

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

قابلیت تزریق در توده سنگ درزه‌دار

نگارنده: الهام احمدی

اساتید راهنما:
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی
دکتر مهدی نوروزی

استاد مشاور:
مهندس محسن شریفی

بهمن ماه ۱۳۹۷

شماره: ۲۰۴۴۱/۴۳۹
تاریخ: ۹۷-۱۲-۲۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای الهام احمدی با شماره دانشجویی ۹۴۰۱۵۷۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی تحت عنوان قابلیت تزریق توده سنگ درزه‌دار که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد.

قبول (با درجه): علمی مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر محمد اسماعیل جلالی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد	دکتر مهدی نوروزی	۲- استاد راهنمای دوم
	-	مهندس محسن شریفی	۳- استاد مشاور
	استاد	دکتر رامین رفیعی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر مرتضی جوادی	۵- استاد ممتحن اول
	استاد	دکتر شکرالله زارع	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز) می‌تواند نام خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تشکر و قدردانی

این پایان نامه حاصل تلاش جمعی است که مرا در رسیدن به نتیجه یاری کرده‌اند و بر خود لازم می‌دانم از تمام این عزیزان تشکر نمایم. در ابتدا از دکتر جلالی که با راهنمایی‌هایشان چراغ راه من بودند و دکتر نوروزی که با صبر و حوصله مرا یاری نمودند. بی‌شک بدون همکاری این عزیزان این تحقیق میسر نبود. همچنین استاد مشاور گرامی جناب مهندس شریفی تشکر نموده و مراتب قدردانی را به ایشان ابراز می‌دارم. از درگاه ایزد منان برای این عزیزان سلامتی و شادکامی همراه با موفقیت روزافزون را خواستارم.

تقدیم اثر

پدرم، دلم پر است از جای خالی تو، می‌نویسم از تو برای تو. دیروز که قلم به دست گرفتم، دوست داشتم کنارم باشی اما نمی‌توانستی، گفتم پس امروز من قلم را بر زمین می‌گذارم تا من در کنارت باشم اما دگر نبودی.... در این بین سهم من از تو شد، نتوانستن دیروز و نبودن امروز. اما اکنون یقین دارم که از همیشه خوشحال‌تری، پس همین برایم کافیست، دوستت دارم از همیشه تا همیشه....

مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق، که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر....

این پایان‌نامه را به مادر عزیزم و روح پدرم تقدیم می‌کنم.

تعهد نامه

اینجناب الهام احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن- مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه قابلیت تزریق توده سنگ درزه دار تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر مهدی نوروزی متعهد می شوم:

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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تزریق پذیری توده سنگ به ویژه تزریق پی‌های سنگی در سدها به عوامل گوناگونی وابسته است که می‌توان آن‌ها را به سه دسته عوامل زمین‌شناسی، عوامل فنی و ویژگی‌های دوغاب تزریقی، تقسیم نمود. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در احداث یک سد مورد بررسی قرار می‌گیرد. کنترل نشت آب از سد هم به لحاظ اقتصادی و هم از نظر پایداری سد از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این تحقیق به بررسی تزریق‌پذیری توده سنگ درزه‌دار با تمرکز بر روی مطالعه موردی طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان، پرداخته شده است. برای انجام این تحقیق، در ابتدا سابقه‌ی علمی موضوع مدنظر را بررسی نموده و اطلاعات پایه و ضروری گردآوری شده است. در مرحله‌ی بعد ویژگی‌های توده سنگ از جمله بازشدگی و زبری، فاصله‌داری، جهت‌داری، طول اثر(پایایی) و شدت و ویژگی‌های دوغاب مانند مقدار مدول بالک، ویسکوزیته و فشار دوغاب و تاثیر آن‌ها بر روی نرخ جریان و میزان نفوذ دوغاب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سپس با تمرکز بر مورد مطالعاتی سد رودبار لرستان، مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) از ویژگی‌های هندسی توده سنگ با استفاده از تحلیل آماری اطلاعات دریافتی، تهیه شده است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای 3DEC، مدل عددی سه‌بعدی از نفوذ دوغاب به داخل توده سنگ تهیه شده است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل جریان سیال در میان ناپیوستگی‌ها را دارد. اعتبار مدل عددی بر اساس نتایج آزمایش لوژان سنجیده شد و در نهایت تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر ویسکوزیته دوغاب و بازشدگی درزه‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، میزان نفوذ دوغاب برای مورد مطالعاتی سد رودبار لرستان، ۱٫۵ متر است. ویسکوزیته دوغاب تاثیر چندانی بر میزان نفوذ دوغاب ندارد ولی بازشدگی درزه‌ها تاثیر مستقیم بر میزان نفوذ دوغاب دارد. همچنین ناهمسانگردی توده سنگ تاثیر مهمی در طول نفوذ و جهت‌گیری نفوذ دوغاب دارد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عددی، تزریق‌پذیری، عمق نفوذ دوغاب، 3DEC

فهرست

۱	فصل اول (کلیات).....
۲	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ هدف پژوهش
۶	۳-۱ ضرورت پژوهش
۷	۴-۱ سابقه موضوع
۱۱	۵-۱ روش پژوهش
۱۳	۶-۱ ساختار پژوهش
۱۵	فصل دوم(مبانی نظری).....
۱۶	۱-۲ مقدمه
۱۶	۲-۲ ویژگی‌های هندسی شکستگی‌های موثر در عبور جریان سیال
۱۶	۱-۲-۲ جهت داری
۱۷	۲-۲-۲ اندازه شکستگی‌ها
۱۸	۱-۲-۲-۲ توزیع نرمال
۱۸	۲-۲-۲-۲ توزیع نمایی منفی یا توزیع نمایی
۱۹	۳-۲-۲-۲ توزیع یکنواخت
۲۰	۴-۲-۲-۲ توزیع گاما
۲۰	۵-۲-۲-۲ توزیع لاگ نرمال
۲۱	۶-۲-۲-۲ توزیع قانون توان
۲۲	۳-۲-۲ فاصله داری
۲۲	۴-۲-۲ شدت شکستگی
۲۳	۵-۲-۲ پرشدگی
۲۴	۶-۲-۲ بازشدگی
۲۴	۷-۲-۲ آرایش فضایی (موقعیت) شکستگی‌ها
۲۵	۳-۲ عوامل موثر در حرکت سیال درون تک درزه منفرد

- ۴-۲ رفتار هیدرولیکی در شکستگی‌های توده سنگ درزه‌دار ۲۶
- ۵-۲ جریان دوغاب در توده سنگ درزه‌دار ۲۸
- ۶-۲ آزمایش‌های نفوذپذیری ۳۲
- ۱-۶-۲ آزمایش پمپاژ ۳۲
- ۲-۶-۲ آزمایش لوژان کلاسیک ۳۵
- ۳-۶-۲ عدد لوژان ۳۹
- ۷-۲ روش‌های تزریق ۴۱
- ۱-۷-۲ تزریق پرده‌ای ۴۱
- ۲-۷-۲ تزریق ناحیه‌ای یا پوششی ۴۲
- ۳-۷-۲ تزریق تماسی ۴۳
- ۴-۷-۲ تزریق تحکیمی ۴۳
- ۵-۷-۲ تزریق پیش‌تنیدگی ۴۴
- ۶-۷-۲ تزریق تراکمی ۴۵
- ۷-۷-۲ تزریق فواره‌ای ۴۵
- ۸-۷-۲ تزریق جابجایی یا شکست یا ترک ۴۷
- ۹-۷-۲ تزریق نفوذی یا پرکردنی ۴۸
- ۸- عوامل موثر بر تزریق ۴۸
- ۹-۲ تولید شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) ۵۰
- ۱۰-۲ مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال در نرم‌افزار 3DEC ۵۲
- ۱-۱۰-۲ حل عددی جریان سیال در شبکه شکستگی ۵۳
- فصل سوم (پیشینه مطالعات) ۵۵
- ۱-۳ مقدمه ۵۶
- ۲-۳ روش‌های تجربی و تحلیلی در برآورد میزان نفوذ ۵۸
- ۳-۳ روش‌های عددی در برآورد میزان نفوذ دوغاب ۶۰
- ۱-۳-۳ روش‌های پیوسته ۶۱

۶۱	..... ۱-۱-۳-۳ روش المان محدود
۶۱	..... ۲-۱-۳-۳ روش تفاضل محدود
۶۱	..... ۳-۱-۳-۳ روش المان مرز
۶۲	..... ۲-۳-۳ روش‌های ناپیوسته
۶۲	..... ۱-۲-۳-۳ روش المان مجزا
۶۷	..... فصل چهارم (معرفی سد رودبار لرستان)
۶۸	..... ۱-۴ موقعیت و زمین‌شناسی منطقه سد رودبار لرستان
۶۹	..... ۲-۴ مطالعات آزمایش لوژان در منطقه
۷۵	..... فصل پنجم (مدل‌سازی عددی و تحلیل حساسیت)
۷۶	..... ۱-۵ مقدمه
۷۶	..... ۲-۵ مطالعات میدانی و جمع‌آوری اطلاعات ساختاری
۷۷	..... ۳-۵ تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌های برداشت شده
۷۷	..... ۱-۳-۵ توزیع جهت داری
۷۸	..... ۲-۳-۵ شدت درزه
۷۸	..... ۳-۳-۵ توزیع فاصله‌داری
۷۸	..... ۴-۳-۵ توزیع پایایی
۸۴	..... ۴-۵ مدل DFN
۸۵	..... ۵-۵ تخصیص ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی درزه‌ها و سیال به مدل
۸۷	..... ۶-۵ اعمال شرایط مرزی به مدل
۸۹	..... ۷-۵ اعتبارسنجی
۹۶	..... ۸-۵ مدل‌سازی عملیات تزریق
۱۰۳	..... ۱-۸-۵ تحلیل حساسیت پارامتر ویسکوزیته دوغاب بر روی نرخ گسترش آن
۱۰۳	..... ۲-۸-۵ تحلیل حساسیت بازشدگی درزه بر روی نرخ گسترش دوغاب
۱۱۱	..... فصل ششم
۱۱۲	..... ۱-۶ نتیجه‌گیری

۱۱۳.....	۲-۶ پیشنهادات
۱۱۵.....	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ عوامل موثر بر جریان سیال در یک شکستگی منفرد..... ۲۶
- شکل ۲-۲ شبکه شکستگی دو بعدی توده سنگ در تحلیل هیدرولیکی..... ۲۷
- شکل ۳-۲ جریان دوغاب از میان درزه سنگ..... ۳۲
- شکل ۴-۲ وضعیت جریان شعاعی در یک چاه در یک سفره محصور..... ۳۴
- شکل ۵-۲ شکل شماتیک از نحوه‌ی جایگذاری تجهیزات آزمایش لوژان..... ۳۹
- شکل ۶-۲ نحوه‌ی عملکرد آزمایش لوژان..... ۳۹
- شکل ۷-۲ نمایی از تزریق پرده‌های در تونل..... ۴۲
- شکل ۸-۲ گمانه‌های تزریق برای تزریق تماسی پوشش تونل‌ها..... ۴۳
- شکل ۹-۲ الگوی تزریق تحکیمی تونل..... ۴۴
- شکل ۱۰-۲ تزریق پیش‌تنیدگی..... ۴۵
- شکل ۱۱-۲ تزریق تراکمی..... ۴۶
- شکل ۱۲-۲ مراحل انجام عملیات تزریق جت..... ۴۶
- شکل ۱۳-۲ رابطه فشار و حجم تزریق در عملیات تزریق شکست هیدرولیکی..... ۴۷
- شکل ۱۴-۲ رابطه فشار و حجم تزریق در تزریق نفوذی..... ۴۸
- شکل ۱۵-۲ فعل و انفعالات بین سیال و سنگ در ناپیوستگی‌ها..... ۵۴
- شکل ۱-۴ موقعیت سد رودبار لرستان..... ۶۸
- شکل ۲-۴ موقعیت گمانه‌ها در طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان..... ۷۰
- شکل ۳-۴ موقعیت گمانه‌های تزریق آزمایشی در ابتدای مغار نیروگاه..... ۷۱
- شکل ۲-۵ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش..... ۸۲
- شکل ۳-۵ تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت شده..... ۸۳
- شکل ۴-۵ مدل DFN تهیه شده از دسته درزه‌های منطقه سد رودبار لرستان..... ۸۴
- شکل ۵-۵ رفتار برشی و اتساع درزه‌ها..... ۸۶
- شکل ۶-۵ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل یک درزه..... ۹۰

- شکل ۵-۷ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل دو درزه ۹۱
- شکل ۵-۸ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل سه درزه ۹۲
- شکل ۵-۹ اعتبارسنجی مدل عددی ۹۴
- شکل ۵-۱۰ تحلیل حساسیت نسبت به دوره گردش ۹۴
- شکل ۵-۱۱ تاریخچه نیروهای نامتعادل مدل اعتبارسنجی شده ۹۵
- شکل ۵-۱۲ مدل عددی آزمایش لوژان ۹۶
- شکل ۵-۱۳ تاریخچه نیروهای نامتعادل قبل از حفاری چال‌های تزریق ۹۷
- شکل ۵-۱۴ شماتیکی از شعاع تاثیر دوغاب در تزریق ۹۷
- شکل ۵-۱۶ برازش منحنی داده‌های نسبت آب به سیمان ۱۰۰
- شکل ۵-۱۷ میزان نفوذ دوغاب در مدل ۱۰۳
- شکل ۵-۱۸ طول نفوذ دوغاب با تغییر ویسکوزیته ۱۰۰
- شکل ۵-۱۹ تحلیل حساسیت بر مبنای ویسکوزیته دوغاب ۱۰۳
- شکل ۵-۲۰ تحلیل حساسیت بر مبنای بازشدگی درزه‌ها ۱۰۶

فهرست جداول

- جدول ۲-۲ اندازه‌گیری شدت و چگالی شکستگی‌ها در ابعاد مختلف ۲۲
- جدول ۳-۲ روش تعیین عدد لوژان بر اساس مقادیر لوژان و الگوی تغییرات آن‌ها ۴۰
- جدول ۱-۴ موقعیت گمانه‌های تزریق آزمایشی ۷۱
- جدول ۲-۴ مقادیر فشار تزریق در تزریق آزمایشی ۷۲
- جدول ۳-۴ مقادیر خوردند سیمان ۷۳
- جدول ۱-۵ ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های برداشت شده ۸۱
- جدول ۲-۵ ویژگی‌های مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی ۸۵
- جدول ۳-۵ خصوصیات آب تخصیص یافته به مدل عددی ۸۶
- جدول ۴-۵ روابط تجربی برای تعیین مقدار k ۸۴
- جدول ۵-۵ نتایج تحلیل‌های جریان بر حسب بازشدگی درزه ۹۱
- جدول ۶-۵ ویژگی‌های دوغاب با نسبت‌های مختلف آب به سیمان ۹۸
- جدول ۷-۵ ویژگی‌های دوغاب استفاده شده در تزریق ۹۴

فصل اول

طرح و کلیات تحقیق

توسعه اصولی زیر ساخت‌ها همواره به‌عنوان رکن اصلی پیشرفت و آبادانی شهرها قلمداد می‌شود. از این‌رو طراحی و ساخت بهینه در کنار تاکید برکیفیت ساخت و عمر مفید زیر ساخت‌ها در هنگام احداث، موجب جلوگیری از بروز خسارات متعدد و کاهش هزینه‌های فزاینده تعمیر و نگهداری در دوره بهره‌برداری خواهد بود. یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسين در خصوص احداث تونل، امکان مواجهه با آب و نفوذ آن به داخل تونل به‌واسطه گذر از زیر سطح زمین در محیط‌های شهری و کوهستانی است. ورود آب به تونل‌ها یکی از مهم‌ترین مشکلات تونل‌سازی در محیط‌های سنگی به شمار می‌رود. رفتار هیدرولیکی یک توده سنگ به ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌های آن بستگی دارد. انتقال جریان سیال درون توده سنگ از طریق شکستگی‌های سنگ و محیط‌های متخلخل انجام می‌گیرد. در توده سنگ‌های درزه‌دار و به‌ویژه در سنگ‌های سخت جریان آب توسط ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. حضور آب باعث ایجاد مشکلاتی مانند کاهش پایداری توده سنگ، افزایش فشار روی سیستم‌های نگهداری، تاثیر مخرب روی عوامل ژئومکانیکی محیط و در نهایت خطرات جانی و مالی می‌شود. امروزه از روش تزریق به‌طور گسترده برای کاهش جریان آب از درون توده سنگ و به‌طور گسترده برای آب‌بندی شکستگی‌های سنگ به‌منظور کاهش نفوذپذیری توده سنگ استفاده می‌شود. تزریق، جریان آب زیرزمینی را از طریق مسدود کردن شکستگی‌های متصل بهم، کاهش می‌دهد. تزریق دوغاب سیمان یکی از روش‌های معمول در به‌سازی خاک و توده سنگ است که به‌منظور بهبود عوامل ژئومکانیکی و قابلیت باربری توده سنگ یا کاهش تراوایی آن انجام می‌شود. تزریق در محیط‌های سنگی به‌دلیل نوع و مشخصات ناپیوستگی‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر با تزریق در خاک متفاوت است. طی عملیات تزریق در سنگ، دوغاب با فشار معینی تزریق می‌شود و این مخلوط در بازشدگی و درزه شکاف‌های موجود حرکت کرده و باعث کاهش اثر ناپیوستگی‌ها در عبور جریان خواهد شد. تزریق‌پذیری به‌عنوان توانایی سنگ برای پذیرش دوغاب تعریف شده است (El Tani et al., 2012).

عوامل موثر بر تزریق پذیری را می توان به دو بخش تقسیم کرد (Saeidi et al., 2013) :

- عوامل قابل کنترل که شامل مواد دوغاب، فشار، نرخ جریان و سیستم تزریق است.
- عوامل غیر قابل کنترل که شامل ویژگی های مکانیکی و فیزیکی توده سنگ است.

اثر تزریق در سنگ شکسته به میزان نفوذ دوغاب در شکستگی های منفرد و گسترش آن در شبکه شکستگی های سنگ بستگی دارد. ویژگی های از درزه شامل بازشدگی، زبری، فاصله داری، جهت داری، طول اثر (پایایی) و شدت و ویژگی هایی از دوغاب شامل مقدار مدول بالک، ویسکوزیته و فشار دوغاب بر روی نرخ جریان و طول نفوذ دوغاب در توده سنگ درزه دار موثر هستند (Saeidi et al., 2013). در این میان بازشدگی درزه یکی از مهم ترین عواملی است که باید به دقت در نظر گرفته شود. از طرف دیگر، به منظور ساخت مدلی نزدیک به واقعیت و پیش بینی دقیق میزان نفوذ دوغاب لازم است با کاربرد توزیع های آماری، هریک از ویژگی های درزه مدنظر قرار گیرد و مدلی از وضعیت هندسی درزه-ها ارائه شود که بیشترین تطابق را با واقعیت دارد.

یکی از چالش های مهم در فرآیند تزریق محاسبه عمق نفوذ دوغاب در طراحی است. به دلیل ماهیت پیچیده توده سنگ مشتمل بر وجود شکستگی هایی با توزیع های تصادفی و بافت ناهمگن، تعیین عمق نفوذ دوغاب برای طراحی تزریق موثر با استفاده از روش های آزمایشگاهی و تحلیلی غیر ممکن است. در عین حال، شبیه سازی عددی می تواند مسایل پیچیده مربوط به توده سنگ را با در نظر گرفتن برخی ساده سازی ها حل کند (Granet et al., 2001). در خصوص مطالعه جریان سیال در توده سنگ درزه دار، با توجه به محدودیت های روش های تحلیلی و آزمایشگاهی و نیز دقت پایین روش های تجربی، لزوم استفاده از روش های عددی بیشتر احساس می شود.

در میان روش های تحلیل جریان، روش های توامان مدل های تنش و جریان از دقت بیشتری

برخوردار هستند. این روش‌ها، رویکردهای متفاوتی دارند که توسط محققین همانند ستاری^۱ و همکاران، دین^۲ و همکاران و سامیر^۳ و همکاران طبقه‌بندی شده‌اند. این طبقه‌بندی‌ها تفاوت اندکی باهم دارند. بر اساس تحقیق ستاری و والتر روش‌های توامان به پنج دسته اصلی دسته‌بندی می‌شوند که عبارتند از: کاملاً توامان، به‌طور تکراری توامان، غیر توامان و شبه توامان.

در روش کاملاً توامان معادله‌ی جریان سیال و جابجایی در یک سیستم گسسته که معمولاً اجزای محدود است، توامان حل می‌شوند. روش‌های کاملاً توامان مزیت پایداری را به دلیل طبیعت حل توامان دارند. حل توامان جابجایی و جریان چند فازی سبب ایجاد ماتریس‌های بزرگ و طولانی کردن زمان‌های اجرا می‌شود (Settari, A., and Walters, D.A, 2001).

از نرم‌افزارهای تجاری که قابلیت شبیه‌سازی توده سنگ درزه‌دار و رفتار هیدرومکانیکی در دو و سه بعد را دارند، کد UDEC و 3DEC از محصولات شرکت ITASCA را می‌توان نام برد. این نرم‌افزارها توانایی انجام تحلیل جریان سیال در شکاف‌های (درزه‌های) سیستمی متشکل از بلوک‌های نفوذناپذیر را دارند. با توجه به اهمیت حرکت جریان سیال در توده سنگ، تاکنون شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای در مهندسی سنگ انجام گرفته است. البته قابل توجه است، مدل‌سازی صریح تعداد بسیار زیاد درزه، در مسایلی که مقیاس بزرگ دارند، کار با این نرم‌افزارها را به دلیل محدودیت توان محاسباتی کامپیوترها، مشکل می‌سازد.

الگوریتم‌های شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی و هیدرومکانیکی در نرم‌افزار 3DEC در چهار حالت کلی برای توده سنگ درزه‌دار تحت عناوین زیر تعریف شده است.

¹ Settari

² Dean

³ Samir

الگوریتم هیدرولیکی که جریان منفرد^۱ نام دارد و در این حالت تنش به مدل اعمال نمی‌شود و جریان سیال با فشار منفذی معلوم از میان درزه‌ها عبور می‌کند.

الگوریتم هیدرومکانیکی توامان یک طرفه^۲ که به توامان یک طرفه معروف است، از این الگوریتم در جایی استفاده می‌شود که تغییر شکل مکانیکی در اثر اعمال تنش زیاد نبوده و تغییرات بازشدگی نیز به تبع آن زیاد نیست در واقع ما به جواب transient مدل اهمیتی نمی‌دهیم. در این الگوریتم ابتدا باید مدل در یک مرحله به تعادل مکانیکی رساند سپس در حالت جریان منفرد آن را حل کرد بعد از رسیدن به حالت پایدار مدل جریان خروجی از مدل عددی برآورد می‌گردد.

الگوریتم هیدرومکانیکی جریان سریع^۳ که در این مورد فرض می‌شود سنگ زیاد سخت نیست و بازشدگی‌ها بسیار کوچکند و سیال بین درزه‌ها غیرفشارنده^۴ هستند. در نهایت الگوریتم هیدرومکانیکی کاملا توامان که سیال تحت فشار فرض شده و تنش‌های برجا و فشار منفذی به صورت توامان به مدل اعمال می‌شود.

در روش کاملا توامان معادله‌ی جریان سیال و جابجایی در یک سیستم گسسته که معمولا اجزای محدود است، توامان حل می‌شوند. روش‌های کاملا توامان مزیت پایداری را به دلیل طبیعت حل توامان در حالی که از تعدادی کاستی نیز رنج می‌برد، دارند. به عنوان مثال، این روش نیازمند تلاش زیاد برای گسترش برنامه‌ها به منظور متناسب کردن با مسائل مشخص در مهندسی مخزن است و در نتیجه ساختن یک سیستم کاملا توامان با استفاده از مدل‌های پیچیده‌ی موجود جریان و تنش کار مشکلی است. بیشتر قابلیت مدل‌های جریان که در این سال‌ها گسترش یافته‌اند در این شبیه‌سازها

¹ Flow only

² One_way coupling

³ Fast flow

⁴ Incompressible

وجود ندارند. همچنین حل توامان جابجایی و جریان چند فازی سبب ایجاد ماتریس‌های بزرگ و طولانی کردن زمان‌های اجرا می‌شود (Settari, A., and Walters, 2001).

