‌ها و مدل $11 \times 11 \times 11$ با توجه به تعداد بالای درزه‌ها و عدم توانایی کامپیوتر در پردازش زون بندی مدل برای تحلیل‌های حساسیت کنار گذاشته شدند. در نهایت مدل با ابعاد ۱۰ متر مکعب به عنوان REV مساله انتخاب شد.

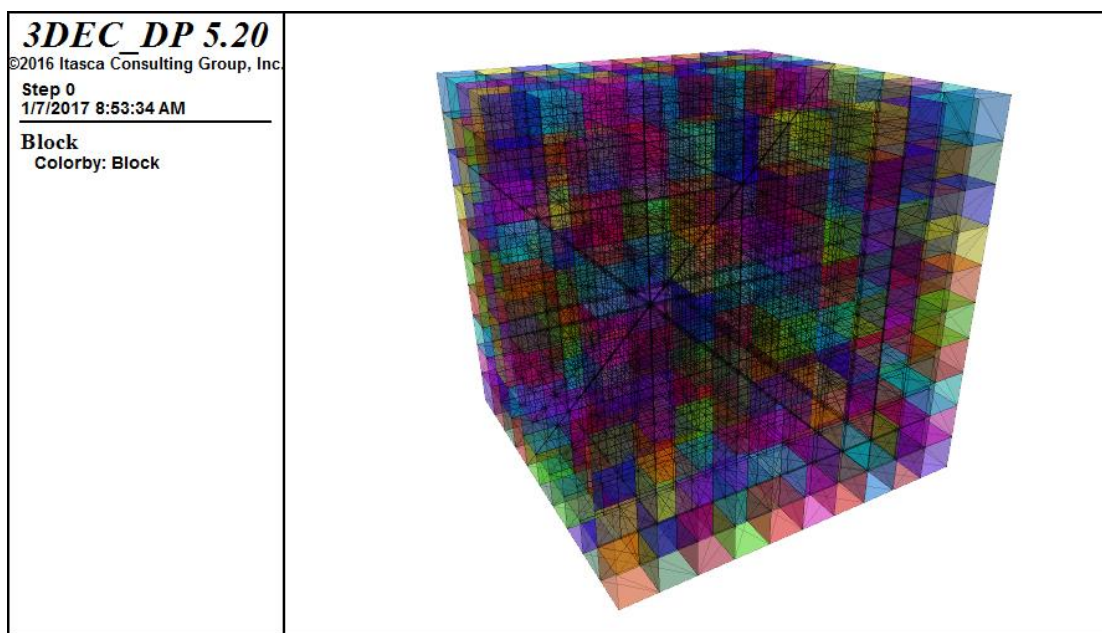
۴-۹ روند معادل‌سازی و تخمین نفوذپذیری مدل‌های مکعبی معادل با DFN

همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد در روش‌ها و مدل‌سازی‌های عددی یک سری ساده‌سازی‌ها با توجه موضوع‌های مورد بررسی انجام می‌شود. در مدل‌سازی عددی جریان سیال در شبکه شکستگی مجزا پارامترهای زیادی دخیل هستند که قابلیت تاثیر دادن و وارد کردن تمام این پارامترها در مدل‌ها تابع قابلیت نرم‌افزارهای تجاری است.

نرم‌افزار ۳DEC به نوعی توانایی مدل کردن اکثر پارامترهای موثر در جریان سیال را دارد. لذا بررسی تاثیر هر کدام از این پارامترها بر جریان سیال عبوری از مدل‌ها امکان‌پذیر می‌شود. با توجه به این نکته که هدف این پژوهش در نهایت ارایه رابطه تجربی برای برآورد آب‌گذری توده سنگ است، سعی شده است نتیجه‌ی مدل‌سازی‌ها به گونه‌ای باشد که این روابط در پروژه‌های دیگر قابلیت کاربرد

داشته و جایگزین روش‌های دیگر باشند. در این بخش به روند ارایه‌ی یک مدل ساده‌ی مکعبی دو پارامتری (شامل بازشدگی و اندازه ریز بلوک‌ها که به‌نوعی توسط فراوانی یا فاصله‌داری تعیین می‌شود) معادل با مدل DFN چند پارامتری پرداخته می‌شود. به‌طوری که تاثیر کل پارامترهای دخیل در آب‌گذری با دو پارامتر بازشدگی و اندازه ریز بلوک‌ها معادل‌سازی شود (شکل ۴-۲۲).

قبل از تشریح روند معادل‌سازی مدل‌های DFN با مدل‌های مکعبی به این نکته توجه شود که نرم‌افزار $3DEC$ قابلیت ارایه مقدار نرخ جریان را دارد. در این تحقیق، شرط معادل شدن مدل‌ها این است که مقدار نرخ جریان یا به عبارتی نفوذپذیری هرکدام از درایه‌ها در تانسور نفوذپذیری مدل DFN با درایه متناظر در تانسور نفوذپذیری مدل مکعب برابر باشد.



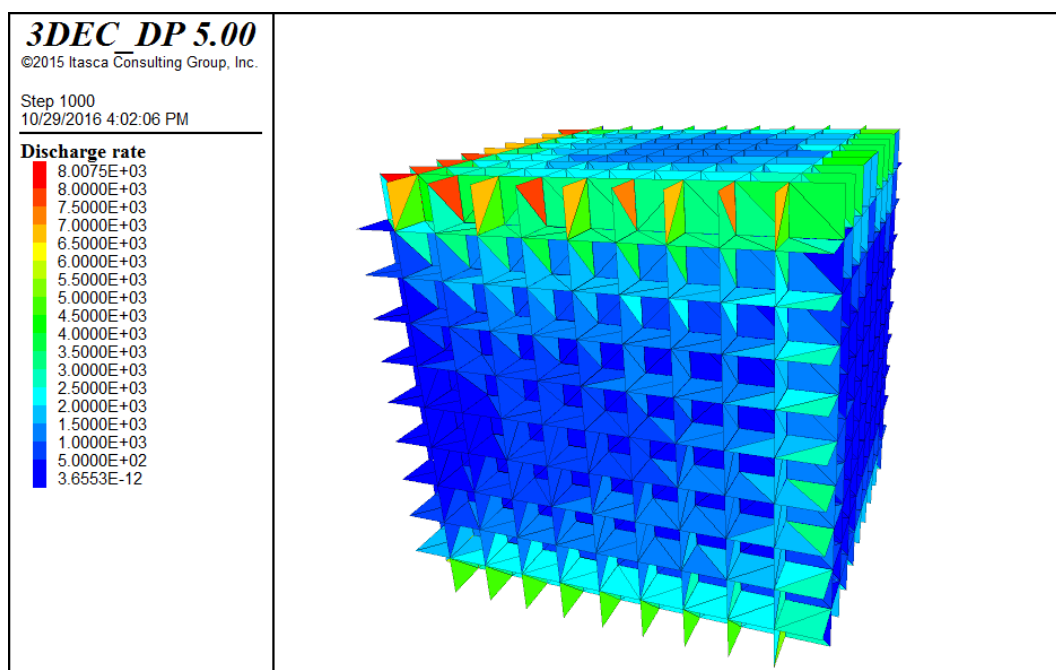
شکل ۴-۲۲ نمایی از مدل مکعب معادل با مدل DFN

به عبارتی دیگر تانسور نفوذپذیری به دست آمده از مدل مکعب همان تانسور ارایه شده در رابطه (۴-۱۳) است. در طی روند معادل‌سازی‌ها، بازشدگی مدل مکعب در هر کدام از جهت‌های xx ، xy ، xz ، yx ، yz ، zy ، zx و zz با استفاده از آزمون و خطا تغییر داده می‌شود تا این که نفوذپذیری درایه‌ها در مدل‌های DFN و مکعبی برابر شود. بدین ترتیب روند معادل‌سازی مدل مکعب

با مدل *DFN* توسط پارامتر نرخ جریان انجام می‌شود. شکل (۴-۲۳) نمایی از مدل مکعبی معادل با مدل *DFN*، در شرایط اعمال جریان در جهت *xx* را نشان می‌دهد.