۲-۱ هدف پژوهش

باتوجه به اهمیت آب‌بندی و لزوم افزایش ضریب اطمینان ایمنی کارکنان در حین اجرای سد، تونل و فضاهای زیرزمینی، همچنین ضروریست پایداری سازه بعد از بهره‌برداری، تزریق دوغاب و مواد دیگر برای به‌سازی زمین ضروری است. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق، تعیین میزان نفوذ دوغاب در توده سنگ‌های درزه‌دار است که باتوجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ از جمله بازشدگی، زبری، فاصله‌داری، جهت‌داری، طول اثر (پایایی) و شدت ناپیوستگی‌ها و ویژگی‌های از دوغاب شامل مدول بالک، ویسکوزیته و فشار دوغاب و تاثیر آن‌ها بر روی نرخ جریان و طول نفوذ دوغاب بررسی می‌شود. از طرفی به‌منظور افزایش دقت در پیش‌بینی میزان نفوذ دوغاب، در این تحقیق، مدلی دقیق از هندسه ناپیوستگی‌ها گرفته شده است. برای این منظور بر اساس توابع توزیع آماری ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)¹ از منطقه مورد مطالعه تهیه شده و در نهایت، با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا و به کارگیری روش عددی المان مجزای سه‌بعدی (نرم‌افزار 3DEC) مطالعه جریان سیال در محیط‌های شکسته و درزه‌دار ارایه شده است.

۳-۱ ضرورت پژوهش

نفوذ آب به‌داخل تونل یکی از عواملی است که در حین ساخت و نیز هنگام بهره‌برداری حفاریات زیرزمینی باید به‌دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین اثر مخرب نفوذ آب به درون تونل را

¹ Discrete Fracture Network

می‌توان کاهش پایداری فضای زیرزمینی بیان نمود. در مورد تونل‌های انتقال آب، عدم کنترل نفوذ آب به داخل تونل علاوه بر کاهش پایداری سبب بروز مسایل متعددی از جمله تغییر خصوصیات هیدرولیکی جریان تونل، خطر ورود آب‌های آلوده، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، خشک‌شدن چشمه‌ها و دریاچه‌های مسیر، تغییر احتمالی کیفیت آب و همچنین باعث صدمات قابل توجه به گونه‌های زیست محیطی منطقه می‌گردد.

عملیات تزریق دوغاب در توده سنگ درزه‌دار به عنوان یک راه حل ارزان و موثر در بهبود ویژگی‌های توده سنگ از جمله نفوذپذیری آن به‌شمار می‌رود. در خصوص سازه‌های آبی، احداث پرده‌های آب‌بند از طریق الگوی مناسب تزریق راهکار مناسب در برابر فرار آب است. همچنین تزریق تنها راه حل برای آب‌بندی تونل‌هایی به‌شمار می‌رود که نگهدارنده دایم بتنی پیش ساخته در آن نصب شده است و هیچ‌گونه دسترسی به دیواره تونل وجود ندارد. به همین دلیل تزریق آب‌بند یک فرآیند ضروری برای این نوع تونل‌ها به حساب می‌آید.

یکی از عوامل مهم در اندازه‌گیری کارایی یا عدم کارایی تزریق، میزان نفوذ دوغاب در فرآیند تزریق است. در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی عددی به پیش‌بینی جریان دوغاب و میزان نفوذ دوغاب به داخل توده سنگ درزه‌دار پرداخته شده است. در این راستا از مدل هندسی سه بعدی شبکه درزه‌های مجزا (DFN) و توابع توزیع آماری برای بازشدگی در حالت وابستگی آن با طول درزه و روش توامان هیدرومکانیک استفاده شده، که هر کدام از این موارد، یک نوآوری محسوب می‌شود.

۴-۱ سابقه موضوع

در بحث اثرات ویژگی‌های توده سنگ در فرآیند تزریق، بسیاری از محققان، رفتار هیدرولیکی سنگ‌ها را با تأکید بر نفوذپذیری و با استفاده از عوامل مختلف عملی و نظری توصیف کرده‌اند.

از اوایل دهه ۶۰ میلادی مطالعات آزمایشگاهی بر روی حرکت جریان سیال در توده سنگ آغاز شده که از آن جمله می‌توان اولسون^۱ و بارتن^۲ در سال ۲۰۰۱ اشاره کرد. نتیجه به‌دست آمده از مطالعات این است که ویژگی‌ها درزه‌های سنگی و مشخصات مکانیک‌سنگی پروژه مهم‌ترین عوامل موثر در بخش حرکت سیال در توده سنگ هستند.

در سال ۱۹۶۸ اسنو^۳ مطالعات اولیه را در زمینه تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار انجام داده است. همچنین در سال ۱۹۸۵ اودا مطالعات بر روی برآورد نفوذپذیری توده سنگ انجام داده است. در خصوص تاثیر عوامل هندسی درزه‌ها بر عمق نفوذ دوغاب، در سال ۱۹۹۰ هولسبی^۴، ویژگی‌های توده سنگ شامل فاصله‌داری درزه، شیب، پایایی، پرشدگی، مقاومت و تنش برجا را موثرترین عوامل بر تزریق‌پذیری دانست و علاوه بر ویژگی‌های توده سنگ، بیان کرد که ویژگی‌های رئولوژیکی دوغاب نقش مهمی در تزریق‌پذیری توده سنگ دارد (Houlsby et al., 1990).

برای برآورد نفوذپذیری سنگ با استفاده از معادلات لاپلاس، در سال ۱۹۹۱ دارلوفسکی^۵ تحقیقی را انجام داد. پریست^۶، سال ۱۹۹۳ بر روی استفاده از توابع توزیع چگالی احتمال در شبیه‌سازی عددی توده سنگ و برآورد تانسور نفوذپذیری تحقیقاتی را صورت داد. در سال ۲۰۱۴ تانسور نفوذپذیری توده سنگ خرد شده در فضای سه‌بعدی را زیمرمن^۷ و همکاران برآورد کردند. در سال ۱۳۹۳ اصفهانی موضوع برآورد تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی اجزای مجزا و مدل‌های شبکه شکستگی مجزا در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام داده است.

بر اساس آنچه گفته شد می‌توان دریافت که ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها، مهم‌ترین پارامترهای موثر

¹ Olson

² Barton

³ snow

⁴ Houlsby

⁵ darlofsky

⁶ priest

⁷ zimmerman

روی نفوذپذیری و به طور کلی طراحی‌های مهندسی سنگ است. بررسی‌های مختلف صورت گرفته توسط محققینی از جمله نرتنیکس^۱، بورک^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۵، در سال ۱۹۸۹ نولته^۳ و همکاران، میچی^۴ و همکاران ۱۹۹۶، بارتن و همکاران ۱۹۸۵، جونز^۵ و همکاران ۱۹۹۹ بر روی اطلاعات حاصل از گمانه‌ها حاکی از این است که از میان تمام درزه‌های موجود در توده سنگ تعداد بسیار کمی از آن‌ها در انتقال جریان سیال نقش اساسی دارند (Zhang et al., 2002). کارتر و همکاران در سال ۲۰۱۲ روش‌هایی برای بهبود طراحی تزریق دوغاب در شکستگی‌های توده سنگ با استفاده از مدل DFN ارائه دادند (Carter et al., 2012).

در سال ۱۹۹۶ ژانگ و همکاران، با استفاده از کدنویسی با نرم‌افزار UDEC، به بررسی جریان سیال از میان توده سنگ درزه‌دار پرداختند که هدف اصلی پیدا کردن اثرات هر دو عوامل قابل کنترل و غیرقابل کنترل در نرخ جریان و طول نفوذ دوغاب در توده سنگ با استفاده از داده‌های عددی، تحلیلی و میدانی بود (Zhang et al., 1996). یانگ و همکاران (۲۰۰۲) یک شبیه‌سازی عددی دوبعدی با استفاده از شبکه درزه تصادفی انجام دادند و اثرات ویژگی‌های درزه بر روی عمق نفوذ دوغاب را نشان دادند. مدل آن‌ها وابسته به تاثیر ویژگی‌های دوغاب، میانگین و انحراف استاندارد مقادیر شیب، بازشدگی، طول و چگالی درزه بر عمق نفوذ است. با این وجود، آن‌ها اثر زبری و پایایی درزه را بر روی ناحیه گسترش دوغاب در نظر نگرفته‌اند (Yang et al., 2002). ولی‌پور شکوهی و مرتضوی در سال ۱۳۸۶ به تحلیل عددی تاثیر عوامل موثر در فرآیند تزریق در محیط‌های سنگی ناپیوسته با مدل UDEC پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که برای تزریق مناسب، فاصله‌داری و تداوم درزه عوامل موثرتری می‌باشند (ولی‌پور شکوهی و مرتضوی، ۱۳۸۶). مسعودی و همکاران در سال ۱۳۸۸ با

¹ Nertenics

² Burke

³ Nolt

⁴ Mitchi

⁵ Jones

مدل عددی و نرم‌افزار UDEC به مدل‌سازی تحلیلی و عددی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار بر اساس نتایج تزریق آزمایشی ساختگاه سد سیمره پرداخته‌اند (مسعودی و همکاران، ۱۳۸۷).
به‌منظور بررسی ویژگی‌های موثر بر شکستگی‌ها بر جریان سیال در شبکه شکستگی، لیا^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۷، از کدنویسی در نرم‌افزار UDEC، به بررسی جریان سیال در سنگ‌های درزه‌دار پرداختند و بیان کردند که بلوک‌های احاطه شده توسط ناپیوستگی‌ها می‌توانند به‌عنوان مواد صلب (مواد سیمانی) مدل‌سازی شوند. همچنین آن‌ها بیان نمودند که قابلیت هدایت درزه به‌طور مستقیم به تغییر شکل مکانیکی وابسته به فشار آب درزه مربوط می‌شود (Liao et al., 1997). آمادی^۲ در سال ۲۰۰۱، یک راه‌حل تحلیلی در خصوص جریان دوغاب به صورت مایع‌های غیرنیوتنی در درزه‌های سنگ ارایه کرد (Amadei, 2001). علاوه بر موارد بالا، گوستافسون و استیله^۳ در سال ۲۰۰۵ و ال تانی در سال ۲۰۱۲، راه‌حل‌های تحلیلی برای نرخ جریان دوغاب ارایه دادند (Gustafson and Stille, 2005). El Tani, 2012). اکثر راه‌حل‌های تحلیلی و مدل‌های عددی، جریان را در کانال یا دیسک با بازشدگی ثابت شبیه‌سازی کرده‌اند. سوئی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مدل عددی و آزمایشگاهی بر روی ضریب آب‌بندی تزریق مواد شیمیایی در شکستگی‌های سنگ دارای جریان آب فعالیت نمودند (Sui et al., 2015).

در سال ۱۹۸۹ لست^۴ و همکاران با نرم‌افزار UDEC به مطالعه واکنش سنگ درزه‌دار به تزریق سیال پرداخته‌اند (N.C. Last et al., 1989). همچنین لیسا هرنکوویست^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به مطالعه موردی تونل سنگ سخت روی قسمت مشخصات سیستم درزه آب‌دار برای تزریق تونل کار کرده‌اند (Lisa et al, 2012). در سال ۱۳۸۸ کامگار و همکاران با مدل‌های تحلیلی و آماری به

¹ Liao

² Amadei

³ Gustafson and Stille

⁴ Last

⁵ Hernqvist

بررسی شاخص نفوذپذیری ثانویه و تزریق‌پذیری توده سنگ ساختگاه سد تنگ‌سرخ جهت طراحی پرده آب‌بند پرداخته است (کامگار و همکاران، ۱۳۹۲). در سال ۱۳۹۴ محمودپور موضوع تحلیل عددی تاثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه‌دار فعالیت نمود (محمودپور، ۱۳۹۴).

در خصوص عمق نفوذ دوغاب، در سال ۲۰۰۲ یانگ و همکاران، یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از یک شبکه درزه تصادفی انجام و اثرات ویژگی‌های درزه را در عمق نفوذ دوغاب نشان دادند. مدل بر اساس ویژگی‌های دوغاب، میانگین طول درزه و چگالی دوغاب برای عمق نفوذ شبیه‌سازی شده است (yang et al., 2002).

مهدوی‌نژاد در سال ۱۳۹۰ به بررسی فرآیند تزریق پرده آب‌بند در تونل‌های سنگ سخت (مطالعه موردی تونل کرج) پرداخت (مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰). اژدری در سال ۱۳۹۴ بر روی تحلیل عددی تاثیر عوامل هندسی درزه و تنش تسلیم دوغاب بر روی کیفیت عملیات تزریق تمرکز نمود (اژدری، ۱۳۹۴). در سال ۱۳۹۵ مشیری علی‌آباد به مدل‌سازی هندسی توده سنگ با هدف ارایه رابطه تجربی برای برآورد آب‌گذری در سازه‌های زیرزمینی پرداخت (مشیری علی‌آباد، ۱۳۹۵).

۵-۱ روش پژوهش

روش اجزای مجزا، یک روش عددی است که معمولاً به منظور تحلیل رفتار محیط‌های ناپیوسته به‌کار می‌رود. در این روش توده سنگ به‌صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که به‌وسیله درزه‌ها تفکیک شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و امکان ایجاد تغییرشکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد (زاهدی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین در این نرم‌افزار امکان تحلیل جریان سیال از میان فصل مشترک بلوک‌ها (درزه‌ها) وجود دارد.

در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی عددی و با کاربرد نرم‌افزار 3DEC به پیش‌بینی جریان و

میزان یا عمق نفوذ دوغاب به داخل توده سنگ درزه‌دار پرداخته شده است. روش‌های عددی در قیاس با رویکردهای تجربی و تحلیلی دارای این مزیت هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تاثیر مقیاس و توزیع‌های آماری درزه‌ها را به‌طور مستقیم در مدل‌سازی وارد کرد. در این راستا از مدل هندسی شبکه درزه‌های مجزا (DFN) برای مدل‌سازی ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود. روش شبکه شکستگی‌های مجزا، بهترین و دقیق‌ترین روش برای نمایش هندسه واقعی درزه‌های توده سنگ است. در بسیاری از مسایل تحلیل جریان با استفاده از روش DFN، دامنه‌ی مورد استفاده، دارای چند هزار تا چند صد هزار شکستگی است که وجود این تعداد شکستگی باعث پیچیدگی و افزایش شدید زمان محاسبات می‌شود. لذا به ناچار از طریق کاهش اندازه مدل تا حد ممکن، از زمان محاسبات کاسته شده است. علاوه بر این، در این پژوهش با هدف افزایش دقت در نتایج و دوری از برخی ساده‌سازی‌های اثرگذار بر نتایج، مدل‌های عددی در حالت توامان هیدرومکانیک تحلیل شده است.

برای انجام این تحقیق، در ابتدا سابقه‌ی علمی موضوع مدنظر بررسی شده و اطلاعات پایه و ضروری گردآوری شده است. در مرحله‌ی بعد ویژگی‌های توده سنگ از جمله بازشدگی و زبری، فاصله‌داری، جهت‌داری، طول اثر (پایایی) و شدت و ویژگی‌های دوغاب مانند مقدار مدول بالک، ویسکوزیته و فشار دوغاب و تاثیر آن‌ها بر روی نرخ جریان و میزان نفوذ دوغاب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سپس با تمرکز بر مورد مطالعاتی سد رودبار لرستان، مدل شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) از ویژگی‌های هندسی توده سنگ با استفاده از تحلیل آماری اطلاعات دریافتی، تهیه شده است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار 3DEC، مدل عددی سه‌بعدی از نفوذ دوغاب به داخل توده سنگ تهیه و پیش‌بینی میزان نفوذ دوغاب پیش‌بینی می‌شود. اعتبار این مدل بر اساس نتایج آزمایش لوژان سنجیده شده و در نهایت تحلیل حساسیت و بررسی تاثیر دوغاب موثر ویسکوزیته دوغاب و بازشدگی درزه‌ها بر قابلیت تزریق توده سنگ صورت گرفته است.

۶-۱ ساختار پژوهش

مطالبی که در این پایان‌نامه ارائه شده به شرح زیر است:

- ✓ در فصل اول کلیات این تحقیق شامل مقدمه، هدف، ضرورت، روش تحقیق و خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌گرفته در خصوص بررسی قابلیت تزریق توده سنگ درزه‌دار ارائه شده است.
- ✓ در فصل دوم فرضیات و عوامل هندسی تولید شبکه شکستگی مجزا و نیز برخی توابع توزیع آماری و توضیحات و مقدمه‌ای از تزریق توده سنگ ارائه شده است.
- ✓ در فصل سوم پیشینه‌ای از مطالعات صورت گرفته شده به روش‌های عددی و تحلیلی مرتبط با موضوع مورد بحث به تفصیل بیان شده است.
- ✓ در فصل چهارم به توضیح مورد مطالعاتی پرداخته شده است.
- ✓ در فصل پنجم روند تعیین توابع توزیع آماری ویژگی‌های هندسی درزه‌ها به‌وسیله نرم-افزارهای آماری، نحوه ساخت مدل‌های DFN و مدل مکعبی متناظر آن‌ها به‌وسیله نرم‌افزار 3DEC ارائه شده است. مدل‌های عددی تهیه شده برای شبیه‌سازی عملیات تزریق، از طریق آزمایش‌های لوژان انجام شده بر روی توده سنگ مورد مطالعاتی، اعتبارسنجی می‌شود. در نهایت به محاسبه میزان نفوذ دوغاب با استفاده از نرم‌افزار 3DEC پرداخته می‌شود.
- ✓ در فصل ششم خلاصه‌ای از نتایج پایان‌نامه آورده شده است و پیشنهادهایی در مورد مباحثی که می‌تواند در راستای تکمیل و جبران کاستی‌های این پژوهش انجام شود، ارائه می‌شود.

فصل دوم

مبانی نظری

۱-۲ مقدمه

اولین دلیل برای آببندی یک ساختار زیرزمینی، جلوگیری از طغیان و هجوم آب است (بیرانوند، ۱۳۹۲). عملیات تزریق در محیط سنگی فرآیندی است که طی آن سیال تزریق به درون درزه‌های سنگ نفوذ کرده و موجب به‌سازی و آب‌بند نمودن ساختگاه سد و تونل خواهد شد. با پیش‌بینی عوامل عملیاتی، رفتاری و هندسی تزریق با استفاده از یک روش بهینه و دقیق عددی در قالب یک نرم‌افزار کامپیوتری به‌جای روش‌های تجربی می‌توان هزینه و زمان کل پروژه را کاهش داد. تزریق-پذیری توده سنگ به عوامل گوناگونی وابسته است که می‌توان آن‌ها را به سه دسته عوامل زمین-شناسی، عوامل فنی و ویژگی‌ها دوغاب تزریق تقسیم نمود. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در احداث یک سد مورد بررسی قرار می‌گیرد، آببندی پی سد توسط عملیات تزریق برای جلوگیری از نفوذ آب از پی سد می‌باشد. کنترل نشت آب از سد هم به لحاظ اقتصادی و هم از نظر پایداری سد از اهمیت زیادی برخوردار است (Gustafson et al., 2005).

۲-۲ ویژگی‌های هندسی شکستگی‌های موثر در عبور جریان سیال

از مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها که در عبور جریان سیال موثر هستند می‌توان به جهت‌داری، اندازه، فاصله‌داری، شدت، پرشدگی، بازشدگی و موقعیت فضایی اشاره نمود.

۱-۲-۲ جهت‌داری

جهت‌داری یک شکستگی می‌تواند توسط امتداد و زاویه شیب یا جهت شیب نشان داده شود. به دلیل مشکل بودن محاسبه‌ی جهت‌داری کل شکستگی‌ها، جهت‌داری شکستگی‌ها در محل‌هایی چون رخنمون‌ها، گمانه‌ها و ترانسه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در عمل، کل شکستگی‌های یک دسته درزه

موازی هم فرض می‌شوند در حالی که در واقع چنین نیست. مدل‌های آماری مشخصات جهت‌داری شکستگی‌های توده سنگ را ارایه می‌دهد.

مدل‌های آماری که تناسب خوبی با داده‌های جهت‌داری دارند عبارتند از: توزیع فیشر، توزیع بینگهام و توزیع نرمال. عمدتاً از تابع فیشر برای جهت‌داری ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود. تابع توزیع چگالی احتمال فیشر به صورت رابطه ۱-۲ است (Chen and tonon,2012):

$$F(\theta) = \frac{K \sin \theta E^{K \cos \theta}}{E^K - E^{-K}} \quad (1-2)$$

θ زاویه انحراف از میانگین پارامتر جهت‌داری یا اختلاف زاویه عمود بر یک شکستگی و مقدار واقعی آن است. K ثابت فیشر و مقیاسی از درجه پراکندگی است.

فیشر ثابت K را به صورت رابطه ۲-۲ تخمین زده است (Chen and tonon,2012):

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

در رابطه بالا r_n بردار برآیند n تعداد بردارهای نرمال یکه و N تعداد شکستگی‌ها در نمونه است (Chen and tonon,2012).

۲-۲-۲ اندازه شکستگی‌ها

اندازه‌گیری دقیق اندازه شکستگی‌ها بسیار مشکل است، زیرا در حالتی که توده سنگ کاملاً عاری از هر نوع پوششی است، اندازه‌گیری طول اثر ممکن می‌شود که این موضوع با طبیعت سنگ سازگار نیست. شکل شکستگی‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای، بیضی، مربع، مستطیل و چندضلعی در نظر گرفته می‌شوند. برای اندازه شکستگی از طول اثر که فصل مشترک شکستگی و رخنمون است،

استفاده می‌شود. توزیع‌های آماری مهم مورد استفاده در خصوص اندازه شکستگی‌ها در ادامه توصیف شده‌اند (Chen and tonon,2012):

۱-۲-۲-۲ توزیع نرمال^۱

این توزیع که به آن توزیع گاوس نیز می‌گویند به وسیله دو پارامتر میانگین (μ) و واریانس (σ^2) تعریف می‌شود. نمودار این توزیع یک منحنی قوسی و زنگوله‌ای مانند و متناسب با میانگین است. تابع چگالی احتمال (pdf) توزیع نرمال به صورت ۳-۲ است:

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۳-۲)$$

تابع چگالی تجمعی (cdf) توزیع نرمال به صورت رابطه ۴-۲ تعریف می‌شود:

$$P(X) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (۴-۲)$$

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

تابع چگالی احتمال توزیع نمایی منفی به صورت رابطه ۵-۲ است:

$$P(x, \lambda) = y = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (۵-۲)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع نمایی منفی نیز به شکل رابطه ۶-۲ بیان می‌شود:

¹ normal

² Negative exponential

³ exponent

$$P(x, \lambda) = Y = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (6-2)$$

اگر از دو طرف رابطه تابع چگالی احتمال لگاریتم گرفته شود، رابطه ۷-۲ به دست می آید:

$$\log(f(X)) = \log(y) = \log(\lambda) - \lambda X, \text{ for } X \geq 0 \quad (7-2)$$

در صورتی که $\log(y)$ و x در سیستم مختصات خطی و x و y در سیستم مختصات

لگاریتمی_خطی رسم شود، خطی با شیب منفی که نشان دهنده این توزیع است، به دست می آید.

۳-۲-۲-۲ توزیع یکنواخت^۱

تابع چگالی احتمال توزیع یکنواخت به صورت رابطه ۸-۲ است:

$$P(X) = y = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{for } (a \leq x \leq b) \\ 0, & \text{for } (x < a) \text{ or } (x > b) \end{cases} \quad (8-2)$$

و همچنین تابع توزیع تجمعی آن به صورت رابطه ۹-۲ است:

$$P(X) = Y = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (9-2)$$

¹ uniform

۴-۲-۲-۲ توزیع گاما^۱

تابع چگالی احتمال این توزیع نیز به صورت رابطه ۱۰-۲ نوشته می‌شود:

$$f(x, k; \theta) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta \Gamma(k)}, \text{ for } (x > 0) \text{ and } (k, \theta > 0) \quad (10-2)$$

در این توزیع، $\Gamma(z)$ تابع گاما است و به صورت رابطه ۱۱-۲ تعریف می‌شود:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (11-2)$$

و تابع چگالی تجمعی توزیع گاما از رابطه ۱۲-۲ به دست می‌آید:

$$f(x; k; \theta) = \int_0^x f(u; k; \theta) du = \frac{\gamma(k, x/\theta)}{\Gamma(k)} \quad (12-2)$$

در اینجا (z, x) تابع گامای ناقص کمتر (lower incomplete gamma function) که به صورت

رابطه ۱۳-۲ است:

$$\gamma(z, x) = \int_0^x t^{z-1} e^{-t} dt \quad (13-2)$$

۵-۲-۲-۲ توزیع لاگ نرمال

این توزیع، توزیع احتمال یک دنباله از هر متغیر تصادفی است که لگاریتم آن به صورت نرمال

¹ Gamma

توزیع شده است. زمانی توزیع لاگ نرمال صادق است که اگر Y یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال باشد، $X = \exp(Y)$. همچنین اگر X به صورت لاگ نرمال توزیع شده باشد، $\log(X)$ به صورت نرمال توزیع می شود و پارامتر میانگین (μ) و واریانس (σ^2) است. تابع چگالی احتمال توزیع لاگ نرمال به صورت رابطه ۱۴-۲ است:

$$P(X) = \frac{1}{X \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(X) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14-2)$$

تابع چگالی تجمعی توزیع لاگ نرمال می تواند به صورت رابطه ۱۵-۲ نوشته شود:

$$P(X) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(X) - \mu}{2\sqrt{\sigma}} \right) \right) \quad (15-2)$$

در این رابطه erf تابع خطا در توزیع نرمال است.