با انجام این معادل‌سازی‌ها، بازشدگی در جهت‌های *xx*، *xy*، *xz*، *yx*، *yz*، *zy*، *zx* و *zz* مقادیر مختلفی به خود می‌گیرد. در نتیجه بازشدگی مدل مکعبی برابر با اندازه تانسور بازشدگی است که به صورت رابطه‌ی (۴-۱۴) ارایه شده است.

$$[e] = \begin{bmatrix} 4.142 & 2.607 & 2.506 \\ 2.925 & 4.235 & 2.925 \\ 5.646 & 5.86 & 3.705 \end{bmatrix} \times 10^{-7} = 8.17 \times 10^{-6} (m) \quad (4-14)$$



شکل ۴-۲۳ نمایی از مدل مکعب معادل با مدل *DFN* همراه اعمال جریان سیال

با توجه به روند معادل‌سازی، مشاهده می‌شود که بازشدگی متناظر با هر درایه از تانسور نفوذپذیری مدل‌های *DFN* و مکعب مقادیر خاص خود را دارد. در نتیجه ارایه یک تانسور بازشدگی از مدل مکعب منطقی است.

۴-۱۰ محاسبه حجم تراوش و تحلیل حساسیت بازشدگی مدل‌های DFN و مکعبی

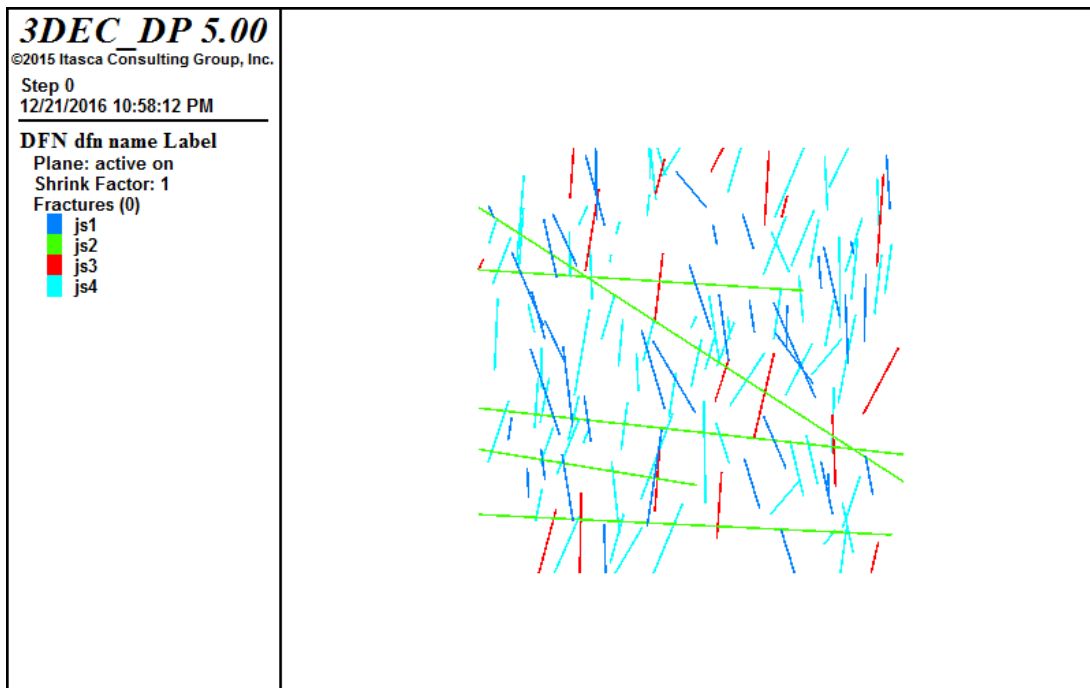
همان‌طور که در بخش پیشینه تحقیق نیز به آن اشاره شد، برخی پژوهش‌ها که البته محدود به مدل‌سازی‌های دوبعدی است در مورد تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر جریان صورت گرفته است. در این بخش ابتدا به روند محاسبه پارامتر حجم تراوش^۱ ($P_{۳۳}$) پرداخته می‌شود سپس تحلیل حساسیت بازشدگی شکستگی‌های مدل DFN و مکعب تشریح می‌شود.

۴-۱۰-۱ معرفی و برآورد پارامتر حجم تراوش ($P_{۳۳}$)

در پژوهش‌های صورت گرفته همواره از بازشدگی شکستگی‌ها به‌عنوان تاثیرگذارترین پارامتر در جریان سیال عبوری از مدل یاد شده است و تاثیر پارامترهای تراکم شکستگی‌ها شامل چگالی ($P_{۱۰}$)، شدت ($P_{۲۱}$) و حجم تراوش ($P_{۳۳}$) آن‌چنان که باید و شاید مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار نگرفته است. تعاریف مربوط به چگالی و شدت در فصل‌های پیشین آورده شده است. پارامتر $P_{۳۳}$ در منابع مختلف تحت عناوین گوناگونی تعریف شده است. در غالب کتاب‌های مکانیک سنگی این پارامتر را به‌صورت تخلخل و در راهنمای نرم‌افزار ۳DEC به‌صورت حجم تراوش تعریف کرده‌اند.

حجم تراوش به‌صورت نسبت مجموع حاصل‌ضرب سطح هر یک از شکستگی‌ها در بازشدگی آن بر حجم کل بلوک تعریف می‌شود. مقادیر پارامترهای $P_{۱۰}$ ، $P_{۲۱}$ و $P_{۳۳}$ به‌وسیله نرم‌افزارهای ۳DEC و $DFN_FRAC^{۳D}$ قابل محاسبه و ارایه هستند. مقادیر محاسبه شده‌ی چگالی مربوط به هر کدام از دسته درزه‌ها توسط نرم‌افزار ۳DEC و کد محاسباتی $DFN_FRAC^{۳D}$ بسیار نزدیک به هم بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است. به‌منظور صحت‌سنجی این مورد پلات‌هایی دوبعدی توسط نرم‌افزار ۳DEC و کد محاسباتی $DFN_FRAC^{۳D}$ تهیه شده است که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است.

^۱ percolation



شکل ۴-۲۴ مقطع دوبعدی مدل DFN

با ایجاد خط برداشت در هر کدام از این پلات‌ها مشخص می‌شود که محدوده تغییرات تعداد شکستگی برابر با ۱۲ تا ۱۵ شکستگی در ۱۰ متر است به عبارتی دیگر محدوده تغییرات چگالی برابر با ۱/۲ تا ۱/۵ است. به هر حال مقادیر محاسبه شده‌ی پارامتر شدت توسط نرم‌افزار ۳DEC و کد محاسباتی DFN_FRAC^{3D} مقادیر گوناگون اما نزدیک به هم را نشان می‌دهد.

در مورد مقادیر مربوط به حجم تراوش نیز می‌توان به این نتیجه رسید که مقادیر محاسبه شده اختلاف چندانی با هم ندارند. ولی با توجه به بررسی‌های پیشین در این زمینه مشخص شده است که مقادیر حجم تراوش محاسبه شده توسط ۳DEC تا اندازه‌ای از واقعیت به دور است. لذا در این پژوهش سعی بر این است که روش جدیدی برای محاسبه P_{rr} ارایه شود. طبق تعریف حجم تراوش که در بالا به آن اشاره شد، می‌توان حجم تراوش را به صورت رابطه (۴-۱۵) محاسبه کرد.

$$P_{rr} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i e_i}{V_{total}} \quad (۴-۱۵)$$

در این رابطه، A سطح هر شکستگی بر حسب مترمربع، e بازشدگی هر شکستگی بر حسب متر و

۷ حجم بلوک مدل برحسب مترمکعب است.

مقادیر این پارامترها در مدل *DFN* با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ متر که به عنوان اساس تحلیل‌های حساسیت انتخاب شد همواره ثابت است. به عبارتی دیگر با توجه به عدم قابلیت سیستم‌های کامپیوتری در ساخت مدل‌های با اندازه‌ای بیشتر از $12 \times 12 \times 12$ تحلیل حساسیت این پارامترها بر مبنای نرخ جریان امکان‌پذیر نیست.

همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره شد، پارامترهای چگالی، شدت و حجم تراوش از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترهای موثر در هدایت جریان سیال مدل‌ها هستند و هدف از محاسبه‌ی آن‌ها صحت بخشیدن به روابط تجربی ارایه شده در این پایان‌نامه حین کاربرد این روابط در پروژه‌های مهندسی دیگر است. به عبارتی روابط تجربی ارایه شده در بخش‌های بعدی که به تفصیل به آن‌ها پرداخته خواهد شد در محدوده‌ی مقادیری از چگالی، شدت و حجم تراوش برابر با $1/15$ (تعداد بر متر)، $2/38$ (مترمربع بر مترمکعب) و $0/18$ (مترمکعب بر مترمکعب)، از دقت و صحت بسیار بالایی برخوردارند.

۴-۱۰-۲ تحلیل حساسیت پارامتر بازشدگی

در این بخش ابتدا به منظور بررسی تاثیر بازشدگی بر میزان نفوذپذیری، به تحلیل حساسیت‌های مربوط به بازشدگی شکستگی‌ها در مدل‌های *DFN* پرداخته می‌شود. روند تحلیل حساسیت بازشدگی شکستگی‌ها در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. اما این مطالعات اکثراً محدود به مدل‌سازی‌های دوبعدی بوده و شاید مهم‌ترین توجیه تحلیل حساسیت بازشدگی در این پژوهش تعداد بالای شکستگی‌های مدل *DFN* (1121 درزه) در یک بلوک $10 \times 10 \times 10$ متری و کار بر روی یک *REV* قابل اعتماد از منطقه باشد.

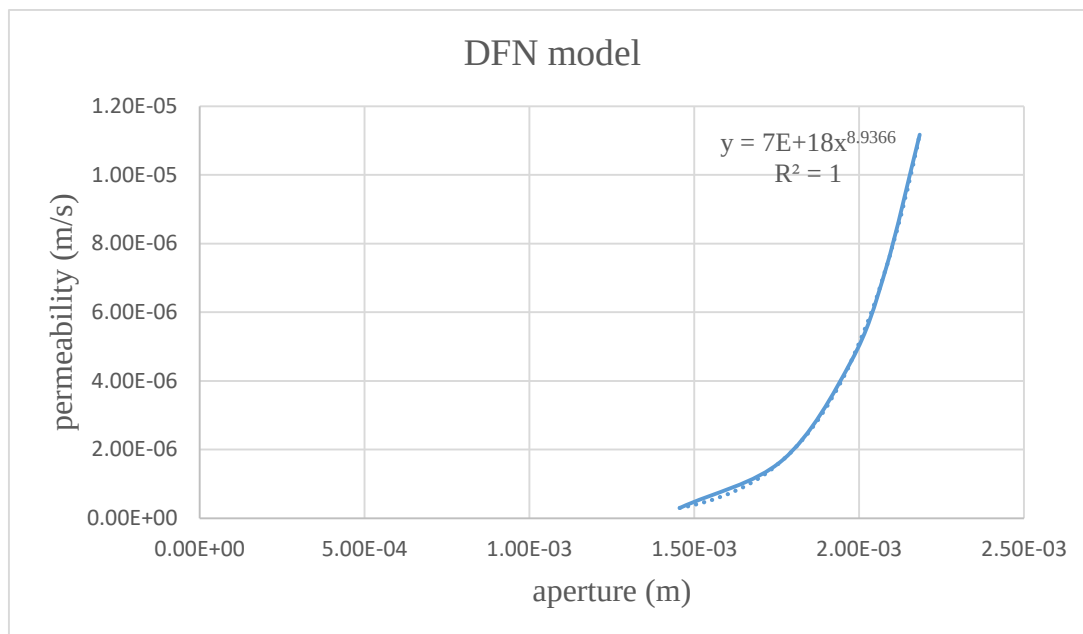
به عبارتی در پژوهش‌های قبلی این تحلیل‌های حساسیت در یک مدل به اصطلاح *DFN* شامل فقط 23 درزه انجام شده است. بدیهی است که تعداد 23 درزه در بلوک‌هایی با ابعاد $7 \times 7 \times 7$ که توسط

محققان دیگر بررسی شده به معنای واقعی مفهوم شبکه شکستگی مجزا را شامل نمی‌شود. با این تفاسیر تحلیل حساسیت بازشدگی در این پژوهش توسط مدلی شامل ۱۱۲۱ درزه در بلوکی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است.

روش اتخاذ شده در این تحلیل حساسیت، افزایش و کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی پارامتر مورد نظر و ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر است. لذا با این روند می‌توان درجه حساسیت هر پارامتر را به‌طور جداگانه در نرخ جریان عبوری و درنهایت نفوذپذیری مدل‌ها بررسی و تعیین کرد. به این منظور، تانسور نفوذپذیری مدل *DFN* ارایه شده از ساختگاه سد که به‌وسیله داده‌های آزمایش لوژان اعتبار سنجی شده است، مبنای کار در نظر گرفته می‌شود. بازشدگی شکستگی‌های این مدل که از برداشت‌های میدانی و مغزه‌ها به‌دست آمده است برابر با $2/1$ میلی‌متر تعیین شده است.

در ادامه، بازشدگی مدل مبنا که برابر با $2/1$ میلی‌متر است، ابتدا ۵، ۱۵ و ۳۰ درصد کاهش داده و سپس ۱۰ درصد افزایش داده می‌شود. در هر مرحله از این تغییر بازشدگی‌ها تانسور نفوذپذیری مدل *DFN* محاسبه می‌شود. هدف از روند فوق رسیدن به رابطه‌ی بین نفوذپذیری و تغییرات بازشدگی مدل *DFN* است. نتیجه تحلیل حساسیت بازشدگی در مدل *DFN* به‌صورت یک رابطه تجربی در نمودار شکل (۴-۲۵) نشان داده شده است.

در ادامه‌ی روند تحلیل‌های حساسیت، به تحلیل حساسیت بازشدگی شکستگی‌ها در مدل‌های مکعبی با فاصله‌داری برابر با یک پرداخته می‌شود. این تحلیل‌ها به‌نوعی تابع تحلیل حساسیت بازشدگی در مدل *DFN* هستند. همان‌طور که در بخش قبل هم به آن پرداخته شد با تغییر بازشدگی شکستگی‌ها در مدل *DFN*، نفوذپذیری نیز به تبع آن‌ها تغییر می‌کند. در هر مرحله از این تغییر بازشدگی و محاسبه تانسور نفوذپذیری روند مربوط به معادل‌سازی این مدل‌ها بر اساس همین مقادیر نفوذپذیری انجام می‌شود.