۶-۲-۲-۲ توزیع قانون توانی^۱

بیشتر قانون های توان به صورت رابطه ۱۶-۲ هستند:

$$f(X) = y = aX^k \quad (16-2)$$

که a و k ثابت هستند. k توان مقیاس^۲ نامیده می شود.

از دو طرف رابطه لگاریتم گرفته می شود تا قابل فهم تر شود.

¹ Power-law

² Scaling exponent

$$\log(f(x)) = \log(y) = k \log(x) + \log(a) \quad (17-2)$$

رابطه ۱۷-۲ حالتی از رابطه خطی است.

۳-۲-۲ فاصله‌داری

در یک دسته درزه فاصله بین دو شکستگی مجاور در طول یک خط راست عمود بر شکستگی‌ها، فاصله‌داری شکستگی نامیده می‌شود. فاصله‌داری متوسط را می‌توان از رابطه ۱۸-۲ به دست آورد (Chen and tonon,2012):

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \approx \frac{L}{N} = \frac{1}{F} \quad (18-2)$$

در رابطه ۱۸-۲ S_i فاصله‌داری شکستگی‌های مجاور و N تعداد کل شکستگی‌ها و F فراوانی شکستگی‌هاست که تعداد شکستگی‌ها بر واحد طول برداشت است.

توزیع‌های معمول برای فاصله‌داری توزیع نمایی منفی، لاگ نرمال و قانون توان می‌باشد. در خصوص تابع توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری شکستگی‌ها در شوویتز و اینشتین (۱۹۹۸)، هادسون و پریست^۱ (۱۹۸۳)، پاینو^۲ (۱۹۸۵) تحقیقاتی را ارائه داده‌اند (Chen and tonon,2012).

۴-۲-۲ دانسیته شکستگی

نسبت تعداد شکستگی‌ها به طول، مجموع طول شکستگی‌ها به واحد سطح یا مجموع مساحت سطوح شکستگی‌ها به واحد حجم، به عنوان شدت شکستگی تعریف می‌شود. شدت شکستگی از رابطه

¹ Priest
² Pineau

۱۹-۲ به دست می آید (Fox et al, 2012):

$$f = \frac{N}{L} \quad (19-2)$$

در طول یک خط برداشت L ، تعداد کل شکستگی‌ها N بر آن تقسیم می‌شود و F شدت شکستگی را می‌دهد.

با تغییر روش‌های اندازه‌گیری مختلف در برداشت با توجه به بعد، شدت شکستگی تغییر می‌کند. عوامل فاصله‌داری وابستگی زیادی به رابطه بین جهت‌داری شکستگی و جهت‌داری خطی دارند، که تحلیل و تفسیر آن را مشکل می‌سازد. P_{10} متوسط فاصله‌داری، وابسته به جهت‌داری و مستقل از مقیاس است (Priest, 1993). در سال ۲۰۱۲ فکس^۱ و همکاران تعاریفی مربوط به چگالی، شدت و تخلخل با توجه به بعد نموداری تهیه کرده که در جدول ۲-۲ آمده است (Fox et al, 2012).

۵-۲-۲ پرشدگی

سیمان عبارت از یک رسوب شیمیایی است که بعد از رسوب‌گذاری فضاهای بین شکستگی‌ها را پر می‌کند. سیمانی شدن (پرشدگی) به حرکت مایعات درون رسوبات، یون‌های موجود در داخل مایعات درون حفره‌ها و نیز شرایط رسوب‌گذاری بستگی دارد. فراوان‌ترین سیمان‌های موجود در رسوبات، کربنات کلسیم و سیلیس می‌باشند. ولی سیمان‌های دیگری از قبیل دولومیت، سیدریت، هماتیت، گوتیت و لیونیت و غیره نیز در انواع رسوبات مشاهده شده است (Chen and tonon, 2012).

¹ Fox

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

بعد ساختاری							
	۳	۲	۱	۰			
اندازه- گیری‌های نقطه‌ای				P_{00}	۰	نقطه	بعد نمونه برداری
اندازه- گیری‌های خطی			P_{11} تخلخل خطی	P_{10} چگالی خطی	۱	خط برداشت و گمانه	
اندازه- گیری‌های سطحی		P_{22} تخلخل سطحی	P_{20} شدت سطحی	P_{20} چگالی سطحی	۲	رخنمون، ترانشه و دیواره تونل	
اندازه- گیری‌های حجمی	P_{33} تخلخل شکستگی	P_{32} شدت حجمی	P_{31}	P_{10} چگالی حجمی	۳	توده سنگ	
	تخلخل	شدت		چگالی			

۲-۲-۶ بازشدگی

یکی از ویژگی‌های هندسی درزه، بازشدگی است. اگر سیال تراکم‌ناپذیر، ایزوترمال، قابلیت هدایت هیدرولیکی و در کل ویژگی‌های ثابتی داشته باشد، نقل و انتقال توده سنگ تابع بازشدگی درزه است. بازشدگی در سنگ‌ها از تابع لاگ نرمال پیروی می‌کنند (Chen and tonon, 2012).

۲-۲-۷ آرایش فضایی (موقعیت) شکستگی‌ها

آرایش فضایی شکستگی‌ها را گومز و مارت^۱ به صورت زیر تعریف کرده‌اند: "چگونگی قرارگیری و وضعیت شکستگی‌ها نسبت به هم دیگر در یک فضا، جایی که هر مجموعه‌ی دسته‌درزه، مشخصات

¹ Gomez and Marrett

(مانند جهت‌داری و پرشدگی) و منشاء پیدایش یکسانی دارند".

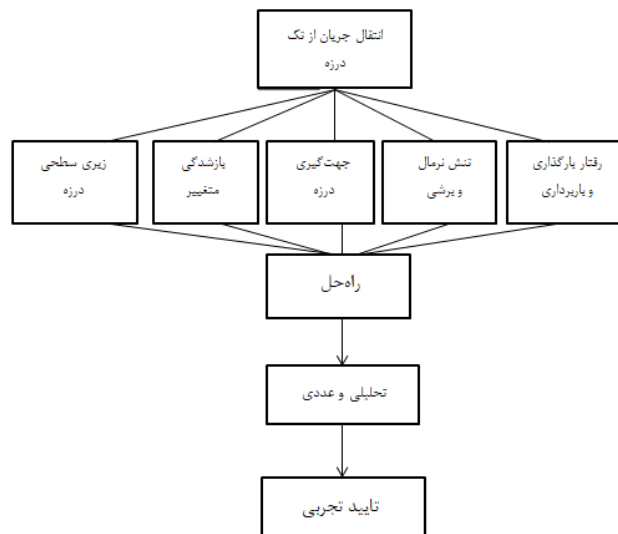
گومز و مارت تحلیل‌های متداول آرایش شکستگی‌ها در فضا، هیر^۱ و مارت تحلیل‌های طیفی آرایش شکستگی‌ها و مارت و همکاران تحلیل‌های پیوستگی آرایش شکستگی‌ها را توسعه داده‌اند (Cheen and Tonon, 2012).

به‌طور معمول در شبیه‌سازی DFN موقعیت شکستگی‌ها از پروسه پواسون پیروی می‌کند. موقعیت مرکز شکستگی‌ها به‌وسیله عددهای تصادفی بر اساس الگوریتم بازگشتی ایجاد می‌شوند (Chen and tonon, 2012).

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

شکستگی‌ها مسیر اصلی عبور جریان سیال از درون توده سنگ هستند. همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، در بررسی جریان سیال عوامل بسیاری دخیل هستند که عبارتند از: زبری سطح دیواره‌های درزه، بازشدگی درزه، سطح تماس دیواره‌های درزه، ناهمواری و پیچ و خم سطح درزه، قابلیت گذردهی سیال، سختی دیواره‌های درزه (Indraratna et al., 1999).

¹ Hare



شکل ۱-۲ الگوریتم جریان سیال در یک شکستگی منفرد (Indraratna et al, 1999)

۲-۴ رفتار هیدرولیکی در شکستگی‌های توده سنگ درزه‌دار

شکل ۲-۲ قسمتی از شبکه شکستگی دوبعدی با ۴ شاخه و ۵ گره را نشان می‌دهد. احتمال کمی وجود دارد که بیشتر از دو ناپیوستگی از یک نقطه بگذرند. عواملی که در یک تحلیل جریان باید تعیین شوند، عبارت‌اند از (Hudson and Harrison, 1997):

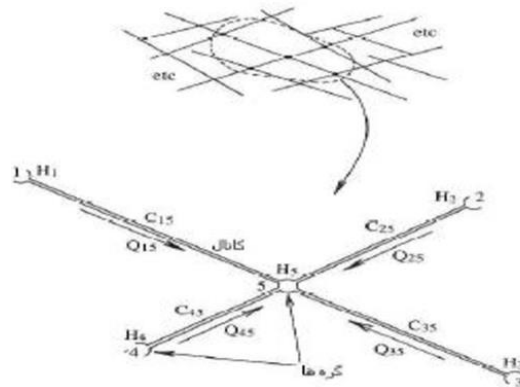
۱. H_i ارتفاع ستون آبی کل گره i

۲. Q_{ij} جریان در طول کانال پیوسته بین گره‌های i و j

۳. C_{ij} قابلیت هدایت کانال پیوسته گره‌های i و j

قابلیت هدایت هر کانال، از بازشدگی موثر دیواره‌ها با فرض یک عرض واحد عمود بر صفحه مدل از معادله ۲-۲۳ محاسبه می‌شود. اگر فرض شود که مواد اطراف درزه نفوذناپذیر، خنثی و تراکم‌ناپذیر و جریان نیز پیوسته و تراکم‌ناپذیر است و در نتیجه هیچ افزایش یا کاهش سیال در گره‌ها وجود نخواهد داشت، برای گره مورد نظر در شکل ۲-۲ رابطه ۲-۲۱ صادق است:

$$\Sigma Q = 0 \rightarrow Q_{15} + Q_{25} + Q_{35} + Q_{45} = 0 \quad (21-2)$$



شکل ۲-۲ شبکه شکستگی دو بعدی توده سنگ در تحلیل هیدرولیکی (Priest, 1993)

از طرف دیگر $Q_{ij} = C_{ij} (H_i - H_j)$ با بسط این رابطه و ساده کردن این روابط، ارتفاع هیدرولیکی مطابق رابطه ۲۲-۲ به دست می آید:

$$H_5 = \frac{C_{15}H_1 + C_{25}H_2 + C_{35}H_3 + C_{45}H_4}{C_{15} + C_{25} + C_{35} + C_{45}} \quad (22-2)$$

که رابطه کلی برای هر گره به صورت رابطه ۲۳-۲ است:

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} H_i}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (23-2)$$

برای تمام گره‌ها این رابطه صدق می کند. معادلات ارتفاع هیدرولیکی کل هر گره وابسته به ارتفاع هیدرولیکی گره‌های مجاور است. برای حل شبکه‌های بزرگ‌تر به تکنیک‌های عددی نیاز است. روش‌های حل تکراری برای شبکه‌های نسبتاً کوچک و برای شبکه‌های بزرگ‌تر روش حذفی گاوس و اشکال فاکتورگیری مناسب و جواب می دهند (Priest, 1993).

۵-۲ جریان دوغاب در توده سنگ درزه‌دار

برای اینکه یک درزه قابل تزریق باشد، دوغاب باید شرایط نفوذپذیری را برآورده سازد. بسیاری از نویسندگان گسترش دوغاب را با مدل‌های عددی و تحلیلی مورد تحلیل قرار داده‌اند. هاسلر^۱ و همکاران (۱۹۸۷) برخی مدل‌های اولیه را برای تحلیل جریان با روش‌های عددی ارائه داده‌اند. گوستافسون^۲ و استیل^۳ (۱۹۹۶) یک روش عددی برای تخمین ناحیه گسترش دوغاب در درزه‌های سنگ بر اساس مشخصات ژئومکانیکی سنگ و خصوصیات دوغاب توسعه داده‌اند. آمادی^۴ و ساواگ^۵ (۲۰۰۱) یک راه‌حل تحلیلی جریان دوغاب را ارائه دادند که به صورت سیال‌های غیرنیوتنی / بینگهام در درزه‌های سنگ عمل می‌کنند.

در هر دوی راه‌حل‌های تحلیلی و مدل‌های عددی، جریان در کانال یا دیسک با بازشدگی ثابت رخ می‌دهد. بنابراین، بازشدگی درزه یک پارامتر مهم است که باید در نظر گرفته شود. با این حال، حداقل اندازه‌گیری مستقیم بازشدگی ممکن نیست. به‌طور غیر مستقیم جریان آب با فشار مشخص را می‌توان اندازه‌گیری کرد و بازشدگی هیدرولیکی مربوطه می‌تواند توسط قانون مکعب محاسبه شود. بر طبق مطالعات زیمرمن و بادورسون^۶ در سال ۱۹۹۶ مشخص شد که بازشدگی $1/2$ تا 3 برابر بزرگتر است (Zimmerman and Bodvarsson, 1996).

ظرفیت توده سنگ آبدار^۷ را می‌توان با هدایت هیدرولیکی یا انتقال‌پذیری سنگ درزه‌دار توصیف کرد. درزه سنگ یک ساختار دو بعدی با یک بازشدگی a است که در سراسر سطح درزه تغییر می‌کند (استیل و همکاران، ۲۰۱۲). توانایی درزه برای اجازه عبور جریان آب از میان آن توسط قابلیت انتقال

¹ Hassler

² Gustafson

³ Stille

⁴ Amadei

⁵ Savage

⁶ Zimmerman and Bodvarsson

⁷ Water bearing

^۱شکستگی، T بر حسب مترمربع بر ثانیه مشخص می شود :

$$T = \left(\frac{\rho_w g a^3}{12 \mu_w} \right) \quad (24-2)$$

در رابطه ۲-۲۴ ρ_w چگالی آب (kg/m^3)، g شدت گرانش (m^2/s)، μ_w ویسکوزیته آب بر حسب Pa.s است.

قابلیت انتقال T، از آزمایش‌های هیدرولیکی گمانه تخمین زده می‌شود. گمانه‌ها در مقاطعی^۲ آزمایش می‌شوند و نتایج قابلیت انتقال مقطع (T_L) تخمین می‌زنند که در آن L طول مقطع آزمایش شده است. قابلیت انتقال گمانه‌ها و مقاطع گمانه می‌تواند با استفاده از آزمون فشار آب (WPTs) تعیین و با استفاده از فرمول موی^۳ (Moye، ۱۹۶۷) تخمین زده شود. توزیع آماری قابلیت انتقال درزه در یک گمانه بر اساس WPTs توسط گوستافسون و فرانسون در سال ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها دریافتند که قابلیت انتقال از یک گمانه در سنگ سخت درزه‌دار کریستالی، از قانون توزیع توانی پیروی می‌کند. با استفاده از قانون مکعب، معادله (۲-۲۴)، بازشدگی هیدرولیکی می‌تواند ارزیابی شود (Saeidi et al., 2013):

$$a = \sqrt[3]{\frac{12 \mu_w T}{\rho_w g}} \quad (25-2)$$

استیل و گوستافون در سال ۱۹۹۶ حداکثر نفوذ دوغاب را برای یک جریان سیال بینگهام با استفاده از تعادل نیروی برشی محاسبه کردند. آن‌ها دریافتند که در نقطه‌ی توقف کامل دوغاب در داخل شکستگی، فشار تزریق توسط تنش برشی اعمال شده از دیوارهای درزه متعادل می‌شود (شکل ۴-۵)

¹ Transmissivity

² Section

³ Moye's

(Still and Gustafson, 1996).

با فرض یک درزه تنها دارای دیوارهای موازی (شکل ۴-۵) با بازشدگی a ، نفوذ دوغاب I_{max} به صورت رابطه ۲-۲۶ تعریف می‌شود (Saeidi et al., 2013):

$$I_{max} = \frac{(P_g - P_w)}{2\tau_0} a \quad (26-2)$$

که در آن I_{max} طول نفوذ ماکزیمم در زمان نامحدود، P_g فشار کاربردی روی دوغاب، P_w فشار آب داخل درزه‌ها و τ_0 مقدار تسلیم دوغاب است. در این مطالعه به دلیل اینکه تزریق در منطقه خشک انجام می‌شود، P_w نادیده گرفته شده است. مدل گوستافسون و استیل در سال ۱۹۹۶ برای جریان‌های دوبعدی و تک‌بعدی در درزه‌های سنگ با میانگین و انحراف معیار بازشدگی‌ها در یک شبکه درزه توسعه داده شده است.

بازشدگی هیدرولیکی موثر به شدت زبری سطحی درزه، بستگی دارد. بارتون و همکاران (۱۹۸۵) یک رابطه تجربی (معادله ۲-۲۷) را برای ارتباط بازشدگی هیدرولیکی درزه و بازشدگی فیزیکی با ضریب زبری درزه (JRC) به صورت رابطه ۲-۲۷ پیشنهاد دادند (Barton et al., 1985):

$$E = \sqrt{a \times JRC^{2.5}} \quad (27-2)$$

که در آن JRC ضریب زبری درزه، E بازشدگی فیزیکی یا مکانیکی بر حسب میکرون و a بازشدگی هیدرولیکی موثر بر حسب میکرون است. شاخص JRC از ۰ تا ۲۰، توسعه داده شده توسط بارتون و کوبی^۱ (۱۹۷۷) برای توصیف مقاومت برشی درزه‌های سنگ، امروزه بسیار برای تغییر شکل نرمال و تحلیل برشی درزه‌های سنگ به کار می‌رود (Barton, 1982; Bandis et al., 1983). JRC توسط زبری سطح درزه متناظر با پروفیل بارتون تعیین می‌شود. بازشدگی درزه هیدرولیکی موثر a ، از

¹ Choubey

آزمون‌های فشار آب گمانه (WPTs) به دست می‌آیند. با جایگزینی معادله (۲۶-۲) در معادله (۲۷-۲)، معادله ۲۸-۲ به دست می‌آید:

$$I_{\max} = \frac{(P_g - P_a)}{2\tau_0} \frac{E^2}{JRC^{2.5}} \quad (28-2)$$

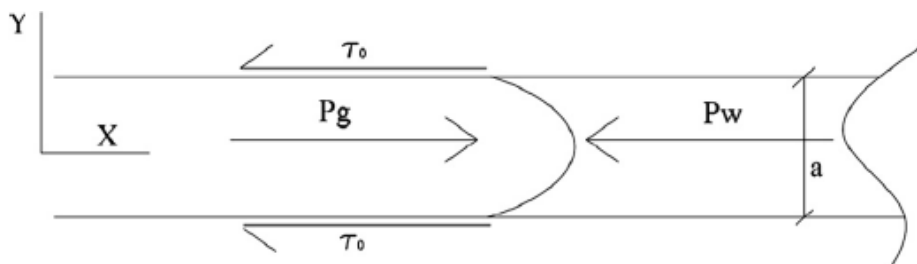
بسیاری از مطالعات قبلی نشان می‌دهد که جریان دوغاب توسط معادلات سیال بینگهام کنترل می‌شوند (هاسلر و همکاران، ۱۹۹۲؛ فرانسون، ۱۹۹۹؛ شاتل^۱ و گلین^۲، ۲۰۰۳). سیالات بینگهام می‌توانند با استفاده از ویسکوزیته و مقاومت تسلیم شبیه‌سازی شوند.

راه‌حل‌های تحلیلی برای جریان یک بعدی و دو بعدی در درزه‌های سنگ توسط گوستافسون و استیل در سال ۲۰۰۵ توسعه داده شد. رابطه ۴-۱۵ برای طول نفوذ حداکثر، نتایج واقع‌بینانه ارائه نمی‌دهد. به‌طور معمول کار تزریق بسیار زودتر خاتمه می‌یابد. بنابراین، آن‌ها زمان تزریق مشخصه t_0 را برای پمپاژ دوغاب به‌عنوان یک پارامتر کلیدی برای تزریق ماده دوغاب در نظر گرفتند که به‌صورت رابطه ۲۹-۲ بیان می‌شود (Saeidi et al., 2013):

$$t_0 = \frac{6\Delta P \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad (29-2)$$

در رابطه ۲۹-۲، Δp فشار مازاد تزریق، μ_g ویسکوزیته دوغاب و τ_0 مقاومت تسلیم دوغاب است. زمان مشخصه مقیاس زمان را برای تزریق دوغاب تعیین می‌کند.

¹ Shuttle
² Glynn



شکل ۳-۲ جریان دوغاب از میان درزه سنگ

برای یک طول نفوذ I ، در مدت زمان t ، طول نفوذ نسبی I_D و زمان تزریق نسبی t_D به ترتیب به صورت $I_D = I / I_{max}$ و $t_d = t / t_0$ تعریف می‌شود.

آن‌ها طول نفوذ نسبی را بر حسب زمان تزریق نسبی از طریق بسط سری‌ها برای جریان یک بعدی به صورت زیر محاسبه نمودند (Saeidi et al., 2013):

$$I_D = \sqrt{\left(\frac{t_D}{2(0.6+t_D)}\right)^2 + 4\left(\frac{t_D}{2(0.6+t_D)}\right) - \left(\frac{t_D}{2(0.6+t_D)}\right)} \quad (30-2)$$

۶-۲ آزمایش‌های نفوذپذیری

در این بخش دو آزمایش مهم که برای تعیین نفوذپذیری و قابلیت هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ‌ها به کار می‌رود، شامل آزمایش پمپاژ و آزمایش لوژان توصیف می‌شود.

۶-۲-۱ آزمایش پمپاژ

در آزمایش‌های پمپاژ، آب را به بیرون گمانه با نرخ کنترل شده هدایت می‌کنند و اثرات آن روی سطح تراز آب در چاه‌های پمپاژ و یا گمانه‌های شاهد اندازه‌گیری می‌کنند. وقتی که آب از یک چاه پمپ می‌شود سطح آب در اطراف چاه در پاسخ به پمپ شدن آب پایین می‌آید و یک فرورفتگی

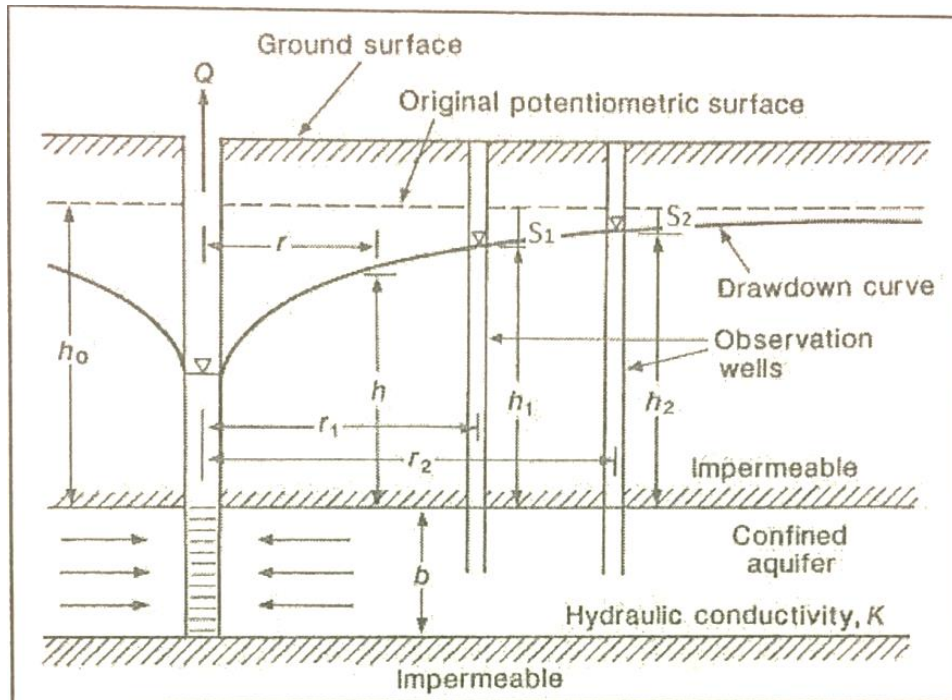
مخروطی^۱ تشکیل خواهد شد. شکل و وسعت این مخروط وابسته به نرخ پمپ شدن و نیز خصوصیات هیدرولیکی زمین است. بر این اساس آزمایش‌های پمپاژ می‌تواند جهت تخمین نفوذپذیری به کار رود. این آزمایش‌ها بسیار وقت گیر و اغلب هزینه‌بر بوده و به‌طور معمول به دلیل شرایط زمین‌شناسی و در نتیجه پیچیده بودن شرایط آب زیرزمینی به‌سادگی قابل تفسیر نیستند. اما به هر حال، بهترین راه جهت تخمین خصوصیات کلی هیدرولیکی یک سفره آب زیرزمینی به‌شمار می‌آیند. براساس مدارک موجود، تاکنون گوستافسون و فرانسون^۲ از این آزمایش‌ها در چال‌های تزریق، استفاده کرده‌اند که صرفاً مطالعات آن‌ها جنبه تحقیقاتی داشته است (Fransson, 2001).

مهم‌ترین رابطه‌ای که در ارتباط با آزمایش‌های پمپاژ وجود دارد رابطه تیم^۳ است که رابطه تعادل^۴ یا حالت پایدار^۵ نیز خوانده می‌شود. رابطه تیم برای شرایط تعادل و جریان شعاعی و افقی در یک سفره ایزوتروپ و همگن محصور که گسترش نامحدودی داشته و برای یک چاه که به‌طور کامل در این سفره فرورفته است، از رابطه ۲-۳۱ بدست می‌آید. عوامل رابطه ۲-۳۱، در شکل ۲-۴ نشان داده شده‌اند.

$$Q = AV = 2\pi r b k \frac{dh}{dr} \quad (2-31)$$

که در آن V سرعت ظاهری قانون دارسی، A مقطع جریان، r فاصله شعاعی نقطه اندازه‌گیری هد، B ضخامت سفره است.

¹ Cone of depression
² Fransson
³ Thiem
⁴ Equilibrium
⁵ Steady state



شکل ۲-۴ وضعیت جریان شعاعی در یک چاه در یک سفره محصور (Hiscock, 2005)

با مرتب‌سازی و انتگرال‌گیری از رابطه ۲-۳۱ برای شرایط مرزی در هر نقطه‌ای که در آن $h = h_w$

و $r = r_w$ باشد، رابطه ۲-۳۲ بدست می‌آید.

$$Q = \frac{2\pi kb(h - h_w)}{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} \quad (2-32)$$

کاربرد رابطه تیم مستلزم اندازه‌گیری افت هد در دو فاصله مختلف توسط دو چاه شاهد است. پس

از آن قابلیت انتقال محیط از رابطه ۲-۳۳ به دست خواهد آمد (Hiscock, 2005).

$$T = kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (2-33)$$

۲-۶-۲ آزمایش لوژان کلاسیک

این آزمایش در گروه پکر تست‌ها^۱ جای می‌گیرند. در این نوع آزمایش‌ها، محدوده مورد آزمایش توسط پکر بسته می‌شود و مانند آزمایش‌های پمپاژ معمول دهانه چال باز نیست. این آزمایش‌ها، آزمایش‌های فشار آب^۲ یا اندازه‌گیری نشت آب^۳ نیز نامیده می‌شوند (Dalmalm, 2004). اصول این آزمایش‌ها، تزریق آب به یک مقطع و اندازه‌گیری دبی و فشار این تزریق در چند پله و تحلیل داده‌های به‌دست آمده برای تخمین نفوذپذیری و بررسی رفتار و واکنش سنگ در برابر جریان و فشارهای مختلف هیدرولیکی است.

اگر در رابطه داری (رابطه ۲-۳۱) به جای ΔH ، پارامتر موثر P_{eff} وارد شود، رابطه داری به صورت روابط ۲-۳۴ و ۲-۳۵ قابل بازنویسی خواهد بود.

$$P = \gamma \cdot \Delta H \quad (۲-۳۴)$$

$$K = \frac{C \cdot Q}{P_{eff}} \quad (۲-۳۵)$$

$$C = \frac{P_w \cdot g \cdot L}{A} \quad (۲-۳۶)$$

در این روابط P_{eff} برابر ΔH یعنی افت فشار هیدرواستاتیک معادل با افت هد ΔH و Q دبی خروجی از گمانه است و P_w فشار آب و g شتاب گرانش زمین، L طول گمانه و A سطح مقطع گمانه است. به عبارت دیگر در این آزمایش فرض بر این است که مقدار فشار هیدرواستاتیک جریان در

¹ Packer tests

² Water pressure tests

³ Water loss measurement

ابتدای مسیر برابر P_{eff} و در انتهای مسیر به صفر خواهد رسید. بنابراین نسبت دبی ویژه به فشار موثر (اختلاف فشار آب مورد تزریق و آب زیرزمینی موجود در محیط) متناسب با شدت نفوذپذیری محیط خواهد بود.

آزمایش لوژان اولین بار در سال ۱۹۳۳ توسط موریس لوژان به منظور برآورد تزریق پذیری و نفوذ-پذیری سنگ‌ها ارائه شد. از مزایای اصلی آن سادگی در اجرا، اندازه‌گیری آسان پارامترها، عدم وجود محاسبات پیچیده و سادگی تفسیر نتایج آن است. این آزمون از جمله آزمون‌های تک چاهی به‌شمار آمده و برخلاف آزمایش‌های چند چاهی (مانند آزمایش‌های پمپاژ) از هزینه حفاری و آماده‌سازی بسیار کمتری برخوردار است. از مهم‌ترین معایب آن می‌توان به دقت کم و فقدان جزئیات در نتایج اشاره کرد. به‌عنوان مثال، نتایج آزمون مشخصات هیدرولیکی پر اهمیتی چون میزان بازشدگی درزه‌های هادی را ارائه نمی‌دهد.

این آزمایش معمولاً به صورت پنج متری انجام می‌شود که در بعضی مواقع به صورت سه و چهار متر نیز گرفته می‌شود. بعد از حفر چاه و رسیدن به عمق مورد نظر آزمایش، ابتدا باید مقطع با آب زلال شسته شود، سپس پکر را به اصطلاح پک کرده و این‌گونه گمانه آماده آزمایش می‌باشد. پکر یا از نوع مکانیکی است که با فشار هیدرولیک دستگاه حفاری انجام می‌گردد و یا از پکر پنوماتیکی که با فشار آب یا انتقال هوا با شلنگ پلاستیکی (نایلکس) پکر انجام می‌شود. سپس همانطور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، کنتوری که قبلاً کالیبره شده به‌روی مسیر آب که می‌بایست آب زلال باشد بسته و همچنین یک عدد مانومتر (گیج فشار) جهت کنترل فشار مقطع به‌روی مسیر بسته می‌شود. این آزمایش معمولاً در ۵ پله صورت می‌گیرد. ابتدا حدود ۵ دقیقه تحت فشار بسیار کم و نزدیک به صفر، آب به درون گمانه تزریق می‌شود. هدف از این کار شستشوی سطح مقطع گمانه و پر نمودن آب در گمانه است. پس از طی این مرحله با گشودن بیشتر شیر تزریق، به آرامی مرحله اول پله اول آغاز

می‌شود که با باز کردن بیشتر شیر مقدار فشار موردنظر در پله اول کسب می‌گردد. این فشار در تمام مرحله اول حفظ می‌شود. هر مرحله از هر پله حدود ۵ دقیقه طول خواهد کشید و مقدار دبی آب در این ۵ دقیقه محاسبه می‌گردد. پس از طی این مرحله، مراحل دوم و سوم پله اول هر یک به میزان ۵ دقیقه با همین روال تحت فشار مشخص و موردنظر در پله اول انجام می‌شود. پارامتر دبی ویژه در هر مرحله، از تقسیم حجم آب تزریق شده بر حاصل ضرب طول مدت اجرای مرحله در طول مقطع به دست خواهد آمد. شرط اتمام یک پله کاهش اختلاف دبی ویژه در دو مرحله متوالی انتهایی پله به کمتر از مقدار ۱۰ درصد است (معمولا هر پله در ۳ مرحله کامل می‌گردد). از این رو ممکن است در بعضی موارد به مراحل و زمان توقف بیشتری در هر پله نیاز باشد.

سایر پله‌های آزمون لوژان همچون پله اول با تنظیم فشار مورد نظر و ثبت دبی ویژه در مراحل آن پله صورت می‌گیرد. نحوه اعمال فشار به صورت رفت و برگشتی است. در این حالت فشار مانومتری از صفر آغاز شده و به صورت پلکانی طی سه پله تا مقدار حداکثر افزایش می‌یابد. پس از طی پله حداکثر، فشار مجدداً به صورت پلکانی تا مقدار حداکثر تنظیم می‌شود (کربلا، ۱۳۸۸). آزمایش لوژان معمولاً ۷۵ دقیقه به طول می‌انجامد (۵ پله، هر پله سه مرحله ۵ دقیقه‌ای). محققین مختلف در ارتباط با نحوه‌ی تعیین فشار حداکثر مجاز، ملاک‌ها و معیارهای متفاوتی را ارائه داده‌اند که اکثر قریب به اتفاق آن‌ها از جمله لوژان^۱، هولسبی^۲ و اورت^۳ فشار حداکثر ۱ مگاپاسکال (۱۰ بار) را مجاز دانسته و تاکید می‌کنند که در اکثر موارد فشارهای بالاتر از این مقدار موجب شکست هیدرولیکی خواهد شد (Houlsby, 1990) و (Ewert, 1998). مقدار فشار حداکثر و رژیم فشار اعمالی در این آزمایش با توجه به تجربه افراد و شرایط محل تعیین می‌گردد و فشار حداکثر ۱ مگا پاسکال در موارد معمول خیلی بالاتر از فشار حداکثر در آزمون لوژان است. هر چند در مواردی در آزمایش‌های زیرزمینی فشار بالاتر

¹ Lugeon

² Houlsby

³ Ewert

از آن نیز استفاده می‌گردد (Ewert, 1998). نحوه‌ی عملکرد آزمایش لوژان در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

هنگام ارزیابی نتایج باید دقت کرد که فشار واقعی در مقطع با لحاظ کردن اختلاف ارتفاع بین مانومتر و تراز آب زیرزمینی (یا وسط مقطع مورد آزمایش در نقاطی که آب زیر زمینی وجود نداشته باشد) به دست می‌آید از این‌رو فشار در مرکز مقطع از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$P = P_m + (H_1 - H_2) / 10 \quad (۳۷-۲)$$

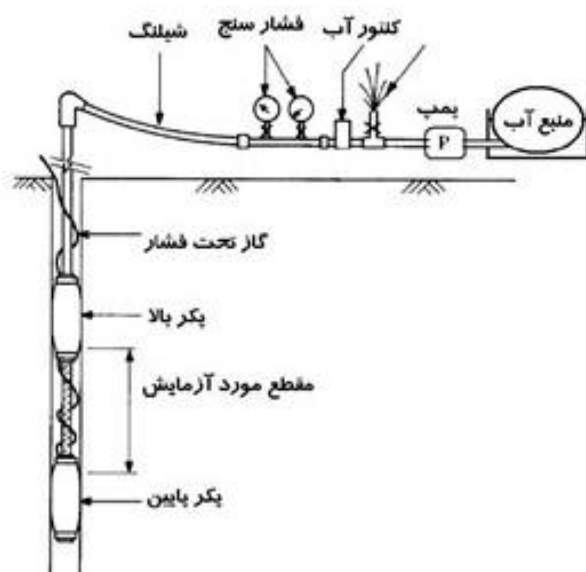
که در این فرمول ۳۷-۲ P فشار در مرکز مقطع مورد آزمایش می‌باشد، P_m فشار قرائت شده روی مانومتر، H₁ تراز مانومتر، H₂ تراز آب زیرزمینی (یا وسط مقطع مورد آزمایش) است. سپس با استفاده از فرمول زیر مقدار لوژان به دست می‌آید:

$$N = 10Q / PLt \quad (۳۸-۲)$$

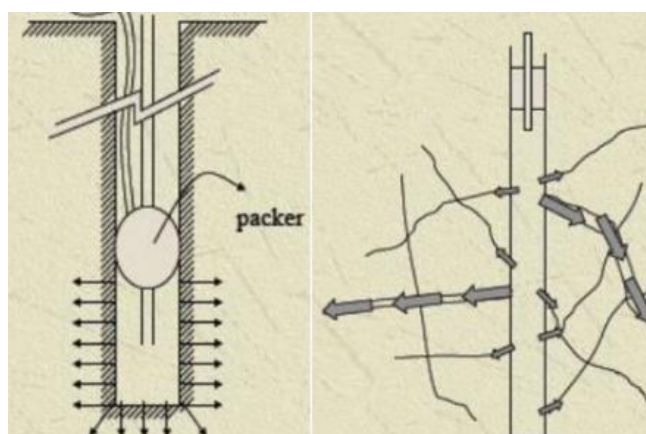
که در این فرمول ۳۸-۲، Q جریان آب در مقطع آزمایش بر حسب لیتر در دقیقه می‌باشد، L طول قطعه آزمایش به متر، t زمانی که در آن دبی Q جریان داشته است بر حسب دقیقه و P فشار آزمایش است (Nonveiller, 1996).

در این روش ابتدا میزان آب‌خوری توده تحت یک فشار ثابت اندازه‌گیری می‌شود و سپس با تغییر فشار آب منحنی تغییرات خوردند آب در برابر فشار آب ترسیم می‌شود. از تفسیر این نمودار عدد لوژان به دست می‌آید.

عدد لوژان در واقع نماد غیر مستقیم نفوذپذیری توده‌های سنگ است و طبق تعریف یک واحد لوژان برابر نفوذپذیری توده سنگی است که از یک متر طول گمانه حفاری شده در آن، تحت فشار ۱۰ بار، یک لیتر در دقیقه آب عبور کند.



شکل ۲-۵ شکل شماتیک از نحوه‌ی جای‌گذاری تجهیزات آزمایش لوژان (Nonveiller, 1996)



شکل ۲-۶ نحوه‌ی عملکرد آزمایش لوژان (Nonveiller, 1996)

۲-۶-۳ عدد لوژان

عدد لوژان از تقسیم دبی ویژه مقطع مورد آزمایش، در پله i ام بر فشار پله i ام به دست می‌آید. همان‌گونه که اشاره شد این عدد با نفوذپذیری سنگ رابطه مستقیم دارد و در واقع میزان نفوذپذیری سنگ در مبنای لوژان را نشان می‌دهد. سنگی که دارای نفوذپذیری ۱ در مبنای لوژان باشد، قابلیت جذب یک لیتر در دقیقه آب را در هر متر از طول خود تحت فشار ۱ مگاپاسکال داراست. اما، مقدار لوژان در هر پله، در یک مقطع، ممکن است متفاوت باشد. به منظور رفع این مشکل، یک عدد، از میان

اعداد لوژان به دست آمده از هر پله آزمایش در یک مقطع، مطابق روش ارایه شده توسط هولسبی انتخاب می‌گردد. جدول ۲-۳ روش تعیین عدد لوژان بر اساس مقادیر لوژان و الگوی تغییرات آن‌ها در پله‌های آزمون فشار آب را ارایه می‌دهد (کربلا، ۱۳۸۸).

جدول ۲-۳ روش تعیین عدد لوژان بر اساس مقادیر لوژان و الگوی تغییرات آن‌ها در پله‌های آزمون فشار آب (کربلا، ۱۳۸۸)

نوع رفتار	پله	فشار موثر	الگوی مقادیر لوژان	عدد لوژان، N
پایان یک‌نواخت	۱		IO	متوسط مقادیر تمامی لوژان
	۲		IO	
	۳		IO	
	۴		IO	
	۵		IO	
پایان آشفته	۱			کمترین مقدار لوژان
	۲			
	۳		IO	
	۴			
	۵			
اتساع	۱			بیشترین مقدار لوژان
	۲			
	۳		IO	
	۴			
	۵			
آب‌نشستی	۱			آخرین مقدار لوژان
	۲			
	۳			
	۴			
	۵		IO	
آب شکست	۱		IO	متوسط تمامی مقادیر لوژان بجز فشار شکست
	۲		IO	
	۳		IO	
	۴		IO	
	۵		IO	
انسداد	۱			آخرین مقدار لوژان
	۲			
	۳			
	۴			
	۵		IO	

IO: پله مورد نظر برای انتخاب عدد لوژان

۷-۲ روش‌های تزریق

پدیده تزریق، به شکل امروزی آن، بیش از ۲۰۰ سال قدمت دارد که در مقایسه با مهندسی عمران و معدن عمر کوتاهی دارد. ایده تزریق را یک مهندس عمران فرانسوی بنام کارلوس بریگنی^۱ به وجود آورد که در اوایل سال ۱۸۰۰ برای تعمیر پی یک‌بند در بندر دیپه^۲ که برای جلوگیری از ورود آب به ساحل بر اثر جزر و مد ساخته شده بود و بر اثر فرسایش از نظر ایمنی به خطر افتاده بود، از تزریق رس به داخل گمانه‌هایی به فاصله یک متر از یکدیگر، به کمک پمپ ضربه‌ای استفاده کرد.

تزریق روشی است که به علت طبیعت نامنظم و تغییرپذیری محیط، نمی‌توان برای همه‌جا یکسان در نظر گرفت. انتخاب روش به شرایط محلی سنگ بستگی دارد. مراحل تزریق به شرح ذیل است: حفاری گمانه با قطر مناسب و عمق‌های پیش‌بینی‌شده، تهیه و توزین مواد به نسبت‌های مختلف و مخلوط نمودن آن‌ها و تهیه محلول تزریق انتخابی، تزریق ماده در مقاطعی از گمانه و در نتیجه پر نمودن شکاف‌ها و شکستگی‌ها یا خلل و فرج.

در طرح و اجرای تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، معمولاً روش‌های مختلف تزریق زیر به کار می‌روند. در ادامه این روش‌ها توضیح داده می‌شود.

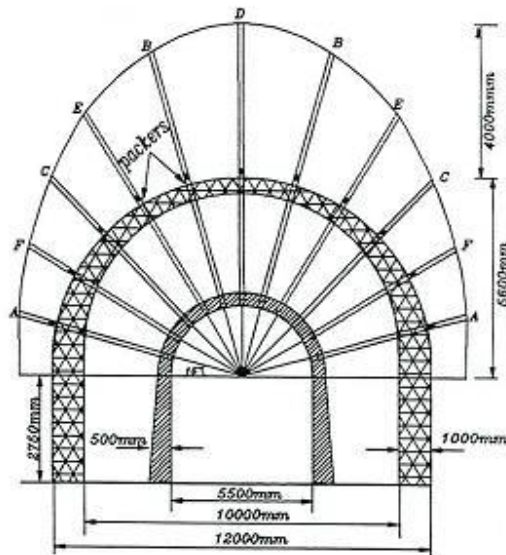
۱-۷-۲ تزریق پرده‌ای

از تزریق پرده‌ای به‌عنوان یک پرده و یا دیواره غیرقابل نفوذ در مقابل مسیر آب‌های زیرزمینی استفاده می‌گردد. این‌گونه تزریق کاری جهت کاهش قابلیت نفوذپذیری خاک‌های اطراف تونل و نیز به‌عنوان دورکننده مسیر حرکت آب‌ها در زیر سدها و پی‌ها و در نتیجه منتهی نمودن آن‌ها به لایه‌های غیرقابل نفوذ عمیق و یا حتی الامکان به لایه‌هایی با قابلیت نفوذپذیری کم خواهد شد. به-

^۱ Charles Berigny

^۲ Dieppe

کارگیری تزریق پرده‌ای برای تونل به علت ممانعت از نفوذ آب، کمک بزرگی به طرح ایزولاسیون تونل ها می‌کند. طرح تعیین فواصل بین گمانه های تزریقی در تزریق پرده‌ای بدین صورت است که گمانه‌ها طوری در امتداد یک خط قرار می‌گیرند که محور آن‌ها یک پرده را تشکیل می‌دهند. معمولاً، بر حسب نوع و بزرگی پروژه، هر تزریق پرده‌ای شامل گمانه‌هایی در چند ردیف به موازات هم است که می‌توانند دارای عمق‌های مختلف باشند. فاصله بین هر دو گمانه در یک ردیف بر حسب سازندهای زمین ساختی و قابلیت نفوذپذیری متفاوت خواهد بود. شکل ۷-۲ نمایی از یک تزریق پرده‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲ نمایی از تزریق پرده‌ای در تونل (Raymond, 1995)

۲-۷-۲ تزریق ناحیه‌ای یا پوششی

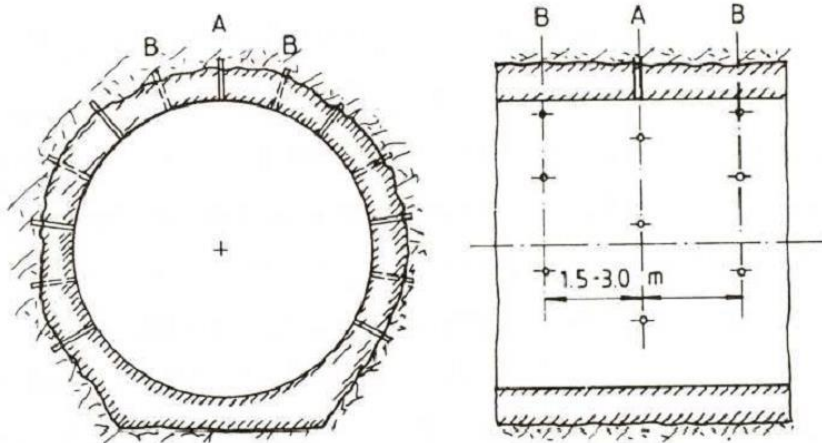
در این نوع فرآیند تزریق که گاهی تزریق استحکامی نیز گفته می‌شود، از چال‌ها کم عمق به منظور افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری سنگ شکسته شده استفاده می‌شود. از این تزریق ممکن است به صورت کلاhek و پوشش دوغاب قبل از تزریق پرده‌ای در ناحیه‌های با فشار بیشتر و یا تحکیم خلل

و فرج و شکستگی‌های سنگ درون گیر تونل و سازه‌های زیرزمینی استفاده شود (Houlsby, 1990).

۲-۷-۳ تزریق تماسی

تزریق تماسی عبارت است از فرآیند پر نمودن شکاف بین سازه و شالوده آن که این شکاف می‌تواند در سطح شالوده یک سد بتنی وزنی یا یک سد قوسی و یا بین پوشش بتنی تونل و سنگ‌های دربرگیرنده آن باشد. هدف از انجام این نوع تزریق برداشتن فاصله بین سازه بتنی و سنگ‌های اطراف آن است. در تزریق تماسی درزه‌هایی از سنگ که در ضخامت بین ۰/۵ تا یک متر وجود دارند، مدنظر هستند (شکل ۲-۸).

محدوده عرض درز و شکاف و فضاهایی که در تزریق تماسی مورد تزریق واقع می‌شود در حدود چند دهم میلیمتر تا ۱۰ سانتیمتر و یا بیشتر است (Houlsby, 1990).

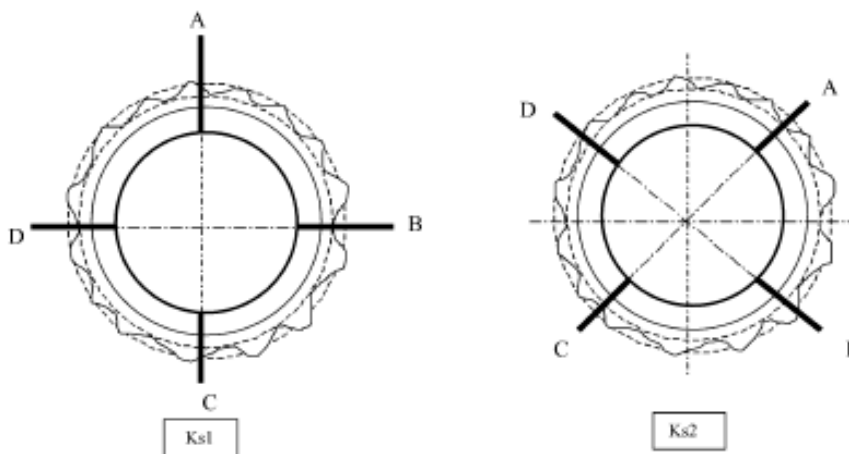


شکل ۲-۸ گمانه‌های تزریق برای تزریق تماسی پوشش تونل‌ها (Houlsby, 1990)

۲-۷-۴ تزریق تحکیمی

هدف اصلی این تزریق کاهش تغییر شکل پذیری توده سنگ است. همانطور که در شکل ۲-۹ نشان

داده شده است، گمانه‌های تزریق در شبکه‌ای با فواصل مساوی طراحی می‌شوند و عمق گمانه‌های تزریق در تزریق تحکیمی به ویژگی‌ها سنگ، ابعاد سازه و فشاری که به وسیله سازه به آن وارد می‌شود، بستگی دارد. در اکثر اوقات مواد داخل درزه‌ها را تخلیه می‌نمایند چون مواد تزریقی در درزه‌ها بهتر نفوذ داشته و تاثیر آن روی تغییر شکل‌پذیری به صورت موضعی خواهد بود.