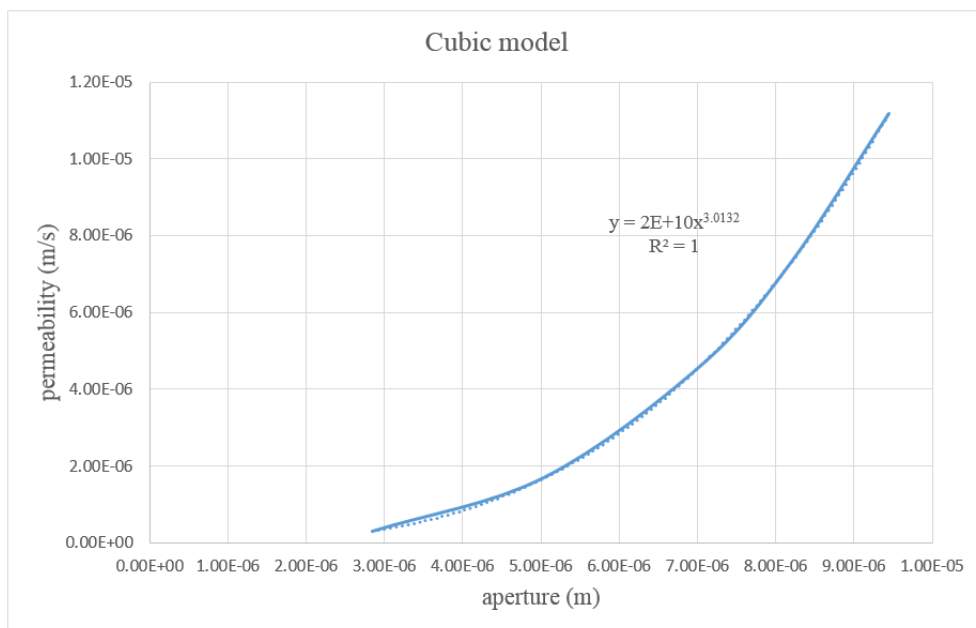


شکل ۴-۲۵ نمودار روند تغییرات نفوذپذیری نسبت به تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل *DFN*

به‌طوری که در هر مرحله یک تانسور از بازشدگی ارایه می‌شود. به‌طور متداول پارامتری مانند بازشدگی شکستگی‌ها به‌صورت تانسوری محاسبه و ارایه نمی‌شود اما در این مورد چون بازشدگی‌های مدل مکعبی متناظر با درایه‌های تانسور نفوذپذیری ارایه می‌شوند، بازشدگی نیز به‌صورت تانسوری محاسبه می‌شود.

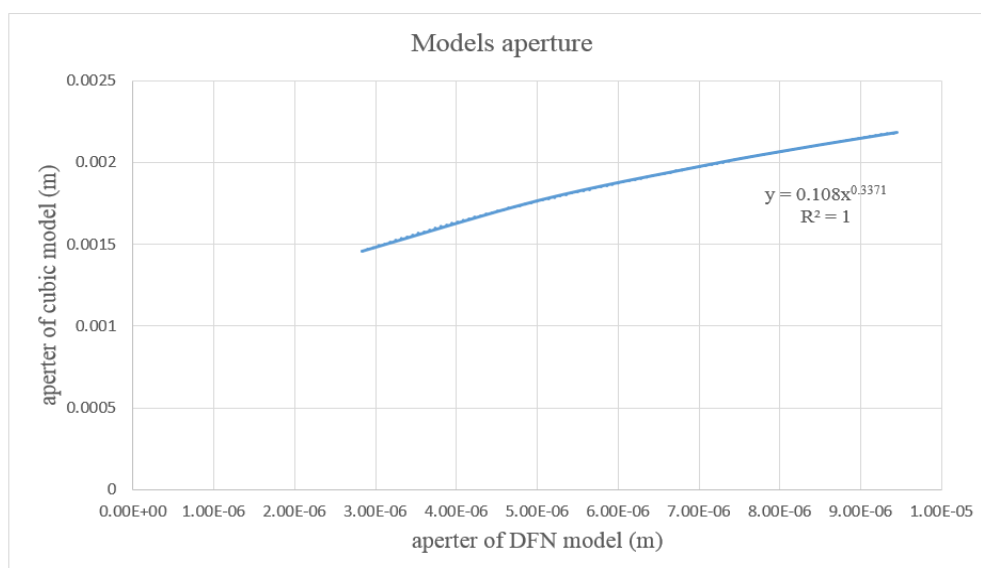
به عبارتی دیگر تانسورهای بازشدگی مدل‌های مکعب بر اساس تانسورهای نفوذپذیری (که مقادیر یکسانی در مدل‌های *DFN* و مکعب دارند) ارایه می‌شوند. روند ذکر شده‌ی فوق به‌صورت رابطه تجربی بین تانسور نفوذپذیری و تانسور بازشدگی مدل مکعب توسط روش رگرسیون‌گیری در نرم‌افزار اکسل محاسبه شده آورده شده است (شکل ۴-۲۶).

در ادامه به رابطه‌ی بین تغییرات بازشدگی شکستگی در مدل‌های *DFN* و مکعب پرداخته می‌شود. در بخش مربوط به تحلیل حساسیت بازشدگی مدل *DFN*، رابطه‌ی بین بازشدگی و نفوذپذیری مدل *DFN* و نیز در بخش تحلیل حساسیت بازشدگی مدل مکعب، رابطه‌ی بین تانسور بازشدگی و نفوذپذیری مدل مکعب ارایه شد.



شکل ۴-۲۶ نمودار روند تغییرات نفوذپذیری نسبت به تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعبی با $\lambda=1$

دقت شود که هم تحلیل بازشدگی مدل *DFN* و هم تحلیل حساسیت بازشدگی مدل مکعب نسبت به یک تانسور نفوذپذیری ثابت ارایه شده است. پس می‌توان رابطه‌ی بین بازشدگی شکستگی‌های مدل *DFN* و بازشدگی شکستگی‌های مدل مکعب را محاسبه و ارایه داد. نتیجه‌ی روند فوق به‌صورت نمودار شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است.

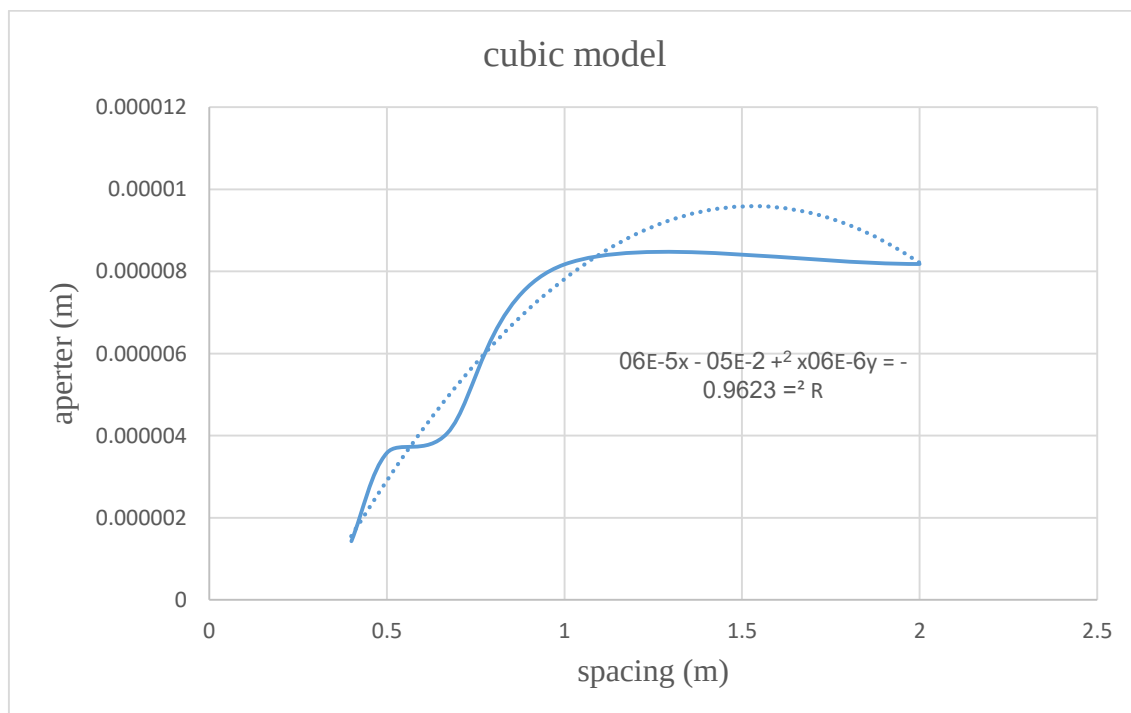


شکل ۴-۲۷ روند تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در مدل *DFN* نسبت به تغییرات بازشدگی شکستگی‌ها در

مدل مکعب

در ابتدای این تحلیل‌ها اشاره شد که مدل مکعب معادل با مدل DFN دو پارامتری است. یکی پارامتر بازشدگی و دیگری بعد ریز بلوک‌ها که به‌نوعی توسط فاصله‌داری یا فراوانی تعیین می‌شود. در بخش‌های قبل تحلیل‌های حساسیت مربوط به بازشدگی مدل‌ها به‌طور مفصل بحث شد. در این بخش به تحلیل حساسیت فاصله‌داری شکستگی‌ها در مدل مکعب پرداخته می‌شود.

در بخش‌های قبلی مدل مکعب مبنا، دارای فاصله‌داری برابر با یک ($\lambda = 1$)، یعنی وجود ۱۰ درزه در طول ۱۰ متر در هرکدام از جهت‌های x ، y و z بود. حال تحلیل‌های حساسیت در فاصله‌داری ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۱ انجام می‌شود. هدف از این تحلیل‌ها ارایه‌ی رابطه‌ی بین فراوانی و بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعب است (شکل (۴-۲۸)). این بازشدگی‌ها نیز از نوع تانسوری است چون در هر مرحله این بازشدگی‌ها متناظر با تانسور نفوذپذیری مدل مکعب نشان داده شده‌اند. مطابق با آنچه که در روند مدل‌سازی مشاهده شد فراوانی شکستگی‌ها از یک حدی به بعد تاثیر خیلی کمتری نسبت به تاثیر بازشدگی‌ها بر نفوذپذیری دارند. به عبارتی دیگر تاثیر فاصله‌داری بر نفوذپذیری مدل مکعب از یک مقدار معین به بعد خیلی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۸ رابطه بین فراوانی شکستگی داری یا فاصله‌داری و بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعب

همان‌طور که تشریح شد، تاکنون رابطه‌ی بین نفوذپذیری مدل‌های DFN و مکعب با بازشدگی شکستگی‌ها در هر یک از این مدل‌ها، رابطه‌ی بین بازشدگی‌های مدل‌های DFN و مکعب، رابطه‌ی بین فراوانی شکستگی داری در مدل مکعب با بازشدگی مدل مکعب نیز ارایه شد. دقت شود که مقادیر تانسور نفوذپذیری در مدل‌های DFN و مکعب ثابت بود و رابطه‌ی پارامترهای ذکر شده به‌طور جداگانه با تانسور نفوذپذیری ارایه شده است. حال به ارایه‌ی یک رابطه‌ی کلی بین نفوذپذیری و بازشدگی در مدل‌های DFN و مکعب توسط تلفیق رابطه‌ی بین نفوذپذیری و بازشدگی مدل DFN و رابطه‌ی بین نفوذپذیری و بازشدگی مدل مکعب پرداخته می‌شود.

رابطه‌ی بین نفوذپذیری و بازشدگی مدل DFN به‌صورت رابطه‌ی (۱۶-۴) است.

$$[k] = 7 \times 10^{18} e_{DFN}^{1/93} \quad (16-4)$$

در این رابطه، e_{DFN} بازشدگی شکستگی‌ها در مدل DFN برحسب متر و k تانسور نفوذپذیری بر حسب متر بر ثانیه است.

رابطه‌ی بین نفوذپذیری و بازشدگی‌های مدل مکعب به‌صورت رابطه‌ی (۱۷-۴) آورده شده است.

$$[k] = 2 \times 10^{17} [e]_{cubic, \lambda=1}^{3/11} \quad (17-4)$$

در این رابطه، $e_{cubic, \lambda=1}$ تانسور بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعبی برحسب متر است.

رابطه‌ی (۱۸-۴) نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بازشدگی شکستگی‌ها در مدل‌های DFN و مکعب است.

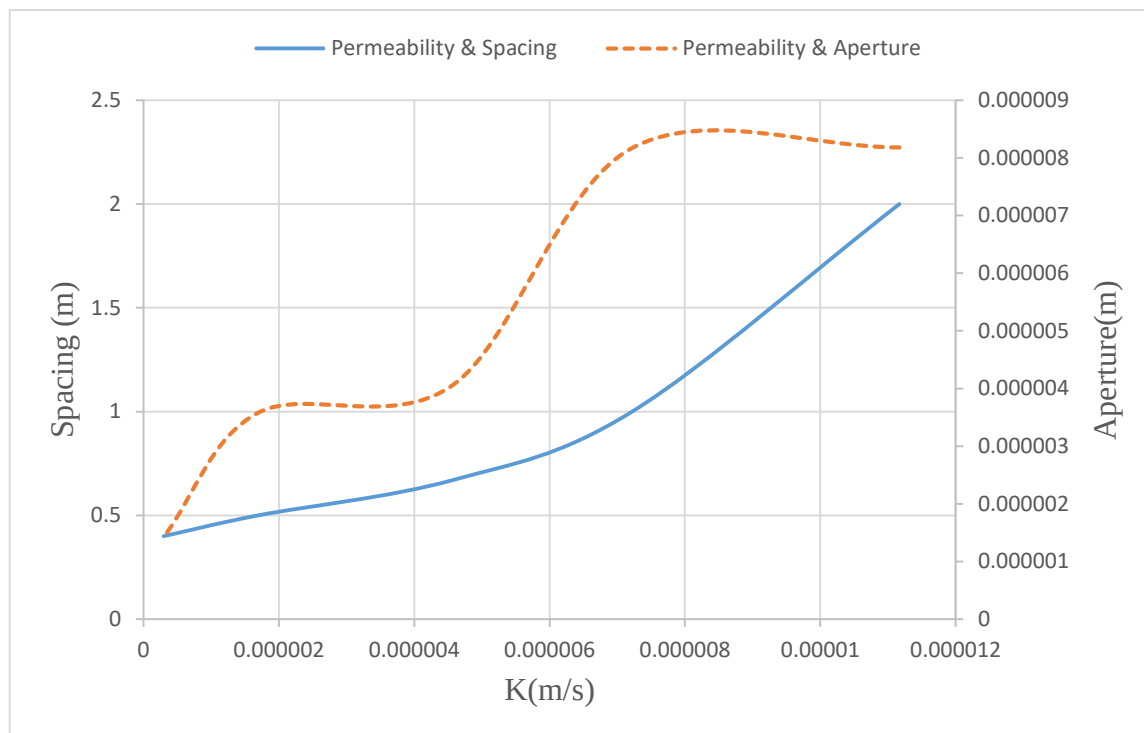
$$e_{DFN} = 0.108 [e]_{cubic, \lambda=1}^{1/33} \quad (18-4)$$

هدف از ارایه‌ی رابطه‌های (۱۶-۴) تا (۱۸-۴) شفاف‌سازی روند تحلیل‌های حساست است. در

ادامه‌ی این بحث به هدف اصلی این پایان‌نامه که ارایه رابطه‌ی تجربی بین نفوذپذیری نسبت به

فاصله‌داری و بازشدگی شکستگی‌ها در مدل مکعبی است، پرداخته می‌شود. شکل (۴-۲۹) یک دید

کلی از روند پیش رو را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹ نمایی از بازشدگی و فاصله‌داری بر حسب نفوذپذیری در مدل مکعبی

بدین ترتیب ابتدا رابطه‌ی بین نفوذپذیری و فاصله‌داری در مدل مکعبی معرفی می‌شود.

$$[k] = \gamma \times 10^{-6} \ln(l) + \gamma \times 10^{-6} \quad (4-19)$$

در این رابطه، l برابر با فاصله‌داری و بر حسب متر است.