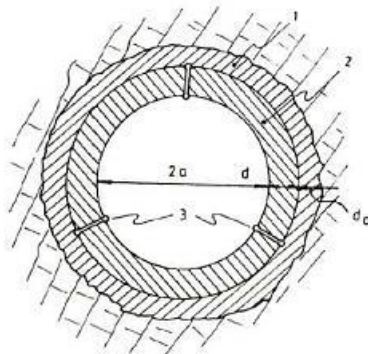


شکل ۲-۹ الگوی تزریق تحکیمی تونل (Raymond, 1995)

۲-۷-۵ تزریق پیش‌تنیدگی

ترک‌های کششی در بتن پوششی تونل‌ها و شفت‌های تحت فشار به وجود می‌آید، البته این ترک‌ها در سنگ‌های سالم و تونل‌هایی که تحت فشار کمی هستند، می‌توانند ناچیز باشند. مفهوم پیش-تنیدگی بدین شرح است که با اجرای این نوع تزریق نیروهای خارجی با توزیع یکنواخت از قسمت بیرونی به پوشش وارد می‌آیند. همانند تزریق تماسی، تزریق پیش‌تنیدگی نیز فضای بین پوشش سازه و سنگ در برگیرنده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در صورتیکه برخلاف تزریق تماسی، تزریق پیش-تنیدگی به طور منظم و با تقارن هندسی در اطراف محیط شفت یا تونل اعمال خواهد شد. در این حالت، محلول تزریق، تحت فشار زیاد، به داخل فضایی که به طور گسترده بوجود آید، تزریق می‌گردد

(Raymond,1995). نمایی از تزریق پیش‌تنیدگی تونل در شکل ۲-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۰ تزریق پیش‌تنیدگی: ۱-لایه بتن با سطح صاف ۲-پوشش بتنی (Raymond,1995)

۲-۷-۶ تزریق تراکمی

هدف از این نوع تزریق پر کردن غارهای مصنوعی پدید آمده در مجاور لوله تزریق است. نمونه‌ای از کاربرد این نوع تزریق در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. تزریق تراکمی ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهد، ولی ناحیه تزریق پیوسته‌ای پدید نمی‌آید.

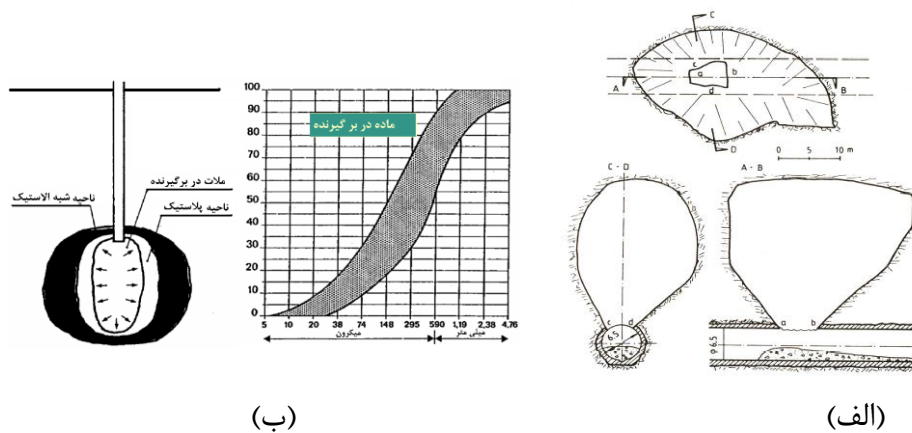
در این فرآیند اختلاط خاک و محلول بدون هیچ‌گونه تراکمی انجام می‌شود. نرخ پمپاژ محلول تزریق حدود ۲ تا ۲۰ مگاپاسکال و به‌طور متوسط ۵ مگاپاسکال می‌باشد. تاثیراتی که این روش دارد عبارتند از: بالا بردن سازه‌ها^۱، کنترل نشست‌های سطحی زمین از طریق لوله‌های جاگذاری شده برای تزریق، تقویت و سفت کردن توده خاک، المان‌های سازه‌ای^۲.

۲-۷-۷ تزریق فواره‌ای^۳

این نوع تزریق برای آب‌بندی و پایدارسازی خاک و سنگ به‌کار می‌رود. در این روش، ماده میزبان

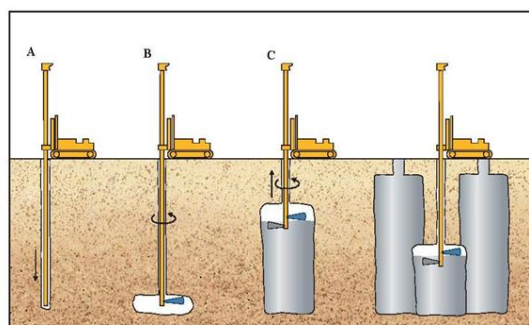
¹ Structure lifting
² Structural elements
³ Jet grouting

به وسیله آب‌فشانی یا محلول تزریق‌فشانی با فشار ۶۰ مگاپاسکال سست می‌شود و به طور جزئی فرسایش می‌یابد. تزریق فواره‌ای را نمی‌توان یک روش تزریق عادی دانست، بلکه روش آمیزش برجا^۱ برای بهبود خاک و سنگ است. با توجه به پیشرفت‌ها و تلاش‌های انجام گرفته در زمینه اصلاح روش‌های تزریق فواره‌ای، سه روش جهت اجرای این عملیات وجود دارند که این روش‌ها در تعداد و ترتیب قرارگیری نازل‌ها و شعاع موثر آن‌ها اختلاف دارند. شماتیکی از مراحل انجام عملیات تزریق فواره‌ای در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱) ریزش سقف یک تونل که نیاز به تزریق تراکمی دارد

(ب) نمودار دانه‌بندی مواد تشکیل دهنده تزریق تراکمی (Raymond, 1995)



شکل ۲-۱۲) مراحل انجام عملیات تزریق جت (Raymond, 1995)

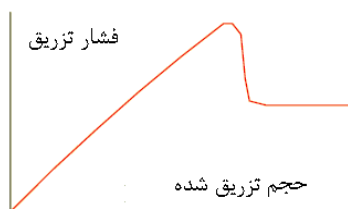
¹ In-situ Mixing

۲-۷-۸ تزریق جابجایی یا شکست یا ترک

منظور پرکردن حفره‌ها، درزه‌های طبیعی یا مصنوعی همراه با تغییر آشکار در ساختار فضاهای خالی است. افزون بر فضاهای موجود، فضاهای جدیدی به وسیله‌ی فشار هیدرولیکی مواد تزریق پدید می‌آیند و سپس پر می‌شوند. تزریق جابجایی برای آب‌بندی و پایدارسازی سنگ و خاک به کار می‌رود.

شرایط مناسب برای کاربرد تزریق جابجایی، معمولاً تزریق‌پذیری چشم‌گیر همراه با درزه‌های نه چندان پهن است. به‌طور کلی اگر نوع سد (قوسی نازک یا سنگریزه‌ای با پوشش سطحی) سبب ایجاد فاصله‌ای کوتاه میان بالادست و پایین دست شود و تراز بالای مخزن شیب هیدرولیکی زیادی را ایجاد کند، تزریق نفوذی ممکن است به تنهایی کافی نباشد؛ زیرا بسیاری از درزه‌ها و حفره‌ها دسترس ناپذیر و تزریق نشده باقی خواهند ماند و تراوایی پس از تزریق همچنان بالا خواهد بود. در اینجا تزریق جابجایی ممکن است برای باز کردن فضاهایی که قابل دسترس نیستند، بدون اینکه فاصله چال‌ها از هم بسیار کم شود، مناسب باشد. در این صورت، هم در هزینه‌های حفاری صرفه‌جویی خواهد شد و هم خطر دوباره ناپایدار و تراوا شدن سنگ کاهش می‌یابد.

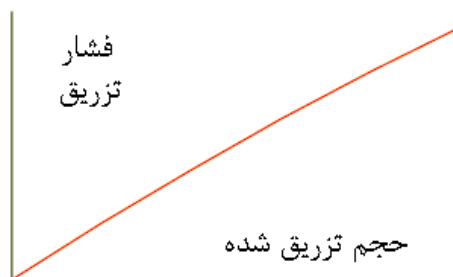
در این روش فشار تزریق نسبت به حجم تزریق تا یک حجم معینی بصورت خطی تغییر می‌کند و با افزایش حجم تزریق، فشار تزریق به مقدار ماندگار خود می‌رسد (شکل ۲-۱۳). کیفیت انجام کار به کنترل اطلاعات و نتایج عملیات قبلی بستگی دارد.



شکل ۲-۱۳ رابطه فشار و حجم تزریق در عملیات تزریق شکست هیدرولیکی (Raymond, 1995)

۲-۷-۹ تزریق نفوذی یا پرکردنی

منظور از تزریق نفوذی، پرکردن درزه‌ها، حفره‌ها و غارهای موجود بدون تغییر آشکار در ساختار فضاهای خالی است. این نوع تزریق برای آب‌بندی و پایدارسازی سنگ و خاک به کار می‌رود. در تزریق نفوذی، محلول تزریق با فشار، وارد حفره‌ها و فضاهای خالی موجود در توده‌خاک و سنگ شده و بدین ترتیب باعث کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل می‌شود. رابطه فشار تزریق و حجم تزریق شده در کل عملیات تزریق نفوذی خطی است (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴ رابطه فشار و حجم تزریق در تزریق نفوذی (Raymond, 1995)

۲-۸ عوامل موثر بر تزریق

توده سنگ شامل سنگ بکر و درزه‌ها است. سنگ بکر غیر هادی است و فقط سیستم درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها هستند که هادی آب و سیال هستند. مهم‌ترین خصوصیات ناپیوستگی‌ها که بر عملیات تزریق تأثیر می‌گذارند، عبارتند از:

- ۱- بازشدگی: مقدار بازشدگی، برای سطوح مجاور موازی و مسطح ثابت است، برای سطوح غیر موازی، اما مسطح مجاور یک مقدار خطی متفاوت برای سطوح مجاور خشن کاملاً متغیر خواهد بود.
- ۲- جهت‌گیری: جهت‌شیب و زاویه شیب برای یک ناپیوستگی مسطح منحصر به فرد است.

- ۳- فاصله‌داری / فراوانی: فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها فاصله اندازه‌گیری شده بین دو ناپیوستگی متوالی در امتداد خط برداشت است. فراوانی ناپیوستگی‌ها تعداد ناپیوستگی‌هایی است که خط برداشت آن‌ها را در واحد طول قطع میکند.
- ۴- طول درزه: در خصوص نمایان بودن طول درزه در رخنمون سه حالت اتفاق می‌افتد. در حالت اول دو انتهای ناپیوستگی در خط برداشت قابل رؤیت است که به سادگی می‌توان اندازه آن را به دست آورد، در حالت دوم امکان دارد یک انتهای ناپیوستگی دیده نشود و در حالت سوم هر دو انتها قابل رؤیت نباشند.
- ۵- زبری: اگرچه ناپیوستگی‌ها برای اهداف تحلیل جریان مسطح فرض می‌شوند ولی سطح ناپیوستگی‌ها ممکن است خشن باشند (Hudson et al, 1997).
- ۶- پرشدگی: معمولاً این مواد ضعیف‌تر از جنس توده سنگ هستند. عموماً این مواد شامل شن، ماسه، رس و کربنات‌ها هستند (Zhang, 2016).
- تا کنون روش‌های مختلفی برای برداشت خصوصیات ناپیوستگی‌ها ارائه شده‌اند، لیکن از میان آن‌ها دو روش در مهندسی سنگ کاربرد بیشتری دارند. این دو روش عبارتند از:
- برداشت ناپیوستگی‌ها از مغزه‌ی حاصل از گمانه‌ها
 - برداشت از رخنمون‌های سطحی به روش خط برداشت
- هر دوی این روش‌ها در محاسبات جریان عملیات تزریق کاربرد فراوانی دارند، لیکن داده‌های حاصل از روش دوم به دلیل در دسترس بودن حجم معرف بیشتر دارای سطح اطمینان بالاتری است. شایان ذکر است که این دو روش هر دو جزء روش‌های خطی برداشت ناپیوستگی‌ها می‌باشند. برداشت ناپیوستگی‌ها به روش‌های خطی، خطایی^۱ را در جهت و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به وجود می‌آورد که

¹ Bias

نیازمند اعمال تصحیح می‌باشد. این تصحیح به «تصحیح ترزاقی^۱» معروف می‌باشد. پریست^۲ و معماریان اطلاعات جامعی را از چگونگی برداشت ناپیوستگی‌ها به روش‌های فوق و اعمال تصحیح ترزاقی ارایه داده‌اند. ضمن اینکه به عقیده‌ی پریست اعمال تصحیح ترزاقی به تجربه نیاز دارد و استفاده‌ی نادرست از این تصحیح نه تنها به بهبود نتایج کمک نخواهد کرد، بلکه ممکن است باعث ایجاد خطای بسیار بزرگی در نتایج شود (کمالی بندپی و همکاران، ۱۳۹۵).

۹-۲ تولید شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN)

امروزه مدل‌سازی توده سنگ به‌طور فزاینده‌تری به منظور تعیین دقیق ویژگی‌های توده سنگ و بهبود درک رفتار آن به‌کار برده می‌شود. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی توده سنگ، تعریف دقیق شبکه ناپیوستگی‌ها (ساخت مدل هندسی) است. یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه تاثیر سیستم ناپیوستگی‌ها بر روی توده سنگ، تولید مدل شبکه شکستگی‌های مجزا بر مبنای خصوصیات هندسی و فیزیکی آن‌ها است. هدف از ایجاد شبکه شکستگی تصادفی، ایجاد مدل هندسی از شکستگی‌هاست که در مقیاس دو بعدی و سه بعدی انجام می‌شود. تعریف دقیق ساختار توده سنگ و ساخت مدل هندسی دقیق نقطه شروع بهتری را برای مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های مکانیکی و هیدرولیکی فراهم می‌کند. برای مدل‌سازی دقیق توده سنگ، باید جانمایی درزه‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه توزیع ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ واقعی باشد. آنچه در شبیه‌سازی هندسی اهمیت فوق‌العاده می‌یابد نزدیک کردن مدل به واقعیت و اجتناب از فرضیات اضافی و تخمین‌های دور از واقعیت است. در بسیاری از شیوه‌های مدل‌سازی هندسی توده سنگ، ناپیوستگی‌ها با استفاده از بعضی فرض‌های غیر واقعی از جمله تعداد بسیار کم، قطعی بودن

² Terzaqi correction

³ Priest

جهت، توزیع یکنواخت و نامحدود بودن گسترش آن‌ها، ساده‌سازی می‌شوند که با شرایط واقعی و طبیعی توده سنگ تطابق ندارد. این ساده‌سازی‌ها محدودیت‌هایی جدی بر توانایی مدل‌سازی رفتار واقعی توده سنگ، تحمیل می‌کنند. از طرفی از آنجا که توده سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت، پایایی¹ و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های مورد نظر در نظر گرفته شود و در مدل‌سازی هندسی توده سنگ به‌کار رود. یکی از توانمندترین روش‌های شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است. مدل‌های تصادفی شبکه درزه، طبیعت ناهمگن توده سنگ - های درزه‌دار را با استفاده از نمایش سه‌بعدی شبکه درزه به‌صورت عناصری گسسته، با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور آماری تعریف شده‌اند، ارائه می‌دهد. در این مدل‌ها، هندسه شبکه درزه، بلوک‌های سنگ سالم و همچنین طبیعت پل‌های سنگ سالم بین درزه‌ها در نظر گرفته می‌شود. جنبه جالب دیگر روش مدل‌سازی DFN توانایی تشکیل بلوک‌ها توسط تعداد بسیار زیادی درزه است. شکل بسیاری از بلوک‌های تشکیل شده در مدل، کاملاً ناشناخته (بی‌شکل) است. این موضوع اجازه می‌دهد که تعریف واقعی‌تری از هندسه بلوک‌ها نسبت به روش‌های دیگر به‌دست آید. روش DFN در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از میان سیستم درزه طبیعی، به‌طور وسیعی به‌کار برده می‌شود. روش شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) یک ابزار غیرقابل جایگزین برای مدل‌سازی جریان سیال است (نوروزی، ۱۳۹۳).

¹ Persistence

۲-۱۰ مدل سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل جریان سیال در نرم افزار 3DEC

در نرم افزار 3DEC، توده سنگ دارای درزه و شکاف فقط در درزه ها و شکافها بررسی و از جریان داخل بلوک چشم پوشی می شود. نرخ جریان سیال در درزه ها نسبت به خلل و فرج درون سنگ بکر به دلیل سطح مقطع بزرگ تر، چندین برابر بیشتر است و جریان به وسیله درزه ها کنترل می شود (Itasca consulting group, 2015).

در تحلیل جریان سیال، سیال یا یک جریان گذرا که زمان، پارامتر تعیین کننده آن است و یا جریان پایدار است که در آن تنها فشار در زمان طولانی مدنظر است. در این نرم افزار مدل سازی جریان در درزه ها بدون بررسی تاثیر فشار سیال روی تغییر شکل های سنگ و یا تاثیر تغییر شکل های سنگ روی پراکندگی جریان سیال انجام می شود. این حالت از تحلیل را جریان محض^۱ گویند. برای تحلیل در حالت گذرا، مدول حجمی سیال k_w برای دستیابی به مقیاس درست زمانی مهم است. با کاهش این مدول، گام زمانی و زمان رسیدن به حالت پایدار افزایش می یابد. مدول حجمی سیال نشان از این است که توده سنگ صلب و تغییر شکل پذیری خلل و فرج نسبت به مقیاس زمان انتشار سیال، کاملاً نادیده گرفته می شود.

نرخ توزیع فشار در یک محیط اشباع به وسیله نفوذ (تراوش) نشان داده می شود:

$$c = \frac{k_H}{S} \quad (2-39)$$

در این رابطه ۲-۳۹ k_H هدایت هیدرولیکی (واحد طول به زمان)، S مقدار ذخیره یا اندازه مخزن (واحد عکس طول)، اگر سختی درزه نادیده گرفته شود، ذخیره سازی در درزه های اشباع از رابطه ۲-۴۰ به دست می آید:

¹ Fluid only

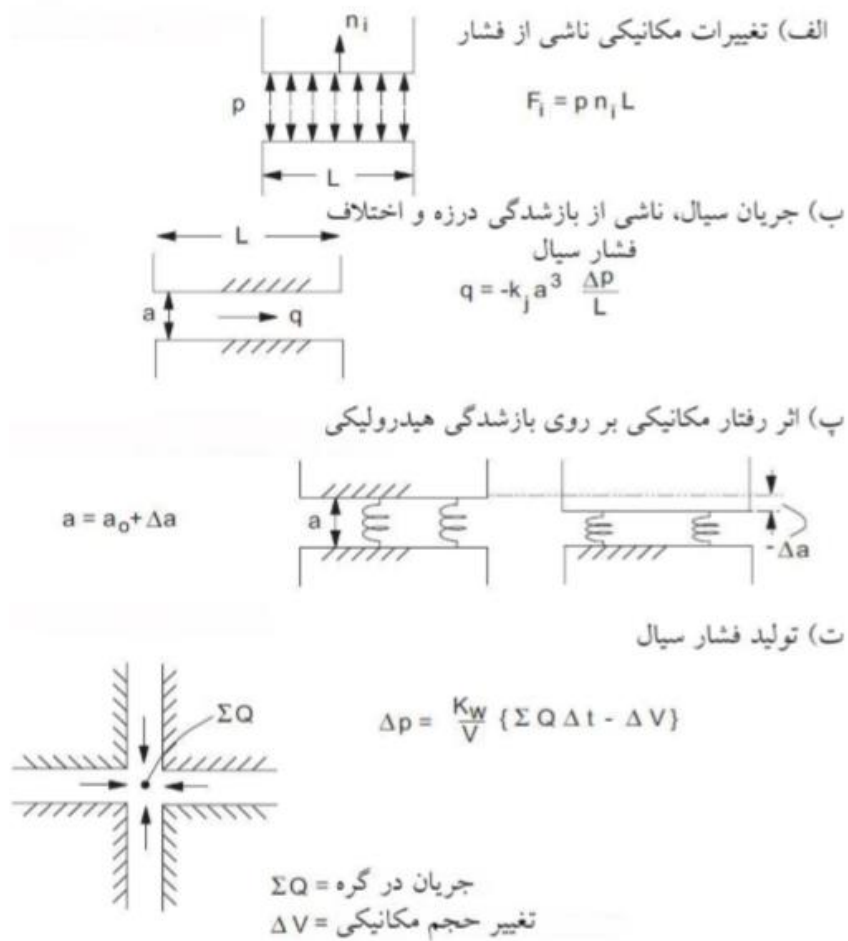
$$S = \frac{1}{\rho_w g} \left(\frac{u_h / s}{k_w} + \frac{1}{k + 4/3G} \right) \quad (40-2)$$

در رابطه ۲-۴۰ U_h بازشدگی هیدرولیکی، s فاصله‌داری درزه‌ها، k_w مدول حجمی سیال و k مدول حجمی سنگ و G مدول برشی سنگ است. باتوجه به این‌که سنگ صلب در نظر گرفته می‌شود، عبارت دوم صفر است. برای در نظر گرفتن تغییر شکل سنگ، مدول حجمی ظاهری سیال از رابطه ۲-۴۱ به‌دست می‌آید (Itasca consulting group, 2015):

$$K_{a_w} = \frac{u_h / s}{\frac{u_h / s}{k_w} + \frac{1}{k + 4/3G}} \quad (41-2)$$

۲-۱۰-۱ حل عددی جریان سیال در شبکه شکستگی

در نرم‌افزار 3DEC مجموعه درزه‌ها بر اساس مدل DFN می‌توانند ایجاد شوند. در مدل DFN مشخصات هندسی درزه با توزیع‌های آماری جهت‌داری، موقعیت و اندازه شکستگی‌ها تعیین می‌شوند. شکستگی‌ها جداکننده‌ی بلوک‌های سنگی نفوذناپذیر هستند (Itasca consulting group, 2015). نرم‌افزار 3DEC جریان سیال هادی در شکاف‌های منفصل‌کننده‌ی بلوک‌های نفوذناپذیر تحلیل می‌شود. این تحلیل جریان به دو صورت هیدرولیکی و توامان هیدرومکانیکی امکان‌پذیر است. در تحلیل توامان هیدرومکانیکی، قابلیت هدایت هیدرولیکی شکاف به تغییر شکل مکانیکی بلوک‌ها وابسته است و فشار آب درزه‌ها بر محاسبات مکانیکی تاثیر می‌گذارد (Itasca, 2013). عمل و عکس‌العمل‌های بین سیال و سنگ در شبکه ناپیوستگی‌ها و روابط حاکم در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵ فعل و انفعالات بین سیال و سنگ در ناپیوستگی‌ها (Itasca, 2013)

فصل سوم

پیشینه مطالعات

شبیه‌سازی عددی در مهندسی سنگ با توجه به اهمیت پروژه‌های مهندسی و هزینه‌های ناشی از بی‌توجهی به مقوله طراحی اصولی فضاهای زیرزمینی یک امر اجتناب‌ناپذیر است. از اوایل دهه ۱۹۷۰ با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در امر استفاده از رایانه‌ها در طراحی مهندسی و فنون نوین برنامه‌نویسی، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی در قالب نرم‌افزارهای عددی که قابلیت مدل کردن فرآیندهای مکانیکی و هیدرولیکی را به شکل توامان دارند در دسترس مهندسين قرار گرفته است (Zhang and Sanderson, 2002).

رفتار جریان سیال در توده سنگ درزه‌دار و عکس‌العمل سیال در درزه‌ها با توجه به گرادیان فشار منفذی اعمالی و ناهمگنی ویژگی‌های درزه‌های توده سنگ، متغیر است. در شبکه درزه‌های بهم پیوسته و هندسه پیچیده توده سنگ، رفتار سیال به عوامل زیادی چون قابلیت گذردهی آب هر درزه، تقاطع درزه‌های منفرد و جهت‌داری آن‌ها وابسته است (Hudson and Harison, 2000).

تخمین نفوذپذیری محیط و مدل‌سازی جریان سیال درون زمین از ملزومات اصلی مطالعات ژئوتکنیکی، مخازن نفتی، سدسازی و محیط‌زیست می‌باشد. نفوذپذیری وابسته به تنش توده سنگ از مهم‌ترین موضوعات برای طراحی و ارزیابی عملکرد مخازن دفن زباله‌های هسته‌ای، استخراج نفت و گاز، فضاهای زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی در میان پی سد، استخراج انرژی ژئوترمال و... می‌باشد. فشار برکنش^۱ حاصل از آب می‌تواند باعث تخریب سازه‌های هیدرولیکی شود یا نشت آب به معادن روباز و تونل‌ها باعث ایجاد مشکلات مختلف ایمنی و اقتصادی گردد.

در بسیاری از سازندهای زمین‌شناسی به‌ویژه در مناطقی که ماتریکس سنگ نفوذناپذیر است،

¹ Uplift pressure

عامل اصلی انتقال جریان سیال، شبکه‌ی پیوسته‌ای از شکستگی‌های مجزا است. جریان آب از طریق درزه‌ها مکانیسم رفتار هیدرومکانیکی محیط را پیچیده کرده و پایداری سازه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اغلب، پیش‌بینی جهت‌های اصلی نشت در محیط توده سنگ دشوار است. روش تانسور هدایت هیدرولیکی، بر مبنای عوامل فیزیکی و هندسی ناپیوستگی‌ها، هدایت هیدرولیکی توده سنگ و مقادیر و جهت‌های اصلی نشت آب را برآورد می‌کند.