رابطه‌ی بین فاصله‌داری و بازشدگی مدل مکعبی که لازمه‌ی ارایه‌ی رابطه‌ی نهایی پایان‌نامه است، به‌صورت رابطه‌ی (۴-۲۰) آورده شده است.

$$[e] = -6 \times 10^{-6} l^2 + 2 \times 10^{-5} l - 6 \times 10^{-6} \quad (4-20)$$

در نهایت، رابطه‌ی بین تانسور نفوذپذیری، تانسور بازشدگی شکستگی‌های مدل مکعبی و فاصله‌داری آن‌ها با استفاده از رابطه‌های (۴-۱۶) تا (۴-۲۰) به‌صورت رابطه‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) ارایه می‌شوند. رابطه (۴-۲۱) بر اساس نمودارهای شکل (۴-۲۹) و با استفاده از روش رگرسیون گیری توسط نرم‌افزار Minitab ارایه شده است.

$$[k] = -2 \times 10^{-6} + 4 \times 10^{-6} l + 0.661[e] \quad (4-21)$$

رابطه‌ی (۴-۲۲) نیز بر اساس نمودارهای شکل (۴-۲۹) و با استفاده از روش رگرسیون گیری توسط

نرم افزار *MATLAB* ارایه شده است.

$$[k] = ۸.۱۵۵۶ \times ۱۰^{-۷} - ۷.۰۴۳۱ \times ۱۰^{-۶} l + ۱.۶۴۷۳ [e] \quad (۲۲-۴)$$

لازم به ذکر است که روابط دو پارامتری ارایه شده برای تخمین نفوذپذیری از دقت قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند.

رابطه‌ی ارایه شده به‌نوعی شامل کل پارامترهای موثر بر جریان سیال در مدل *DFN* است، زیرا پارامترهای مدل *DFN* شامل جهت‌داری، پایایی، بازشدگی، چگالی و شدت در قالب دو پارامتر بازشدگی و فاصله‌داری ساده شده و رابطه‌ی آن‌ها با تانسور نفوذپذیری ارایه شده است. بنا بر آنچه که در بخش مربوط به حجم تراوش آورده شد، امکان تحلیل حساسیت پارامترهای چگالی، شدت و حجم تراوش به دلیل تغییر در *REV* ارایه شده، وجود ندارد. لذا به محاسبه‌ی مقادیر این پارامترها به‌منظور صحت بخشی بیشتر به رابطه‌ی نهایی ارایه شده اکتفا می‌شود. به عبارتی دیگر این روابط در محدوده تغییرات مقادیر چگالی، شدت و حجم تراوش که مقادیر آن‌ها توسط نرم‌افزارهای *DEC* و *DFN_Frac*^{۳D} محاسبه شد، از دقت بسیار بالایی برخوردار است.

در این پایان‌نامه اهداف متعددی شامل صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌های میدانی، روند تعیین مناسب‌ترین توابع توزیع در نرم‌افزارهای آماری، ارایه دقیق‌ترین *REV* از منطقه در قالب مدلی با ۱۱۲۱ درزه در یک بلوک ۱۰ مترمکعبی، روند معادل‌سازی و ارایه یک مدل مکعبی دو پارامتری که به‌نوعی دربرگیرنده‌ی تمام پارامترهای موثر در نفوذپذیری مدل *DFN* باشد و نیز روند مربوط به رگرسیون گیری و ارایه روابط تجربی به کمک نرم‌افزارهای *MATLAB*، *Minitab* و *Excel* مورد نظر بود و در نهایت اهداف ذکر شده دست‌یافتنی شدند.

۴-۱۱ جمع‌بندی

ساخت و ارایه شبکه شکستگی مجزای توده سنگ در بررسی و محاسبه جریان سیال توده سنگ اطراف تونل و نیز سایر فضاهای زیرزمینی امری غیرقابل جایگزین است. بدون داشتن مدل

مناسب از شبکه درزه‌ها که بیشترین شباهت را با شرایط واقعی توده سنگ داشته باشد بررسی جریان سیال در توده سنگ امری مشکل است و اغلب، نتایج حاصل از روش‌های دیگر برای بررسی این پدیده نتایجی قابل اطمینان نیست. لذا ساخت مدل DFN از شرایط واقعی زمین برای بررسی جریان سیال امری ضروری است.

هدف این بخش به‌طور کلی شناسایی مهم‌ترین پارامترهای موثر در جریان سیال بوده است. روابط تجربی ارایه شده در این فصل یک دید کلی از نرخ جریان سیال یا نفوذپذیری منطقه در پروژه‌های دیگر ارایه می‌کند. با وجود توانایی‌های غیرقابل انکار روش‌های مدل‌سازی عددی در پروژه‌های مهندسی، این روش‌ها تقریباً زمان‌بر هستند. لذا در مواردی چون پژوهش انجام گرفته ارایه ی روابطی تجربی که قابلیت استفاده در پروژه‌های دیگر را داشته باشد، بسیار مفید و حایز اهمیت است. کاربرد روابط ارایه شده به این گونه است که با داشتن یک سری پارامترهای درزه نگاری و بدون نیاز به انجام تحلیل‌های عددی زمان‌بر می‌توان به‌طور تقریب نفوذپذیری منطقه را پیش‌بینی کرد.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۵ نتیجه گیری

این پایان نامه باهدف ارایه رابطه های تجربی به وسیله مدل سازی عددی برای برآورد آب گذاری در مطالعه موردی ساختگاه سد مخزنی پارسیان انجام شده است. روند مدل سازی هندسی ناپیوستگی ها و برآورد تانسور آب گذاری آن به وسیله نرم افزار تجاری *DEC ۳* و برازش داده های جمع آوری شده بر روی توابع توزیع آماری ورودی این مدل ها توسط نرم افزارهای آماری *Easy_fit* و *Minitab* انجام شده است.

به عنوان یکی از کلی ترین نتایج این پژوهش می توان به برتری، دقت و صحت پیش بینی میزان آب گذاری به وسیله روش های عددی نسبت به روش های تحلیلی و تجربی اشاره کرد. روش های عددی علی رغم زمان بر بودن محاسبات، یکی از دقیق ترین و قابل اعتمادترین روش های محاسبه نفوذپذیری است. به طوری که روش های عددی به ویژه روش شبکه شکستگی مجزا در مدل سازی ناپیوستگی های توده سنگ و برآورد آب گذاری مدل ها یک ابزار غیرقابل جایگزین به شمار می رود.

این پژوهش از چند نظر برتری‌های فراوانی نسبت به پژوهش‌های قبلی انجام شده دارد که می‌توان به سه‌بعدی بودن مدل، ابعاد مدل REV که یک بلوک ۱۰ مترمکعبی است و مهم‌ترین مورد که در هیچ پژوهشی موردبررسی قرار نگرفته است، قابلیت محاسبه آب‌گذری مدلی با ۱۱۲۱ درزه است، طوری که در پژوهش‌های قبلی تعدادی حدود ۲۰ تا ۳۰ درزه در یک مدل بلوکی ۷ مترمکعبی جایگذاری شده است که در حد قابل توجهی غیر قابل اعتماد بوده است.