آزمایش‌های متعددی به این مسأله اشاره دارد که بین نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و نفوذپذیری به‌دست آمده از آزمایش‌های برجا تفاوت وجود دارد. این مسأله به‌ویژه در مورد سنگ‌های بلورین صدق می‌کند و علت این اختلاف وجود گسل، درزه و سایر ناپیوستگی‌ها در توده سنگ است. رفتار هیدرولیکی توده سنگ‌ها توسط هندسه ناپیوستگی‌ها (شیب، جهت شیب، بازشدگی، فراوانی، زبری سطح درزه و طول اثر درزه) کنترل می‌شود. در این میان بازشدگی به‌عنوان بحرانی‌ترین عامل کنترل‌کننده میزان جریان سیال شناخته شده است و زبری سطح درزه تاثیر ویژه‌ای روی آن دارد.

تئوری و روش‌های زیادی جهت تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌ها، گسترش یافته است. جهت تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌صورت برجا از آزمایش پمپاژ^۱ یا آزمایش لوژان^۲ استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها، بر مبنای جریان سیال در محیط پیوسته استوار است. پیش‌بینی و ارزیابی ویژگی‌ها یک لایه آب‌دار بر مبنای این آزمایش‌ها، در مقیاس محلی، عملیاتی پرهزینه است.

آزمایش استاندارد لوژان، مقادیر میانگین و همسانگرد نفوذپذیری را به‌دست می‌دهد؛ این مقادیر به حجم سنگ در طولی از گمانه که آزمایش صورت گرفته است، مربوط است. در توده سنگ‌های درزه-دار که هدایت هیدرولیکی توسط ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود، مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست

¹ Pumping test

² Lugeon test

آمده از آزمایش لوژان، گاهی اوقات گویای نفوذپذیری واقعی توده سنگ نیست و نمی‌توان آن را به حجم بزرگی از سنگ تعمیم داد. برای غلبه بر این موضوع باید آزمایش لوژان را در طول بیشتری از گمانه و همچنین در نقاط مختلف انجام داد تا بتوان ارزیابی جامعی از نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار داشت.

۲-۳ روش‌های تجربی و تحلیلی در برآورد میزان نفوذ

لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ تحلیل عددی و تجربی نرخ تزریق در توده سنگ درزه‌دار پرداختند. آن‌ها اثر تقویت تزریق دوغاب سیمانی داخل درزه‌های توده سنگ را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند سختی درزه‌ها پارامتر موثر در تقویت توده سنگ است و نتیجه به‌دست آمده نشان می‌دهد که پس از تزریق سختی درزه‌ها تا ۶ برابر افزایش می‌یابد (Lee et al, 2000).

مسعودی و همکاران در سال ۱۳۸۸ به ارزیابی مدل‌های تحلیلی تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار پرداختند. در این پژوهش، مدل‌های محاسبه‌ی میزان شعاع نفوذ و حجم دوغاب تزریق یافته، بر اساس شرایط زمین‌شناسی مهندسی حاکم بر محیط ساختگاه و عوامل ژئوتکنیکی سنگ به‌ویژه مشخصات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها و نیز فشار تزریق و ویژگی‌های سیال دوغاب، تدوین شده‌اند (مسعودی و همکاران، ۱۳۸۸).

در سال ۲۰۱۰ بوترون^۲ و همکاران یک مفهوم جدید برای طراحی و ارزیابی عوامل تزریق قبل از حفاری توده سنگ برای جلوگیری از نشت قطره‌ای آب و ایجاد جریان در یک تونل راه آهن ارایه دادند. برای این هدف سقف تونل‌ها با استفاده از سیلیکا کلوئیدی به صورت قطعه‌ای و دیواره‌ها و

¹ Lee

² Butron

انتهای تونل با سیمان پر شده‌اند. عوامل طراحی با بررسی مغزه‌های گمانه‌های حفاری شده ارایه شدند. آن‌ها از آزمایش تست فشار آب و اندازه‌گیری زمان فشار اعمالی برای ارزیابی تزریق استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب و عملکرد تزریق بستگی زیادی به ابعاد توده سنگ مورد بررسی دارد (Butron et al., 2009).

در سال ۱۳۹۴ کراری با استفاده از لوژان و شاخص نفوذپذیری ثانویه به ارایه راهکار اجرایی تزریق در سد پرداخت. آن‌ها برنامه‌ای به صورت فلوجارت برای وضعیت‌های مختلف ساختگاه ارایه دادند. در فلوجارت‌ها پس از تعیین وضعیت تزریق‌پذیری توده‌های سنگی، راه‌کار بهسازی آن‌ها به طور کلی ارایه می‌شود. توجه به بازشدگی درزه‌ها، اندازه ذرات سیمان و تعیین غلظت متناسب با شرایط درزه‌ها از مسایل مهم در این پژوهش است (کراری، ۱۳۹۴).

لیسا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ موضوع مشخص کردن سیستم شکستگی برای تزریق تونل، تحقیقاتی را صورت دادند. تحقیقات آن‌ها بر روی تونل واقع در عمق ۴۵۰ متری نشان داد که عوامل موثر بر تزریق شامل هد هیدرولیک، بازشدگی هیدرولیکی شکستگی، فرکانس شکستگی p_{10} ، تعداد و جهت دسته درزه‌های عمده و میزان جریان ورودی هستند (Lisa et al., 2012).

در سال ۱۳۹۵ علوی و همکاران به ارزیابی جریان آب ورودی به تونل‌ها به روش تانسور نفوذپذیری پرداختند. در این پژوهش به منظور طراحی بهینه گالری زهکش با توجه به شبکه ناپیوستگی‌ها در کاواک معدن شماره یک سنگ آهن گل گهر، از روش تانسور نفوذپذیری بهره گرفته شده است. برای برآورد دبی آب ورودی به تونل، از روش‌های تحلیلی و تجربی متفاوتی استفاده شده است. نتایج نشان داد که روابط تحلیلی نشت آب به درون تونل را بیش از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند. در محیط‌های

¹ Lisa

سنگی عوامل هندسی درزه‌ها مقدار نشت به درون تونل را کنترل می‌کنند. از این‌رو جهت تخمین مقدار دبی ورودی به گالری زهکش از تانسور هدایت هیدرولیکی استفاده شد. مشاهده شد که مقدار دبی ورودی به گالری با در نظر گرفتن تانسور هدایت هیدرولیکی در روابط تحلیلی به طور متوسط ۹۰٪ کاهش یافته و به مقادیر تجربی نزدیک‌تر است (علوی و همکاران، ۱۳۹۵).

در سال ۱۳۹۵ ارزیابی تزریق‌پذیری ساختگاه سد سرابی بر اساس طبقه‌بندی‌های زمین‌شناسی مهندسی RMA, RQD، به‌منظور طراحی پرده آب‌بند توسط صادقی و همکاران انجام شد. قابلیت نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگ هورنفلس به صورت آماری تحت بررسی قرار گرفت. مقایسه RQD با آزمایش لوژان نسبت به عمق نشان داد که میزان نفوذپذیری از سطح به عمق کاهش می‌یابد اما روند کاملاً مشخصی را نشان نمی‌دهد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۳ روش‌های عددی در برآورد میزان نفوذ دوغاب

روش‌های عددی برای حل مسایل مهندسی می‌توانند کاربرد نامحدودی داشته باشند. در سالیان گذشته به‌دلیل رایانه‌ها از توان و سرعت کمی برخوردار بودند، هزینه و وقت زیادی صرف برنامه‌نویسی و اجرای مدل‌های عددی می‌گردید، لذا روابط تحلیلی ارجح‌تر بودند. روش‌های تحلیلی با وجود آسانی در به‌دست آوردن جواب، نمی‌توانند حل مسأله را به‌صورت دقیق بیان نمی‌کنند. زیرا پایه و اساس این روش‌ها بر ساده‌سازی مسأله استوار است.

امروزه مدل‌سازی عددی برای بررسی رفتار توده سنگ به‌طور گسترده استفاده می‌شود. اساس روش‌های عددی تبدیل محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود، در تعدادی از نقاط محیط می‌باشد.

روش‌های عددی که برای موضوعات مکانیک‌سنگی به‌کار می‌رود به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند

که بسته به نوع مسأله و با توجه به اندازه و تعداد شکستگی‌ها نوع روش انتخاب می‌شود.

۳-۳-۱ روش‌های پیوسته

۳-۳-۱-۱ روش المان محدود

این روش برای هندسه‌های پیچیده و رفتار وابسته به زمان کاربرد دارند. این روش، محیط را به المان‌های محدود تقسیم یا به اصطلاح مش‌بندی می‌کند. محدود از نظر هندسی به این معناست که هر المان با المان‌های دیگر محصور شده است. در این روش بسته به شکل المان‌ها (مثلثی، چهارگوش، ...) تعداد گره‌ها متفاوت خواهد بود. پیاده‌سازی این مش‌ها برای هندسه‌های پیچیده و بزرگ که تعداد المان‌های آن زیاد است، کار آسانی نیست. با افزایش المان‌ها تعداد محاسبات افزایش می‌یابد ولی دقت کار نیز با کوچکتر شدن مش‌ها و افزایش محاسبات، افزایش می‌یابد. در این روش می‌توان به‌منظور کاهش محاسبات با نزدیک‌تر شدن به مرز بیرونی مدل، ناحیه محصور شده المان‌ها (مش‌ها) را بزرگتر در نظر گرفت.

۳-۳-۱-۲ روش تفاضل محدود

در این روش محیط همگن و پیوسته است. در این روش، محیط به المان‌های مختلفی تقسیم می‌شود که در گره‌ها به هم متصل‌اند و این خاصیت مشابه با روش المان محدود است. تفاوت این روش با المان محدود در نحوه‌ی حل مسأله است. نقطه قوت این روش سهولت کار و کارکرد محاسباتی کمتر است.

۳-۳-۱-۳ روش المان مرز

این روش نیز نکات کلی مشابه با دو روش قبلی را دارد. در این روش، زمان حل مسأله بسیار سریع است زیرا محیط به المان‌های کوچک و بزرگ تقسیم نخواهد شد و فقط مرزها با المان‌های کوچک مش‌بندی می‌شود. محدودیت این روش این است که عموماً برای محیط‌هایی با رفتار

خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد و اگر هندسه مسأله شامل مغارهای زیرزمینی پیچیده باشد و یا رفتار وابسته به زمان داشته باشند، روش مناسبی نخواهد بود.

۲-۳-۳ روش‌های ناپیوسته

۱-۲-۳-۳ روش المان مجزا

در این روش، محیط دربرگیرنده به بلوک‌های صلب تقسیم می‌شود. فرض بر این است که جابجایی یا تغییر شکل که این بلوک‌ها نسبت به هم، بسیار بزرگ‌تر از جابجایی یا تغییر شکل خود بلوک در اثر اعمال نیروهای محیطی است. در این روش، لازم است اطلاعات دقیقی از ناپیوستگی‌ها در محیط وجود داشته باشد.

یانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با روش عددی دو بعدی به پیش‌بینی نرخ تزریق در شکستگی سنگ‌ها پرداختند. در این پژوهش از روش مونت کارلو برای تولید مدل‌های توده سنگ استفاده شده است. بر اساس نتایج عددی، رابطه تجربی برای محاسبه عمق نفوذ دوغاب ارایه داده‌اند که به عوامل تراکم شکستگی، متوسط عرض شکستگی، انحراف استاندارد عرض شکستگی، متوسط زاویه شیب شکستگی به محور افقی، انحراف استاندارد زاویه شیب شکستگی به محور افقی، میانگین طول شکستگی، انحراف استاندارد طول شکستگی‌ها، فشار تزریق، مقاومت برشی اولیه و ویسکوزیته اولیه دوغاب بستگی دارد (Yang et al., 2002).

شکوهی و مرتضوی در سال ۱۳۸۶ تحلیل عددی تاثیر عوامل موثر در فرآیند تزریق در محیط‌های سنگی ناپیوسته را به روش عددی بررسی نمودند. در این پژوهش، روش عددی به‌عنوان ابزاری مناسب برای تشریح فرآیند تزریق به‌کار گرفته شده است. رفتار دوغاب در محیط‌های سنگی ناپیوسته با استفاده از نرم‌افزار UDEC شبیه‌سازی شده است (شکوهی و مرتضوی، ۱۳۸۶).

¹ Yang

کوکوک^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ روی موضوع تزریق مواد شیمیایی برای جلوگیری از آسیب ساختمان ناشی از زهکشی آب از تونل‌های کم‌عمق، با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پژوهش‌هایی را انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تزریق مواد شیمیایی می‌تواند از نشست زمین به‌خوبی جلوگیری کند ولی در این کار باید به سطح ایستایی توجه شود (Kuckuk et al, 2008).

در سال ۱۳۸۷ مسعودی و همکاران روی مدل‌سازی تحلیلی و عددی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار بر اساس نتایج تزریق آزمایشی در ساختگاه سد سیمره تحقیقاتی را انجام دادند. در این مطالعه موردی شعاع نفوذ دوغاب به ازای فشار تزریق ۱ مگاپاسکال برابر با ۷/۷ متر و در فشار ۴ مگاپاسکال برابر با ۱۵/۵ متر به‌دست آمد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، تخمین بهتری از حجم دوغاب تزریق‌یافته نشان می‌دهد (مسعودی و همکاران، ۱۳۸۷).

در سال ۲۰۱۲ در کشور کانادا ترور^۲ و همکاران تحقیقاتی به منظور بهبود روش‌های طراحی تزریق در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از DFN به‌عمل آوردند. آن‌ها روش ACG^۳ را به صورت یک رویکرد کمی برای بهینه‌سازی طرح تزریق یا هدف دستیابی به یک توالی مناسب و متعادل با فاصله مطلوب چال توسعه دادند. در این تحقیق، با تنظیم رئولوژی دوغاب با افزایش فشار مورد نظر در مقابل جریان، حجم تزریق مورد نظر به‌دست می‌آید (Carter Trevor et al, 2012).

مهاجرانی و همکارانش در سال ۱۳۹۲ به پیش‌بینی تزریق‌پذیری توده سنگ درزه‌دار ساختگاه سد رودبار لرستان با استفاده از برنامه‌ی توسعه داده شده‌ی GroutIUT^{2D} پرداختند. نرم‌افزار GroutIUT^{2D} از یک الگوریتم کاملاً صریح مبتنی بر فشار تزریق و روش شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا

¹ Kuckuk

² Trevor

³ Aperture controlled grouting

در دو بعد بهره می‌برد. در این پژوهش تحلیل حساسیت با استفاده از معیار مساحت حداکثر سطح پخش‌شوندگی دوغاب تزریق در دو محیط خشک و اشباع از آب زیرزمینی انجام شده است. نتایج بیان می‌کند که با افزایش میزان فشار اولیه و زمان تزریق، افزایش میزان چگالی، کاهش گرانی و کاهش تنش تسلیم اولیه دوغاب تزریق، میزان سطح پخش‌شوندگی تزریق افزایش می‌یابد و این تاثیرات در حالت خشک بیشتر از حالت اشباع می‌باشد (مهاجرانی و همکاران، ۱۳۹۲).

سعیدی و همکاران در سال ۲۰۱۳ در ایران با استفاده از دو روش تحلیلی و عددی به بررسی اثرات ویژگیها دوغاب و درزه‌ها روی تزریق‌پذیری توده سنگ پرداختند. این تحقیق به صورت دو بعدی و با نرم‌افزار UDEC روی توده سنگ‌های سد بختیاری صورت گرفت. در این تحقیق دریافتند که ترکیب متداول دوغاب برای آب‌بندی سنگ و خاک، مواد مبتنی بر سیمان است. در تزریق سنگ مهم‌ترین عوامل نفوذ دوغاب، نسبت آب به سیمان (W/C)، مقدار تسلیم، اندازه دانه‌های سیمان، ویسکوزیته و زمان کارگذاری می‌باشد. با افزایش عمق از سطح زمین، نفوذپذیری سنگ و تزریق‌پذیری به دلیل اینکه درزه تحت تنش درجا بالا قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد. طول نفوذ دوغاب به شدت به زاویه بین دسته درزه‌ها، فاصله‌داری، طول، فشار و مدت زمان فرآیند تزریق بستگی دارد (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۳).

در کشور چین وانگوا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از دو روش عددی و آزمایشگاهی به بررسی تجربی ضریب آب‌بندی از تزریق مواد شیمیایی در شکستگی سنگ حاوی جریان آب پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین اثرات در بهره‌وری آب‌بندی به ترتیب: سرعت اولیه جریان آب، عرض شکستگی، دوغاب و زمان سفت شدن آن می‌باشند (Sui Wanghua et al., 2015).

مهاجرانی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ الگوریتمی برای شبیه‌سازی انتشار دوغاب در شبکه

¹Wanghua

شکستگی‌های ناپیوسته دو بعدی ارائه دادند. این مطالعه با هدف شبیه‌سازی الگوریتم محاسباتی انتشار سیال دوغابی به‌وسیله‌ی تعمیم الگوریتم فشار دوغاب در شبکه شکستگی مجزای دو بعدی انجام شده است. برنامه کامپیوتری گسترش یافته به‌وسیله‌ی یک طرح بازگشتی نوآورانه برای مسیرهای انتشار در داخل شکستگی تعریف شده است که با استفاده از یک رابط گرافیکی می‌توان تصویر آن را نیز به‌دست آورد. دقت و قابلیت اطمینان این الگوریتم با استفاده از دو آزمایش آزمایشگاهی با موفقیت تایید شده است. در نهایت، تحلیل حساسیت برای تاثیر عوامل کلیدی از جمله فشار اولیه، چگالی سیال، ویسکوزیته سیال و زمان گیرش دوغاب روی انتقال دوغاب در شرایط خشک و اشباع انجام شده است. این مطالعه نشان می‌دهد فشار سیال می‌تواند به‌طور قابل توجهی سطح انتشار را کاهش دهد (مهاجرانی و همکارانش، ۲۰۱۷).

جدول ۳-۱ خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین

ردیف	محقق	سال	عنوان
۱	لی و همکاران	۲۰۰۰	تقویت تزریق دوغاب سیمانی داخل درزه‌های توده سنگ
۲	مسعودی و همکاران	۱۳۸۸	مدل‌های تحلیلی تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار
۳	پورتون و همکاران	۲۰۰۹	طراحی و ارزیابی عوامل تزریق قبل از حفاری توده سنگ
۴	کراری و همکاران	۱۳۹۴	راه‌کار اجرایی تزریق در سنگ
۵	لیسا و همکاران	۲۰۱۲	مشخص کردن سیستم شکستگی برای تزریق تونل
۶	علوی و همکاران	۱۳۹۵	ارزیابی جریان آب ورودی به تونل‌ها به روش تانسور نفوذپذیری
۷	صادقی و همکاران	۱۳۹۵	ارزیابی تزریق‌پذیری ساختگاه سد سرابی بر اساس طبقه‌بندی زمین‌شناسی و مهندسی به منظور طراحی پرده آب‌بند
۸	یانگ و همکاران	۲۰۰۲	پیش‌بینی نرخ تزریق در شکستگی سنگ با شبیه‌سازی عددی
۹	شکوهی و مرتضوی	۱۳۸۶	تحلیل عددی تاثیر عوامل موثر در فرآیند تزریق در محیط‌های سنگی ناپیوسته
۱۰	کوکوک و همکاران	۲۰۰۸	تزریق مواد شیمیایی برای جلوگیری از آسیب ساختمان ناشی از زهکشی تونل-های کم عمق
۱۱	مسعودی و همکاران	۱۳۸۷	مدل‌سازی تحلیلی و عددی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ‌های درزه‌دار
۱۲	ترور و همکاران	۲۰۱۲	بهبود روش‌های طراحی تزریق در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از DFN
۱۳	مهاجرانی و همکاران	۱۳۹۲	پیش‌بینی تزریق‌پذیری توده سنگ درزه‌دار با برنامه توسعه داده شده‌ی GROUT ^{2D}
۱۴	سعیدی و همکاران	۲۰۱۳	تحلیل عددی و تحلیلی اثرات ویژگی‌های دوغاب و درزه روی تزریق‌پذیری توده سنگ
۱۵	وانگوا و همکاران	۲۰۱۵	تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای بررسی تجربی ضریب آب‌بندی از تزریق مواد شیمیایی در شکستگی سنگ حاوی جریان
۱۶	مهاجرانی و همکاران	۲۰۱۷	شبیه‌سازی انتشار دوغاب در شبکه شکستگی ناپیوسته دو بعدی

فصل چهارم

معرفی سد رودبار لرستان

۱-۴ موقعیت و زمین‌شناسی منطقه سد رودبار لرستان

محل پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان در استان لرستان و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز و در مسیر رودخانه رودبار قرار دارد (شکل ۱-۴). گستره‌ی مورد بررسی در پهنه زاگرس شمالی یا زاگرس بلند واقع شده که از جنوب غرب به نوار چین خرده زاگرس و از شمال شرق به گسله اصلی واژگون زاگرس و پهنه سنندج_سیرجان محدود گردیده است. به‌لحاظ توپوگرافی، متوسط ارتفاع منطقه در حدود ۱۷۵۰ متر و دارای آب و هوای سرد و کوهستانی است.

در منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین واحدهای دارای رخنمون شامل سازندهای آهکی_دولومیتی دالان و سروک متعلق به دوره پرمین، سازندهای هرمز و میلا دارای لیتولوژی شیل و مارن متعلق به دوره کامبرین، سازند گرو با لیتولوژی آهک مارنی و مارن متعلق به دوره کرتاسه و سازند بختیاری عمدتاً متشکل از کنگلومرا متعلق به دوره پلیوسن هستند. روند کلی ساختار زمین‌شناسی منطقه N130E تا N140E است که با روند زاگرس هم‌خوانی دارد. توده سنگ‌های دربرگیرنده سد به‌طور عمده از جنس کربناته، با تخلخل پایین، وزن مخصوص نسبی حدود ۲٫۷ و دارای لایه‌بندی هستند. ضخامت لایه‌ها بسیار متفاوت بوده و از نازک لایه تا توده‌ای را شامل می‌شوند (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳).



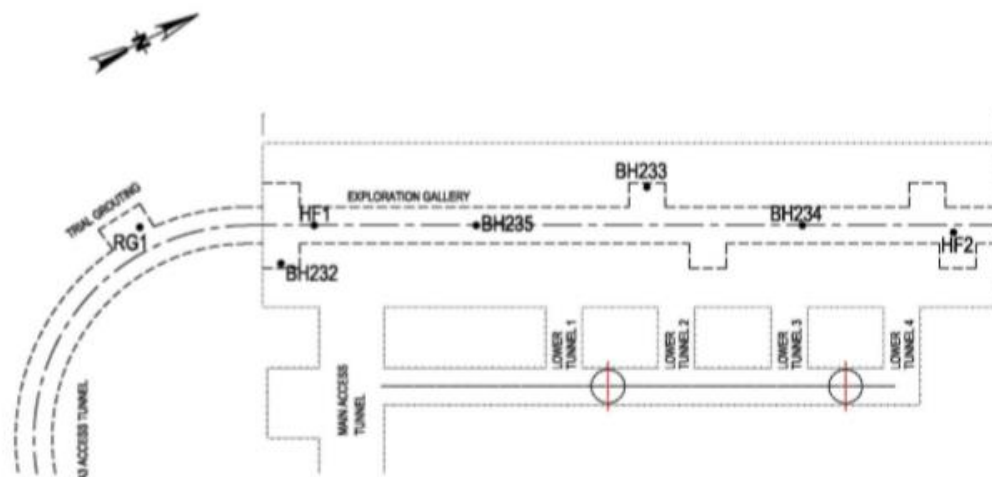
شکل ۱-۴ موقعیت سد رودبار لرستان (شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)

۲-۴ مطالعات آزمایش لوژان در منطقه

خصوصیات سنگ‌شناسی، ساختاری و همچنین وضعیت نفوذپذیری محدوده مغار نیروگاه، مهم‌ترین عوامل موثر بر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی این محدوده محسوب می‌شوند. گسترش سنگ‌های کربناته، توسعه سیستم ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌ها در توده سنگ، ثبت مقادیر با نفوذپذیری متوسط تا خیلی زیاد (مقادیر بیش از ۱۰ لوژان) در طی آزمایش‌های لوژان و همچنین پایین بودن تراز و ملایم بودن شیب سطح ایستابی به سمت رودخانه رودبار از جمله دلایل بالا بودن پتانسیل توده سنگ برای عبور و نفوذ آب محسوب می‌شوند.

وجود چشمه‌ای در فاصله‌ی ۱+۰۸۰ کیلومتری تونل زهکش، از جمله نشانه‌های محلی پتانسیل سنگ برای عبور آب است. بر این اساس در بررسی لزوم آب‌بندی و طراحی پرده آب‌بند، این شرایط حایز اهمیت بوده و توجه به آن، مهم و راه‌گشا خواهد بود (گزارش زمین‌شناسی مهندسی مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳).

به‌منظور بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی محدوده مغار نیروگاه، از اطلاعات گمانه‌های اکتشافی حفر شده در گالری اکتشافی سقف مغار شامل ۴ گمانه (BH235, HF2, BH234, BH233, BH232) و نیز گمانه تزریق آزمایشی (RG1) استفاده شده است. موقعیت گمانه‌ها در شکل ۲-۴، نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ موقعیت گمانه‌ها در طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳)

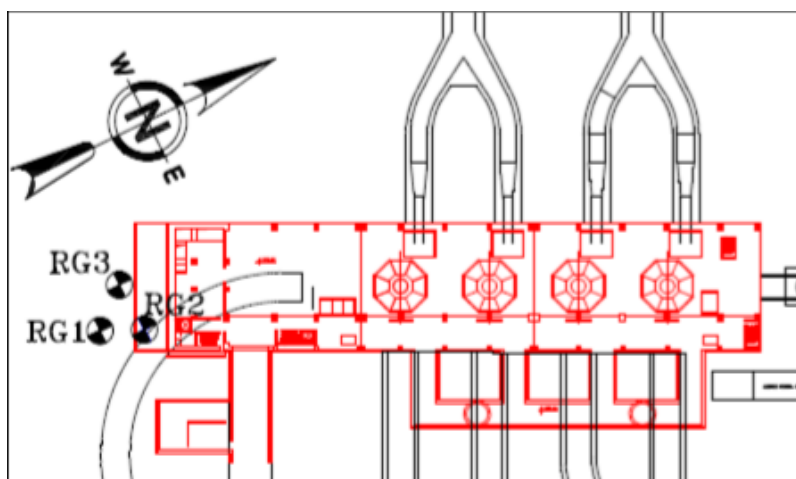
بررسی انجام شده بر روی نتایج حاصل از حفاری گمانه‌های اکتشافی حاکی از خوب بودن نسبی شرایط سنگ در پیرامون مغار است. با این حال، شاخص کیفی در برخی نقاط در رده ضعیف تا خیلی ضعیف قرار دارد. این موضوع در مطالعات ژئوفیزیکی (توموگرافی) که با استفاده از گمانه‌های اکتشافی در محدوده گالری اکتشافی سقف مغار انجام شده، تأیید شده است.

در فرآیند تکمیل مطالعات پایه برای طراحی پرده تزریق، عملیات تزریق آزمایشی در محل دستک ایستگاه تزریق آزمایشی که در دیواره چپ و قسمت انتهایی تونل A3، در فاصله حدود ۳۰ متری از ابتدای گالری اکتشافی سقف مغار قرار گرفته، انجام شده است. در این ایستگاه، مجموعاً تعداد ۳ گمانه (RG1 و RG2 و RG3) با عمق ۷۵ متر، با فاصله ۳ متر از یکدیگر، با آرایش مثلثی و یک گمانه کنترلی در مرکز آن‌ها حفاری و تزریق شده است. مشخصات و موقعیت گمانه‌ها در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۳، ارائه شده است. لازم به ذکر است که آرایش انتخاب شده در این عملیات صرفاً به دلیل تعجیل در تکمیل فرآیند مطالعات و با حفر کمترین تعداد ممکن گمانه بوده است.

جدول ۱-۴ موقعیت گمانه‌های تزریق آزمایشی (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)

ردیف	گمانه	X	Y	Z	عمق (متر)
۱	RG1	۳۷۶۰۶۶	۳۶۴۱۹۶۵	۱۶۹۰	۷۵
۲	RG2	۳۷۶۰۶۷	۳۶۴۱۹۶۸	۱۶۹۰	۷۵
۳	RG3	۳۷۶۰۶۴	۳۶۴۱۹۶۸	۱۶۹۰	۷۵
۴	RGC	۳۷۶۰۶۶	۳۶۴۱۹۶۸	۱۶۹۰	۷۵

در فرآیند آزمایش تزریق، گمانه اول (RG1) به روش بالا به پایین و دو گمانه بعد (RG2, RG3) با روش پایین به بالا تزریق شده‌اند. پس از حفر سه گمانه اصلی، گمانه‌ی کنترلی در بین آن‌ها حفر گردیده است.



شکل ۳-۴ موقعیت گمانه‌های تزریق آزمایشی در ابتدای مغار نیروگاه، دیواره چپ انتهای تونل A3 (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)

بر اساس نتایج آزمایش لوژان، نفوذپذیری حدود ۶ درصد از طول کل سنگ آزمایش شده، در رده خیلی زیاد (لوژان بیش از ۶۰)، حدود ۳/۶ درصد در رده زیاد (لوژان بین ۳۱ تا ۶۰)، حدود ۵/۴ درصد در رده متوسط (لوژان بین ۱۱ تا ۳۰)، حدود ۱۸ درصد در رده نفوذپذیری کم (لوژان بین ۳ تا ۱۰) و مابقی که حدود ۶۷ درصد از طول کل است، در رده غیرقابل نفوذ (لوژان کمتر از ۳) قرار دارد با

روش میانگین‌گیری حسابی از این مقادیر، مقدار متوسط لوژان ۹/۶ به دست می‌آید که با توجه به خورند سیمان (جدول ۳-۴) گمانه/مقطع ۳۵ تا ۴۰ متر به عنوان بهترین حالت برای آزمایش انتخاب می‌شود که با در نظر گرفتن جدول ۲-۴، فشار ۲۲ بار برای تزریق در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی به دلیل حجم بالای محاسبات و زمان اجرای بالا شبیه‌سازی در یک پله صورت گرفته است.

جدول ۲-۴ مقادیر فشار تزریق در تزریق آزمایشی (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳)

ردیف	طول تزریق (m)	فشار مانومتر (bar)
۱	۱ تا ۵	۳
۲	۵ تا ۱۰	۵
۳	۱۰ تا ۱۵	۷
۴	۱۵ تا ۲۰	۹
۵	۲۰ تا ۲۵	۱۲
۶	۲۵ تا ۳۰	۱۵
۷	۳۰ تا ۳۵	۱۸
۸	۳۵ تا ۴۰	۲۲
۹	۴۰ تا ۴۵	۲۶
۱۰	بیشتر از ۴۵	۳۰

جدول ۳-۴ مقادیر خورد سیمان (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۳)

RGC	RG3		RG2		RG1		عمق در گمانه تزیق (m)	ردیف
	لوزان	خورد سیمان (kg/m)	لوزان	خورد سیمان (kg/m)	لوزان	خورد سیمان (kg/m)		
۰	۵	۲,۵	۷	۷,۱	-	-	۵ تا ۲	۱
۵,۳	۴	۲۰	۱	۲	۳	۰,۹	۱۰ تا ۵	۲
۱,۹	۴	۰	۱	۰,۲	۲	۱,۲	۱۵ تا ۱۰	۳
۰,۵	۴	۰,۶	۱	۰	۱۳	۴,۵	۲۰ تا ۱۵	۴
۰	۱	۰,۳	۱	۰,۸	۱	۰	۲۵ تا ۲۰	۵
۰,۷	۲	۰,۲	۲	۰	۱۵	۰,۱	۳۰ تا ۲۵	۶
۱,۱	۲	۰	۲	۰,۷	۵۸	۴۰,۵	۳۵ تا ۳۰	۷
۰,۶	۴	۰,۶	۶	۲,۳	۲۱	۹,۶	۴۰ تا ۳۵	۸
۰,۹	۵۹	۱۵,۶	۳	۰,۹	۶	۰	۴۵ تا ۴۰	۹
۰,۷	۷	۳,۶	۱۴	۷,۲	۵	۰,۸	۵۰ تا ۴۵	۱۰
۰	۱۲	۰,۸	۷	۰,۳	۱۶	۳,۱	۵۵ تا ۵۰	۱۱
۰	۵	۰,۸	۱	۰	۵	۰,۱	۶۰ تا ۵۵	۱۲
۰	۳	۱	۵	۰	۲	۰	۶۵ تا ۶۰	۱۳
۰	۵	۰,۴	۱۴۱	۱۵,۷	۵	۰	۷۰ تا ۶۵	۱۴
۰,۲	۵	۰,۳	۹	۰,۴	۴	۰,۲	۷۵ تا ۷۰	۱۵

فصل پنجم

مدل سازی عددی و تحلیل حساسیت

۱-۵ مقدمه

در فصول گذشته مفاهیم مرتبط با فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی و اصول شبیه‌سازی جریان سیال در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از روش‌های ناپیوسته‌المان مجزا و شبکه‌ی شکستگی مجزا مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق به‌منظور مطالعه‌ی ویژگی‌های مکانیکی و هندسی درزه‌ها در میزان نفوذ دوغاب از روش‌های شبکه شکستگی مجزا و المان مجزا استفاده شده و اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از آزمایش لوژان صورت گرفته است. در این فصل در ابتدا با تمرکز بر اطلاعات طرح تلمبه ذخیره‌ای سد و نیروگاه رودبار لرستان، به بررسی فرض‌های اولیه و تولید شبکه شکستگی با استفاده از مدل DFN پرداخته شده است. در ادامه، مدل‌سازی نفوذ دوغاب بر اساس عوامل مکانیکی، هندسی و هیدرولیکی درزه سیال توسط نرم‌افزار تجاری 3DEC و با کاربرد روش توامان هیدرومکانیکی انجام پذیرفته است.

۲-۵ مطالعات میدانی و جمع‌آوری اطلاعات ساختاری

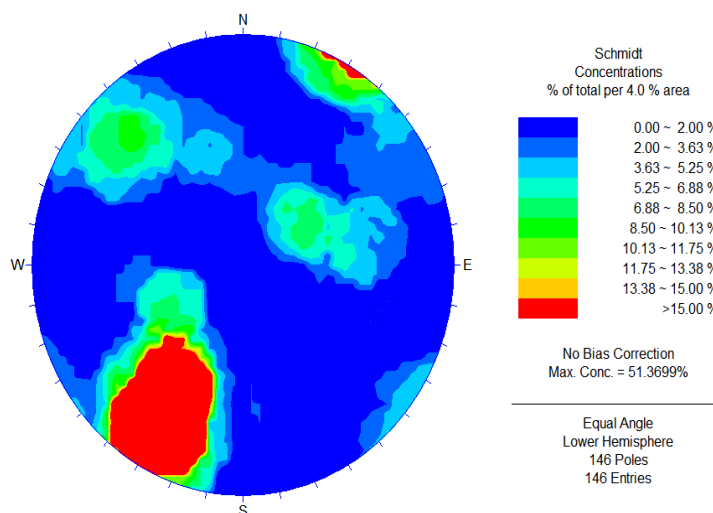
اولین مرحله در فرآیند مدل‌سازی هندسی، جمع‌آوری اطلاعات ناپیوستگی‌ها برای تحلیل‌های آماری است. به‌طور معمول، ویژگی‌های هندسی درزه‌ها با استفاده از پیمایش درزه‌ها در طول سطوح نمایان سنگی از طریق روش‌های پیمایش خطی یا پنجره‌ای تعیین می‌شوند (Weiss, 2008). اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق از روش برداشت خطی به دست آمده است. در این روش ویژگی‌های تمامی درزه‌هایی که خط برداشت را قطع می‌کنند، اندازه‌گیری می‌شوند. در روش برداشت خطی سطوح مسطح تمیز سنگی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد. در این روش باید رخنمون شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتها از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد (Priest, 1993).

۳-۵ تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌های برداشت شده

با تفکیک هر دسته درزه و جداسازی ویژگی‌های درزه‌های مربوط به آن از جمله شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و طول، اطلاعات لازم برای مطالعات آماری فراهم می‌گردد.

۱-۳-۵ توزیع جهت‌داری

در ناحیه مورد مطالعه، شیب و جهت شیب درزه‌ها در توده سنگ آهک دولومیتی با روش برداشت خطی توسط شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس انجام شده است. جهات درزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری Dips 5.103 بر اساس تصویر استریوگرافی ناحیه‌های معادل پردازش شده و دسته درزه‌های اصلی برای توده سنگ آهک دولومیتی مشخص شده‌اند (شکل ۵-۱). تحقیقات قبلی نشان داده است که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند (Baecher et al., 1977). در این پایان‌نامه نیز، این توزیع‌ها برای جهات درزه به کار برده شده است. ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار Dips محاسبه شده و در جدول ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشمیت

۵-۳-۲ شدت درزه

چگالی حجمی درزه از مقادیر چگالی سطحی برداشت شده‌ی آن‌ها به دست آمده است. در این تحقیق، با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه‌های زیر، مقادیر مساحت متوسط درزه، قطر متوسط درزه و P_{32} برای هر دسته درزه به‌طور جداگانه محاسبه شده است.

$$P_{32} = \frac{N_T \cdot E(A)}{V} \quad (۱-۵)$$

که در رابطه ۵-۱ $E(A)$ مساحت متوسط درزه و V حجم بلوک و N_T تعداد درزه در واحد طول است و با کاربرد رابطه ۲-۵ با فرض دایره‌ای بودن درزه محاسبه می‌شود.

$$E(D) = \frac{128\mu_1^3}{3\pi^3(\mu_1^2 + \sigma_1^2)} \quad (۲-۵)$$

در رابطه ۲-۵ μ_1 متوسط طول درزه و σ_1 انحراف معیار طول دسته درزه است. نکات حائز اهمیت در این قسمت این است که مساحت متوسط درزه، مربع نصف $E(D)$ است.

۵-۳-۳ توزیع فاصله‌داری

بر اساس پیشینه مطالعات انجام شده، تابع توزیع چگالی احتمال نمایی منفی می‌تواند برای توزیع فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به کار رود. بر این اساس، در این تحقیق نیز، توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری به کار برده شده است.

۵-۳-۴ توزیع پایایی

به‌طور معمول برای توزیع پایایی درزه، سه تابع نمایی منفی، لاگ‌نرمال و گاما به کار برده می‌رود.

در این تحقیق، آزمون‌های بهترین برآزش کولموگروف-اسمینوروف^۱، آندرسون-دارلینگ^۲ و کای-سکویر^۳ برای توابع توزیع گاما، نمایی و لاگ‌نرمال به‌طور جداگانه انجام شده است. آزمون کولموگروف-اسمینوروف برای تشخیص فرضیه توزیع پیوسته به‌کار برده می‌شود. این آزمون بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی بنا نهاده شده است. نمونه‌های تصادفی x_1, x_2, \dots, x_n دارای توزیعی با تابع توزیع تجمعی $F(x)$ در نظر گرفته می‌شود. تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از رابطه ۳-۵ نشان داده می‌شود (Zadhesh et al, 2013):

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \cdot [\text{Number of observation} \leq x] \quad (3-5)$$

آماره کولموگروف-اسمینوروف (D) بر اساس بزرگترین اختلاف بین تابع توزیع تجمعی تئوری و تجربی به‌دست می‌آید.

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (4-5)$$

آزمون آندرسون-دارلینگ برآزش تابع توزیع تجمعی مشاهده شده را با تابع توزیع تجمعی مورد نظر مقایسه می‌کند. این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف-اسمینوروف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می‌دهد. آماره آندرسون-دارلینگ (A^2) به‌صورت رابطه ۵-۵، تعریف شده است (Zadhesh et al., 2013):

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (5-5)$$

آزمون کای دو برای آزمودن جامعه از کدام توزیع پیروی می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این

¹ Kolmogorov-Smirnov

² Anderson-Darling

³ Chi-Squared

آزمون بر روی داده‌های دسته‌بندی شده اعمال می‌شود، بنابراین مقدار آماره آزمون به چگونگی دسته‌بندی بستگی دارد. آماره کای_سکویر (χ^2) مطابق رابطه ۵-۶، تعریف شده است (Zadhesh et al., 2013).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (6-5)$$

که در آن O_i فراوانی مشاهده شده دسته i و E_i فراوانی مورد انتظار است که از رابطه ۵-۶ محاسبه می‌شود (Zadhesh et al., 2013):

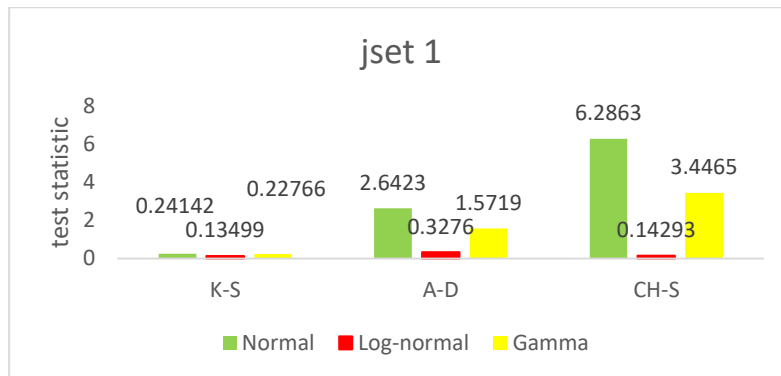
$$E_i = F(x_2) - F(x_1) \quad (7-5)$$

که در آن $F(x)$ تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال تحت آزمون x_1 و x_2 ، کران‌های دسته هستند (Zadhesh et al., 2013).

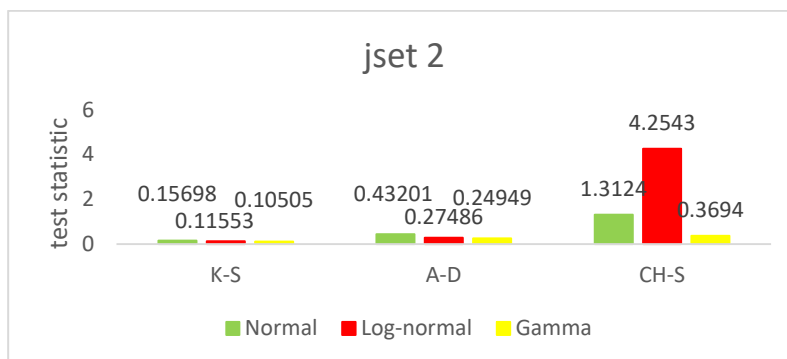
در سطح اعتماد مشخص (α) اگر مقدار آماره آزمون‌های کولموگروف_اسمینوروف (D)، آندرسون_دارلینگ (A^2) و کای_سکویر (χ^2) از مقدار بحرانی آن‌ها بیشتر باشد، فرضیه شکل توزیع رد خواهد شد. از مقادیر α برابر ۰٫۰۱ و ۰٫۰۵، معمولاً برای ارزیابی فرض تهی در سطح اعتمادهای مختلف استفاده می‌شود. در اغلب موارد، مقدار α برابر ۰٫۰۵ استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز از همین مقدار استفاده شده است. نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش در شکل ۵-۲ نشان داده شده است که در این نمودارها با استفاده از نرم‌افزار EasyFit تابع‌های برازش شده روی داده‌های طول خط اثر هر دسته درزه به دست آمده که با استفاده از نمودار شکل ۵-۲ هر کدام که مقدار کمتری را به خود اختصاص دهند به عنوان تابع برازش شده برای دسته درزه انتخاب می‌شوند که به عنوان مثال برای دسته درزه اول تابع توزیع لاگ نرمال اختصاص داده شده است. توابع توزیع برازش شده بر طول درزه‌ها در هر دسته درزه در شکل ۵-۳ نشان داده شده و مشخصات این توابع در جدول ۵-۱، بیان شده است.

جدول ۵-۱ ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های برداشت شده

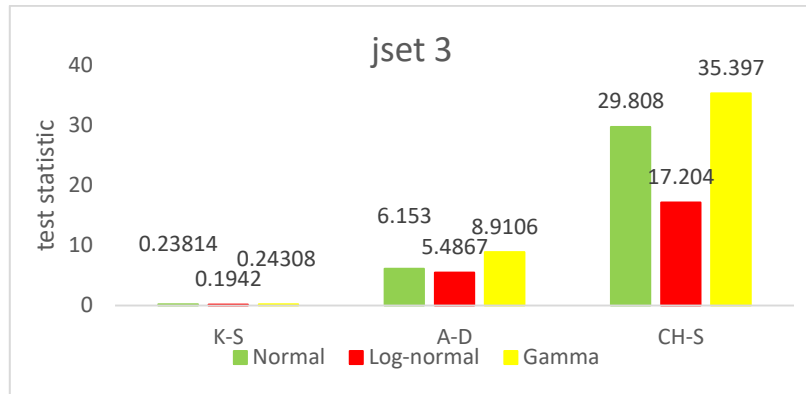
عوامل توزیع طول خط اثر			شدت، P_{32} (m^{-3})	P10 (m^{-1})	تعداد نسبی	ثابت فیشر	جهت دسته درزه‌ها (شیب/جهت شیب)
انحراف استاندارد (m)	متوسط (m)	نوع تابع					
۰,۴۷	۰,۵۶	لاگ نرمال	۰,۱	۰,۶۵	۲۶	۱۲,۷	دسته درزه ۱ (۲۴۰/۴۵)
۰,۱۵	۰,۳۸	گاما	۰,۰۷	۰,۴۷	۱۹	۲۱	دسته درزه ۲ (۱۳۵/۷۵)
۰,۱۶	۲,۷۲	لاگ نرمال	۲,۸۷	۲,۳۸	۹۵	۲۴,۶	دسته درزه ۳ (۳۳/۶۸)



الف) دسته درزه اول



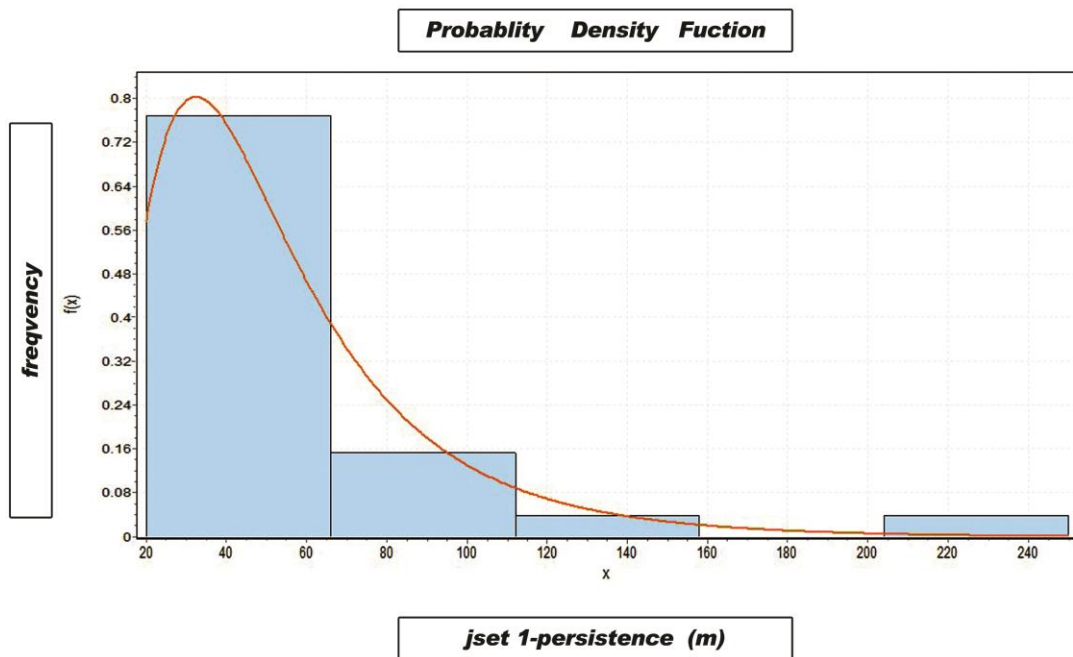
ب) دسته درزه دوم



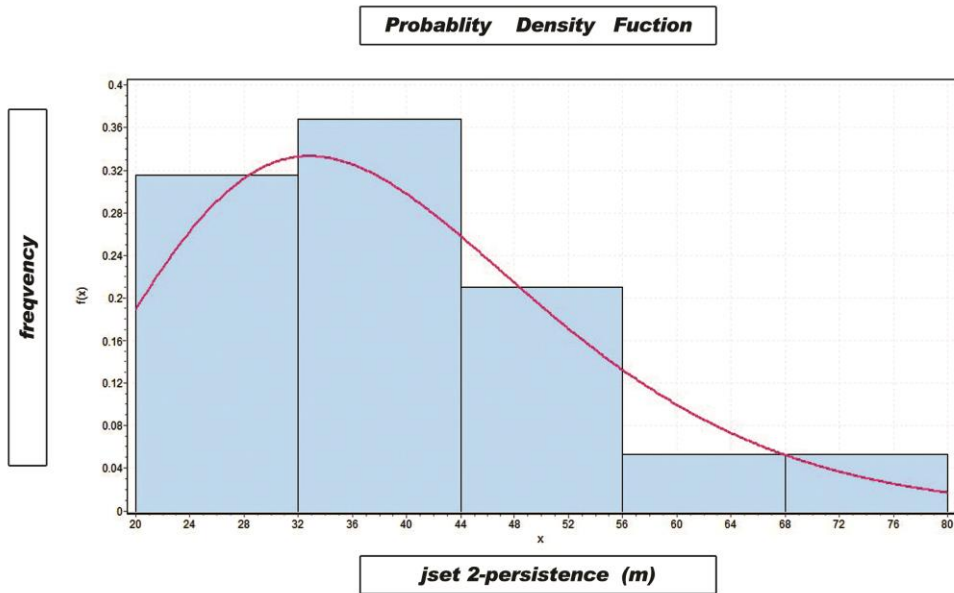
ج) دسته درزه سوم

شکل ۲-۵ نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش روی خط اثر درزه‌های هر دسته درزه