ازجمله عوامل دخیل در دقت محاسبات می‌توان به صحت درزه نگاری، صحت روند تعیین مناسب‌ترین توابع توزیع برای پارامترهای هندسی مدل DFN و قابلیت سیستم‌های کامپیوتری اشاره کرد.

برای کاهش خطای ناشی از داده‌های درزه نگاری، ترکیبی از داده‌های حاصل از برداشت خطی توسط شرکت مهندسین مشاور لار، داده‌های پنجره برداشت توسط محقق و داده‌های گمانه‌های حفاری‌شده در ساختگاه سد مورداستفاده و تحلیل‌های آماری قرار گرفت.

برای کاربرد توابع توزیع آماری در مدل‌سازی عددی، با استفاده از روش‌های آماری یک سری معادل‌سازی‌ها روی توابع انجام گرفت. بدین‌صورت که برخی توابع توزیع که توسط نرم‌افزارهای آماری پیشنهاد می‌شد و توسط نرم‌افزار $DEC3$ قابل تعریف نبود، یک سری معادل‌سازی‌ها بر روی آن‌ها انجام گرفت. هدف از این کار قابل تعریف کردن توابع توزیع ارایه شده توسط نرم‌افزارهای آماری برای نرم‌افزار $DEC3$ است. در نتیجه با انجام این معادل‌سازی‌ها، کاستی‌های مربوط به نرم‌افزار $DEC3$ در عدم تعریف برخی توابع توزیع برای پارامترهای هندسی در این پژوهش تسهیل شد.

رابطه‌های تجربی حاصل از تحلیل‌های حساسیت پارامترهای هندسی بر اساس نرخ جریان عبوری از مدل‌ها انجام شد. این تحلیل‌های حساسیت شامل تحلیل حساسیت بازشدگی مدل‌های DFN در یک حجم تراوش ($P_{۳۳}$) مشخص، تحلیل حساسیت بازشدگی مدل مکعب و مدل مکعب با فراوانی‌های مختلف شکستگی‌ها به‌وسیله تکنیک رگرسیون گیری در نرم‌افزار اکسل ارایه شد.

برای نیل به رابطه‌ی اصلی بین تانسور نفوذپذیری و فاصله‌داری و بازشدگی مدل مکعبی ضروری

بود که ابتدا رابطه تانسور نفوذپذیری با بازشدگی‌های مدل *DFN* و مکعبی ارایه شود. روابط کلی به دست آمده (رابطه‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲)) را با دقت بسیار خوبی می‌توان در پروژه‌های دیگر به‌منظور تخمین نفوذپذیری بدون نیاز به مدل‌سازی و تنها بر اساس داده‌های درزه نگاری به کار برد.

۲-۵ پیشنهادها

در صورت وجود سیستم‌های کامپیوتری پرسرعت پیشنهاد می‌شود که مدلی واقعی از حفر تونل در مدل بلوکی شبکه‌ی شکستگی مجزا که با شرایط واقعی زمین تطابق بیشتری دارد، مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

- اصفهانی، ع.الف، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "برآورد تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی اجزاء مجزا و مدل‌های شبکه شکستگی مجزا مطالعه موردی: ساختگاه سد مخزنی پارسیان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- جوادی اصطهباناتی، م؛ شریف زاده، مصطفی، (۱۳۹۱) "مدل سازی جریان سیال در محیط سنگی ناپیوسته برای میدان نزدیک"، همایش ملی جریان و آلودگی آب، ص ۱، دانشگاه تهران
- جولایی، الف، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مدلسازی سه بعدی جریان سیال در سنگهای شکسته در مخازن نفتی ایران"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شرکت مهندسين مشاور لار، "گزارش زمین‌شناسی عمومی و مهندسی طرح سد گورک

(پارسیان)، ۱۳۸۸

- عباسی، ج، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل عددی رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ پی سد به منظور ارزیابی نشت جریان در پی سد، مطالعه موردی سد رودبار لرستان"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی سهند.

- فرهمند، ک، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ درزه دار"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- کرد نظیری، م، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "مدل سازی عددی نرخ نفوذ آب به درون تونل دسترسی در تونل بلند زاگرس با استفاده از روش $DEM-D$ "، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- محمود پور، ه، (۱۳۹۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل عددی تاثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه دار"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- ناطقی، ر، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "مدل سازی عددی اندرکنش های توامان هیدرومکانیکی در سنگ پی سد گتوند"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- نوروزی م، جلالی س.م.الف، خالو کاکایی ر، (۱۳۹۴)، "شبیه سازی هندسی سه بعدی شبکه ی ناپیوستگی های توده سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان"، نشریه

مهندسی تونل و فضاها ی زیرزمینی، شماره ۱، دوره ۴: ۵۳-۶۸

- Adler, P. M., & Thovert, J. F. (1999). *Fractures and fracture networks: theory and applications of transport in porous media*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Babadagli, T. (2001). *Fractal analysis of 2-D fracture networks of geothermal*

reservoirs in south-western Turkey. *Journal of volcanology and geothermal research*, 112(1), 83-103.

- Baghbanan, A., & Jing, L. (2008). *Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 1320-1334.
- Baghbanan, A., & Jing, L. (2007). *Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 704-719.
- Bai, M., Meng, F., Elsworth, D., & Roegiers, J. C. (1999). *Analysis of stress-dependent permeability in nonorthogonal flow and deformation fields*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(3), 195-219.
- Billaux, D., Chiles, J.P., Hestir, K., and Long, J. (1989). *Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass--an example from the Fanay-Augères mine*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts* 26(3-4), 281-299.
- Blum P. *Hydro-mechanical processes in fractured rock*. PhD. Thesis. University of Birmingham, 2004.
- Cacas, M. C., Sarda, S., Bourbiaux, B., & Sabathier, J. C. (2000). U.S. Patent No. 6,023,656. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Cammarata, G., Fidelibus, C., Cravero, M., & Barla, G. (2007). *The hydro-mechanically coupled response of rock fractures*. *Rock mechanics and rock engineering*, 40(1), 41-61.
- Chen, R. (2010). *Groundwater inflow into rock tunnels* (Doctoral dissertation, University of Texas).
- Chen, R., & Tonon, F. (2012). *Fracture Cluster Modeling for Groundwater Inflow Prediction into Rock Tunnels Using Geostatistics*. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (pp. 2372-2381). ASCE.
- Cheng, A. H. (2000). *Multilayered Aquifer Systems: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- Chisyaki, T. (1984). *A study on confined flow of ground water through a tunnel*. *Ground Water*, 22(2), 162-167.

- Dershowitz, W.S., and Einstein, H.H. (1988). *Characterizing rock joint geometry with joint system models*. Rock Mechanics and Rock Engineering 21, 21-51.
- Duncan, A. C. (1981). *A review of Cartesian coordinate construction from a sphere, for generation of two dimensional geological net projections*. Computers & Geosciences, 7(4), 367-385.
- El Tani, M. (2003). *Circular tunnel in a semi-infinite aquifer*. Tunnelling and underground space technology, 18(1), 49-55.
- El Tani, M. (2010). *Helmholtz evolution of a semi-infinite aquifer drained by a circular tunnel*. Tunnelling and underground space technology, 25(1), 54-62.
- Fernández, G., & Alvarez Jr, T. A. (1994). *Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels*. Journal of Geotechnical Engineering, 120(1), 108-128.
- Fernandez, G., & Moon, J. (2010). *Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel—Part 1: Guideline for estimate of ground water inflow rate*. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(5), 560-566.
- Fox, A., Forchhammer, K., Pettersson, A., La Pointe, P., & Lim, D. H. (2012). *Geological discrete fracture network model for the Olkiluoto site, Eurajoki, Finland. Version 2.0 (No. POSIVA--12-27)*. Posiva Oy.
- Gattinoni, P., Scesi, L., Terrana, S. (2009). *Tunnel inflow assessment in discontinuous rock masses: from numerical modeling to empirical equations*, Department of Environmental, Hydraulic, Infrastructures and Surveying Engineering, Italy.
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1964). *Ground water inflows during tunnel driving*. College of Engineering, University of California.
- Heuer, R. E. (1995, June). *Estimating rock tunnel water inflow*. In Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (pp. 41-60). SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC.
- Heuer, R.E. (2005). *"Estimating rock-tunnel water inflow-II"*, Proceeding of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, (pp. 394-407).
- Huangfu, M., Wang, M. S., Tan, Z. S., & Wang, X. Y. (2010). *Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel*. Tunnelling and

Underground Space Technology, 25(4), 391-396.

- Hudson J.A. (2005). Engineering Properties of Rocks. Vol 4, Lexington MA, USA, pp. 290.
- Huseby, O., Thovert, J.-F., and Adler, P.M. (1997). Journal of Physics A: Mathematical and General 30(5), 1415.
- Itasca, 3. D. E. C. "Version 5.0." , 2015.
- Ivars, D. M. (2006). Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study. International journal of rock mechanics and mining sciences, 43(5), 705-725.
- Jacob, C. E., & Lohman, S. W. (1952). Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Eos, Transactions American Geophysical Union, 33(4), 559-569.
- Jafari, A., & Babadagli, T. (2012). Estimation of equivalent fracture network permeability using fractal and statistical network properties. Journal of Petroleum Science and Engineering, 92, 110-123.
- Jafari, A. (2010). Permeability Estimation of Fracture Networks (Doctoral dissertation, University of Alberta).
- Javadi, M., Sharifzadeh, M., & Shahriar, K. (2016). Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran. Tunnelling and Underground Space Technology, 51, 424-438.
- Jing, L., & Hudson, J. A. (2002). Numerical methods in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(4), 409-427.
- Jing, L., & Stephansson, O. (2007). Application Cases of the Discrete Element Methods. Stockholm
- Jurgawczynski, M., Zimmerman, R. W., & Jing, X. D. (2004, October). Estimating the permeability of carbonate rocks using image analysis and effective medium theory. In International Symposium of the Society of Core Analysts.
- Kawecki, M. W. (2000). Transient flow to a horizontal water well. Ground water, 38(6), 842-850.

- Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). *Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution*. Tunnelling and Underground Space Technology, 22(1), 23-27.
- Laubach, S. E. (1997). *A method to detect natural fracture strike in sandstones*. AAPG bulletin, 81(4), 604-623.
- Lei, S. (1999). *An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel*. Ground water, 37(1), 23-26.
- Loew, S. (2002, December). *Groundwater hydraulics and environmental impacts of tunnels in crystalline rocks*. In Proceedings of the 9th International Congress IAEG, Durban.
- Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., & Witherspoon, P. A. (1982). *Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures*. Water Resources Research, 18(3), 645-658.
- Min, K. B., Jing, L., & Stephansson, O. (2004). *Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: method and application to the field data from Sellafield, UK*. Hydrogeology Journal, 12(5), 497-510.
- Moon, J., & Jeong, S. (2011). *Effect of highly pervious geological features on ground-water flow into a tunnel*. Engineering Geology, 117(3), 207-216.
- Muskat, M., & Wyckoff, R. D. (1937). *Flow of homogeneous fluids through porous media*.
- Panda, B. B., & Kulatilake, P. H. S. W. (1999). *Effect of joint geometry and transmissivity on jointed rock hydraulics*. Journal of engineering mechanics, 125(1), 41-50.
- Park, K. H., Owatsiriwong, A., & Lee, J. G. (2008). *Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: a revisit*. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(2), 206-209.
- Perrochet, P. (2005). *A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown*. Hydrogeology journal, 13(5-6), 886-888.
- Perrochet, P., & Dematteis, A. (2007). *Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation*. Ground Water, 45(6), 786-790.
- Polubarinova-Kochina, P. Y. (1962). *Theory of Ground Water Movement*

Princeton University Press. Princeton, New Jersey.

- Price, N. J. (2015). Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rock: The Commonwealth and International Library: Geology Division. Elsevier.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering* Chapman and Hall. London (473 p.).
- Priest, S. D. (2012). Discontinuity analysis for rock engineering. Springer Science & Business Media.
- Rat, M. (1973). *ECOULEMENT ET REPARTITION DES PRESSIONS INTERSTITIELLES AUTOUR DES TUNNELS*. Bull Liaison Lab Ponts Chauss, (68).
- Raymer, J. H. (2001). Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution. In 2001 Rapid Excavation and Tunneling Conference (pp. 1027-1038).
- Schleiss, A. J. (1988). Design of reinforced concrete-lined pressure tunnels. In International Congress of Tunnels and Water, Madrid (Vol. 2, pp. 1127-1133).
- Tsang, Y. W., & Witherspoon, P. A. (1981). Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B10), 9287-9298.
- Stille, H., & Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(1), 46-64.
- Sullivan T.D. (2007). Hydro-mechanical coupling and pite slope movement. *Slope stability*.
- Tsang, Y. W., & Witherspoon, P. A. (1981). Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B10), 9287-9298.
- Wang, M., Kulatilake, P. H. S. W., Um, J., & Narvaiz, J. (2002). Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(7), 887-904.
- Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks.

Springer Science & Business Media.

- Wittke, W. (2014). *Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM)*. John Wiley & Sons.
- Zhang, L., & Franklin, J. A. (1993, February). *Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts (Vol. 30, No. 1, pp. 37-46)*. Pergamon.
- Zhang, X., & Sanderson, D. J. (1996). *Effects of stress on the two-dimensional permeability tensor of natural fracture networks. Geophysical Journal International*, 125(3), 912-924.

Abstract

According to recent studies, the method of discrete fracture network (DFN) In order to build a model similar to the structure of the rock mass, In other words, the structure of fractures in the rock mass and fractures modeling fluid flow is optimal. In all rock engineering issues, particularly the study of fluid flow through the jointed rock masses, describing the fracture geometry and geometric simulation of rock mass and the main stages of the study. According to the survey in fluid flow in rock mass, including the most influential geometrical parameters can be influenced in the hydraulic conductivity of the rock mass fractures, can be noted orientation, trace length or size, aperture, density and intensity of fractures. To simulate the random fracture rock mass by DFN method, Verification of field data available and determine the statistical distribution functions of the geometric parameters of fractures is essential. in this research, with a focus on rock mass of the Parsian reservoir dam, to build a geometric model of the rock mass hydraulic fractures using a discrete fracture network will be discussed. To build the model DFN, the joint sets rock mass by dips software and using field observations conducted, separation and characterized. Then, by the Easyfit and Minitab softwares, for each geometric parameters, statistical distribution functions are defined. Using data obtained from the process listed and commercial software 3DEC, real DFN model of rock mass made and presented. The DFN model and two-parameters cubic model as basis of the hydraulic analysis and empirical relationships presentation are used. Finally, relation to estimate permeability based on matrix aperture and fracture frequency in the cubical model In the form of an empirical equation is presented.

Keywords: *Jointed rock mass, discrete fracture network, permeability, parsians Corp Dam*



Shahrood University of Technology

*Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering*

***Geometric modeling of rock mass to evaluate the hydraulic
conductivity due to present an experimental equation for
underground spaces (case study: Parsian reservoir dam)***

By: Saman Moshiri Ali Aabad

*Supervisor:
Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali*

*Advisor:
Dr. Mehdi Noroozi*

January 2017