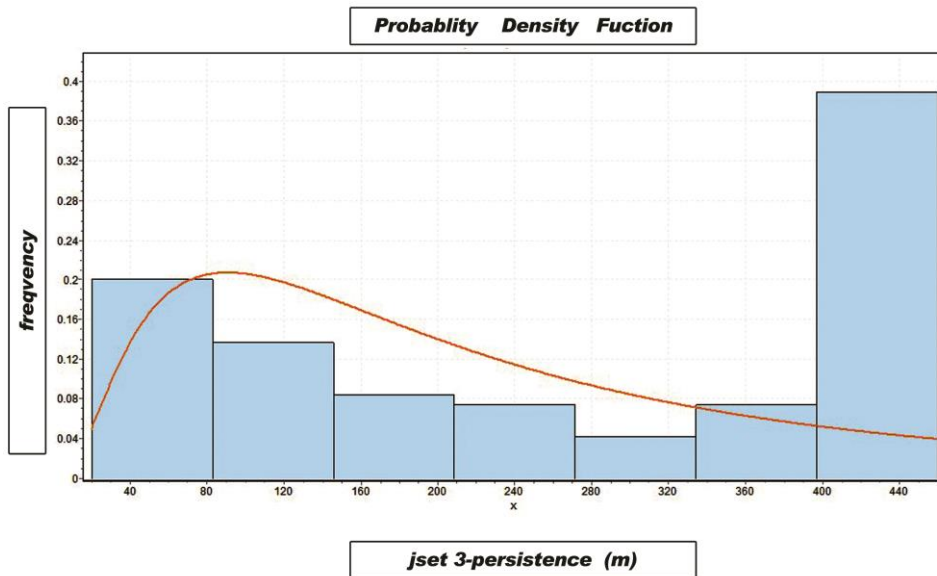
الف) دسته درزه اول



ب) دسته درزه دوم



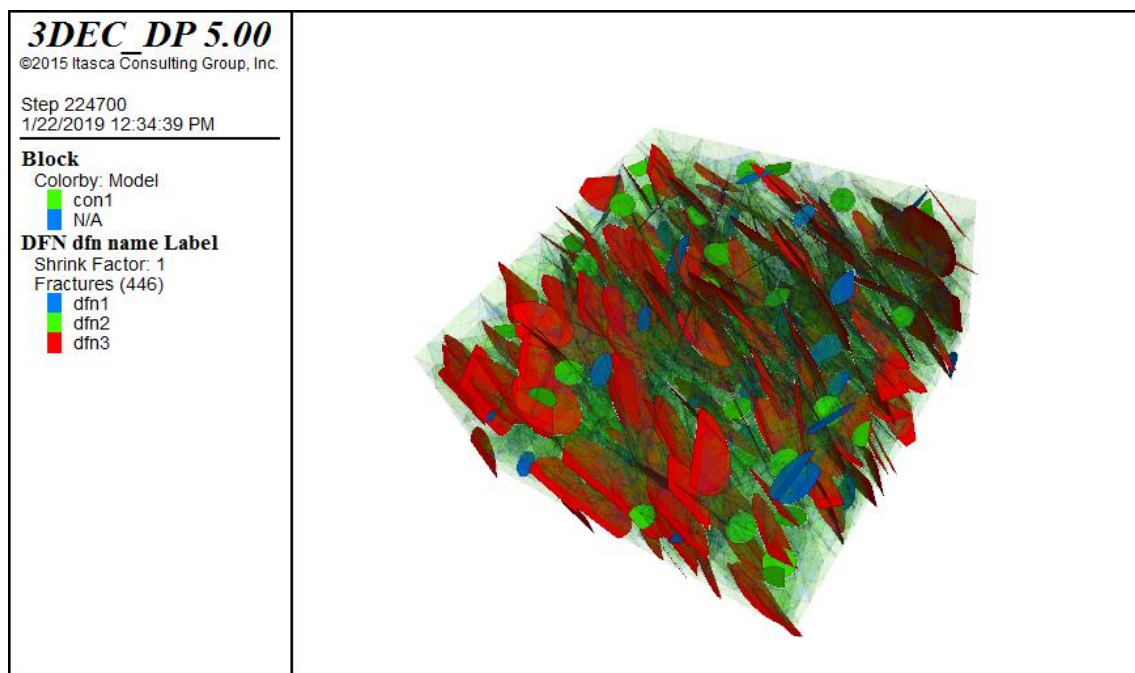
ج) دسته درزه سوم



شکل ۵-۳ تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های طول خط اثر برداشت شده

۴-۵ مدل DFN

در ساخت مدل DFN در نرم‌افزار 3DEC، جهت‌داری شکستگی‌ها شامل شیب و جهت شیب اندازه شکستگی‌ها، چگالی و شدت شکستگی که با عوامل P_{10} و P_{32} جایگزین فاصله‌داری یا فراوانی شکستگی‌ها می‌شوند و در آخر پارامتر بازشدگی که نقش تعیین‌کننده و مهمی در عبور جریان سیال در مدل‌ها را بر عهده دارد، به کار گرفته شده است. در نرم‌افزار 3DEC توزیع لاگ‌نرمال تعریف نشده است، لذا برای حل این مشکل، معادل‌سازی‌هایی روی توابع صورت گرفته است. به‌طور مثال، در مورد پایایی برخی از دسته درزه‌ها که از توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند، با لگاریتم‌گیری در مبنای عدد نپر به توزیع نرمال تبدیل شده است. در شکل ۴-۵، نمایی از مدل DFN شبیه‌سازی شده از منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۴-۵ مدل DFN تهیه شده از دسته درزه‌های منطقه سد رودبار لرستان

۵-۵ تخصیص ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی درزه‌ها و سیال به مدل

ویژگی‌های مکانیکی درزه‌ها که در مدل اعمال می‌شوند عبارتند از زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع، چسبندگی سطح درزه، سختی نرمال و سختی برشی. مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی سطح درزه‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوره ماده‌سنگ که بر اساس نتایج حاصل از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌هاب قدس، برآورد شده‌اند.

مقادیر سختی برشی و سختی نرمال توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$K_n = 2.86K_s \quad (۸-۵)$$

$$K_n = \frac{E_m E_r}{S(E_r - E_m)} \quad (۹-۵)$$

$$K_s = \frac{G_m G_r}{S(G_r - G_m)} \quad (۱۰-۵)$$

در روابط بالا، E_r مدول الاستیسیته سنگ بکر، S فاصله‌داری ناپیوستگی‌های توده سنگ، E_m تغییرشکل‌پذیری توده سنگ، G_r مدول برشی سنگ بکر و G_m مدول برشی توده سنگ است.

ویژگی‌های مکانیکی اعمال شده به دسته درزه‌ها در مدل عددی در جدول ۲-۵ و ویژگی‌های هیدرولیکی آب در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

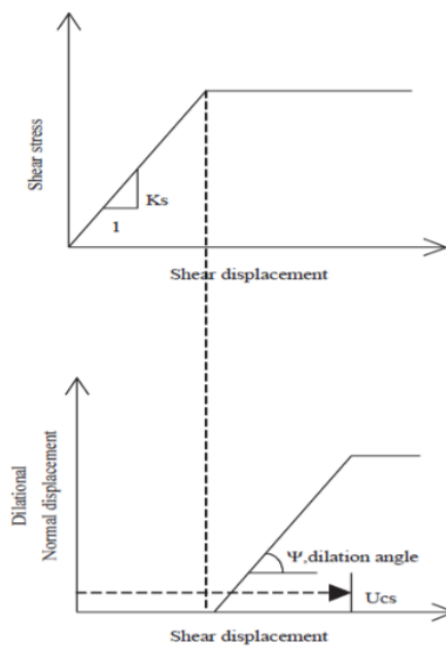
جدول ۲-۵ ویژگی‌های مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی (شرکت مهندسی مشاور مه‌هاب قدس، ۱۳۹۳)

مقدار	واحد	پارامتر	ردیف
۱۰	GPa/m	سختی نرمال	۱
۱۰	GPa/m	سختی برشی	۲
۳۲	degree	زاویه اتساع	۳
۳۶	degree	زاویه اصطکاک	۴
۰,۲	Mpa	چسبندگی	۵

جدول ۵-۳ خصوصیات آب تخصیص یافته به مدل عددی (Itasca,2013)

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	مدول بالک	Gpa	۲
۲	ویسکوزیته	Pa.s	۰,۰۰۱
۳	دانسیته	Kg/m ³	۱۰۰۰

برای مدل‌سازی رفتار برشی و اتساعی درزه‌ها، از مدل رفتاری برشی الاستیک-کاملاً پلاستیک^۱ با معیار گسیختگی مور-کلمب^۲ استفاده شده است. در این مدل رفتاری با شروع جابجایی برشی درزه، اتساع در درزه اتفاق می‌افتد. اتساع درزه تا رسیدن به مقدار پیش تعریف‌شده‌ی جابجایی برشی بحرانی (U_{cs})، ادامه پیدا می‌کند و پس از آن اتساع درزه متوقف می‌شود (شکل ۵-۵). نکته‌ی حائز اهمیت این است که، چنانچه زاویه اتساع درزه در تحلیل عددی صفر فرض شود به‌نوعی سطح درزه‌ها در مدل صاف فرض شده و این خود از دقت تحلیل می‌کاهد.



شکل ۵-۵ رفتار برشی و اتساع درزه‌ها (الف) رابطه‌ی تنش برشی - جابجایی (K_s معرف صلبیت برشی درزه) (ب) رابطه‌ی اتساع برشی-جابجایی برشی (Min K. B, 2004)

¹ Elastic-Perfect Plastic shear behavior

² Mohr-Coulomb failure criteria

۵-۶ اعمال شرایط مرزی به مدل

سنگ‌ها در اعماق زمین تحت تاثیر تنش‌هایی هستند که ناشی از وزن طبقات فوقانی است. برای طراحی حفريات زیرزمینی اطلاع از جهت و بزرگی این تنش‌ها بسیار مهم است. برای اعمال تنش‌های برجای زمین از شرایط اولیه در مدل‌سازی کمک گرفته می‌شود. در حالت ایده‌آل اطلاعات از تنش برجا را می‌توان با ابزارهایی (مانند جک تخت وشکست هیدرولیکی و...) اندازه‌گیری و مقدار عددی آن را به دست آورد ولی در زمانی که اندازه‌گیری سر زمین مقدور نیست با استفاده از عمق سازه و عوامل ژئوتکنیکی زمین می‌توان تنش‌ها را برآورد کرد.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (11-5)$$

در رابطه ۵-۱۱، σ_v تنش عمودی بر حسب Pa، γ وزن مخصوص طبقات بالایی بر حسب N/m^2 و z عمق از سطح زمین (m) است.

تخمین تنش افقی^۱ بسیار دشوارتر از تنش عمودی است. در حالت طبیعی میانگین تنش افقی وابسته به تنش عمودی است. ضریب k (نسبت تنش افقی به تنش عمودی) به صورت رابطه زیر بیان می‌شود. برای k روابطی وجود دارد که در جدول ۵-۴ مشاهده می‌شود (Still and palmstrom, 2008):

$$\sigma_{have} = k \sigma_v = k \lambda z \quad (12-5)$$

در مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق، مقدار k برابر با ۰,۹ در نظر گرفته شده است. این مقدار در گزارش ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه ارایه شده است. ارتفاع روباره در مدل اینکه تزریق از درون

¹ Horizontal stress

گالری انجام می‌شود، نسبت به سطح زمین، ۴۳۶ متر قرار داده شده است. آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است و روبراه در حالت خشک فرض شده است. پس از اختصاص دادن عوامل مکانیکی به درزه-ها، می‌بایست شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی به مدل‌ها اعمال گردد.

تحلیل هیدرومکانیکی در دو مرحله انجام می‌شود: در مرحله‌ی نخست می‌بایست، برای به دست آوردن حالت تغییر شکل یافته‌ی مدل‌ها در اثر اعمال تنش‌ها، تحلیل مکانیکی شود. سپس با انجام تحلیل هیدرومکانیکی مقدار طول نفوذپذیری به دست می‌آید. این معادلات با استفاده از یک الگوریتم تکرارشونده و با در نظر گرفتن شرایط مرزی اختصاص یافته به مدل، حل می‌شوند (Thoraval and Renaud, 2003).

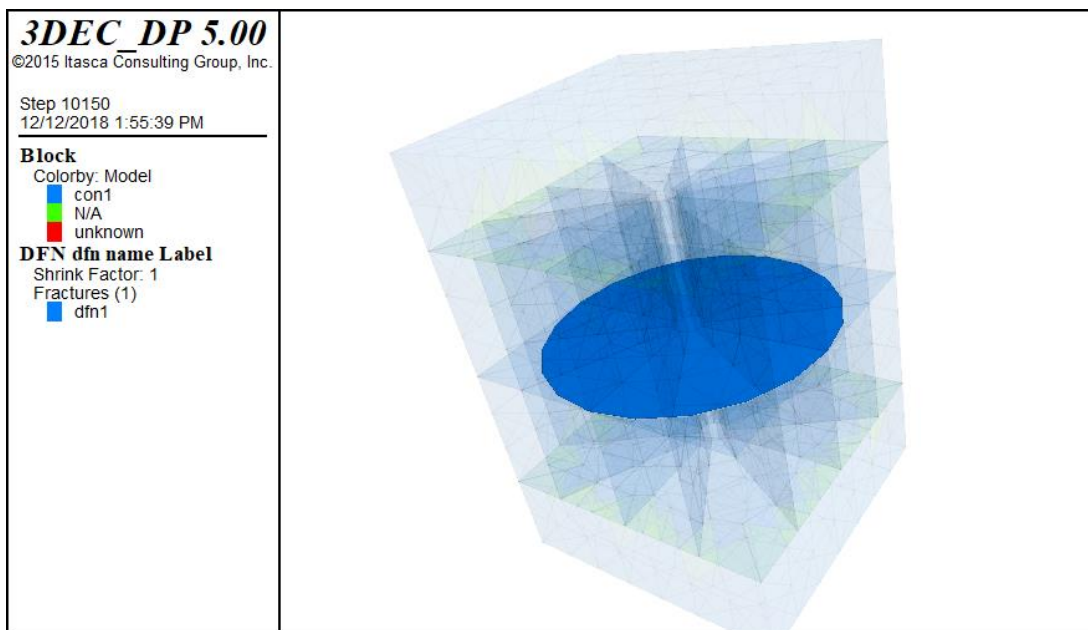
جدول ۴-۵ روابط تجربی برای تعیین مقدار k (Hudson,2005)

ردیف	مرجع	محل و محدوده عمق (متر)	رابطه تجربی (K)
۱	هموک و براون (۱۹۸۰)	گستره جهانی صفر تا ۳۰۰	$0.3 + \frac{100}{Z} < K < 0.5 + \frac{1500}{Z}$
۲	ون هیردن (۱۹۷۶)	آفریقای جنوبی صفر تا ۲۵۰	$K = 0.448 + (248/Z)$
۳	لی (۱۹۸۶)	چین صفر تا ۵۰۰	$0.3 + 100/Z < K < 0.5 + 440/Z$
۴	رومل (۱۹۸۶)	گستره جهانی ۵۰۰ تا ۳۰۰	$0.5 + \frac{150}{Z} < K < 0.98 + \frac{250}{Z}$
۵	هرگت (۱۹۸۷)	کانادا صفر تا ۲۰۰	$0.66 + \frac{72}{Z} < K < 1.3 + \frac{110}{Z}$
۶	ترزاقی و ریچارت (۱۹۵۲)		$K = \frac{v}{1-v}$
۷	شنوری (۲۰۰۱)		$K = 0.33 + 9.5Eh (0.001 + \frac{1}{Z})$

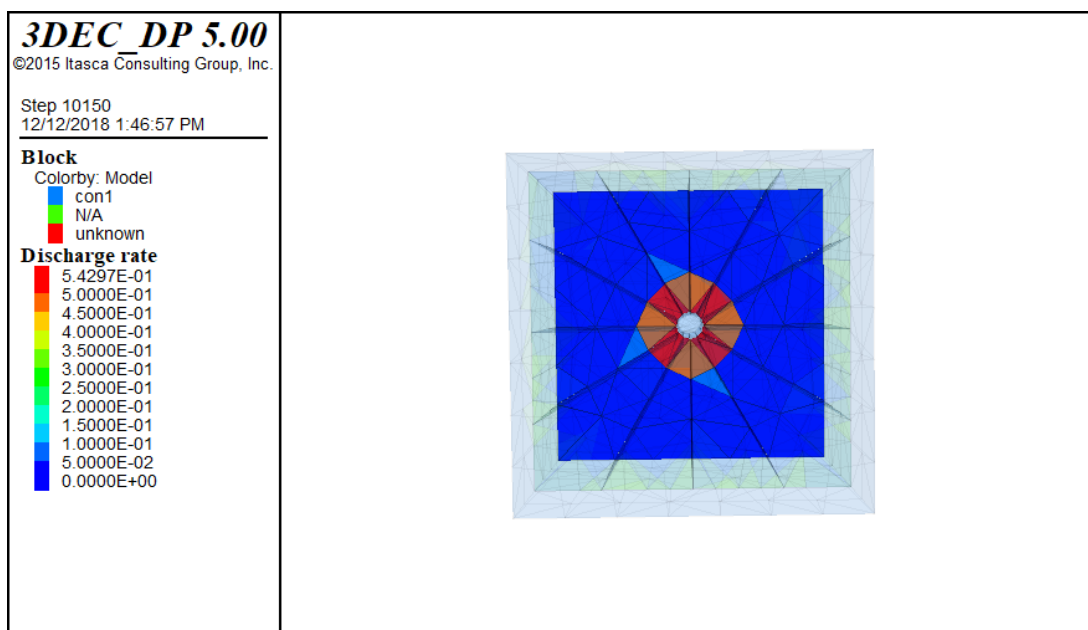
۷-۵ اعتبارسنجی

در ابتدا با استفاده از مدل‌های یک درزه و دو درزه و سه درزه به بررسی تحلیل میزان دبی خروجی پرداخته شده است. در بسیاری از تحقیق‌های انجام شده با موضوع‌های مرتبط، پلات خروجی نرخ تخلیه^۱ از نرم‌افزار 3DEC به‌عنوان میزان دبی خروجی در نظر گرفته شده است که با بررسی‌های صورت گرفته روی مدل‌های کوچک با ابعاد دو متر در دو متر در سه متر، به‌صورت شفاف می‌توان دید که تعریف این پلات از نرخ تخلیه، بیشینه مقدار نرخ خروجی سیال از گمانه در یک صفحه درزه در کل مدل است. به عبارت دیگر اگر تعداد دو یا سه درزه تا N درزه هم در مدل وجود داشته باشد با فشار ثابت جریان را به داخل گمانه تزریق کنیم (با هر شیب و جهت شیب و اندازه و ... و با بازشدگی ثابت برای تمامی درزه‌ها)، بیشینه مقدار نرخ تخلیه تنها در یک صفحه درزه را به‌عنوان نرخ خروجی معرفی می‌کند. به طور مثال؛ در شکل‌های ۵-۶ تا ۵-۸، تمامی ویژگی‌های توده سنگ و درزه یکسان می‌باشد، فقط تعداد درزه‌ها افزایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در فشار ثابت مقدار نرخ تخلیه در تمامی مدل‌ها یکسان است، اما در واقع هر چه تعداد درزه متقاطع با چال مرکزی بیشتر باشد نرخ تخلیه در فشار ثابت باید افزایش یابد. بنابراین استفاده از نرخ تخلیه به منظور تخمین تانسور نفوذپذیری، آب‌گذری و دبی از یک توده سنگ درزه‌دار جایز نیست. لازم است نرخ خروجی سیال از گمانه از طریق کدنویسی در نرم‌افزار محاسبه شود.

¹ Discharge rate

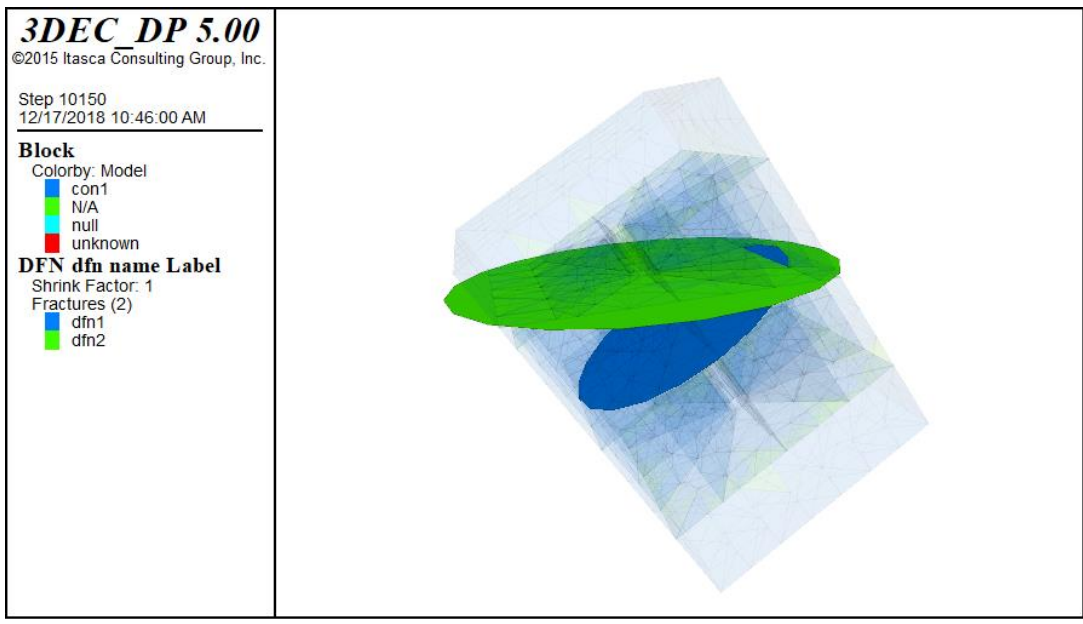


(۱)

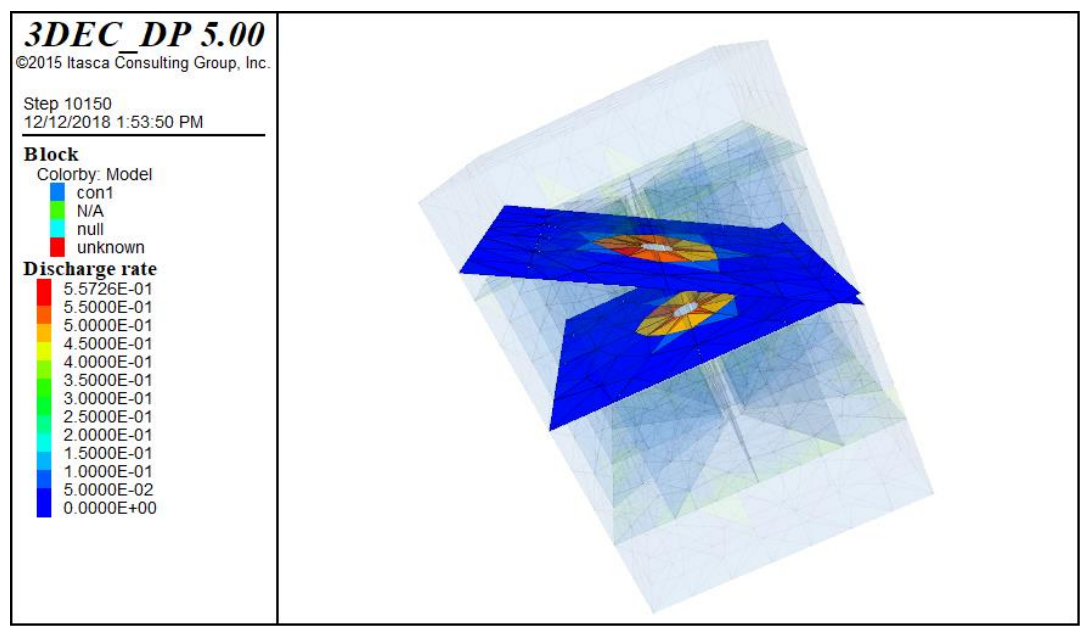


(۲)

شکل ۵-۶ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل یک درزه

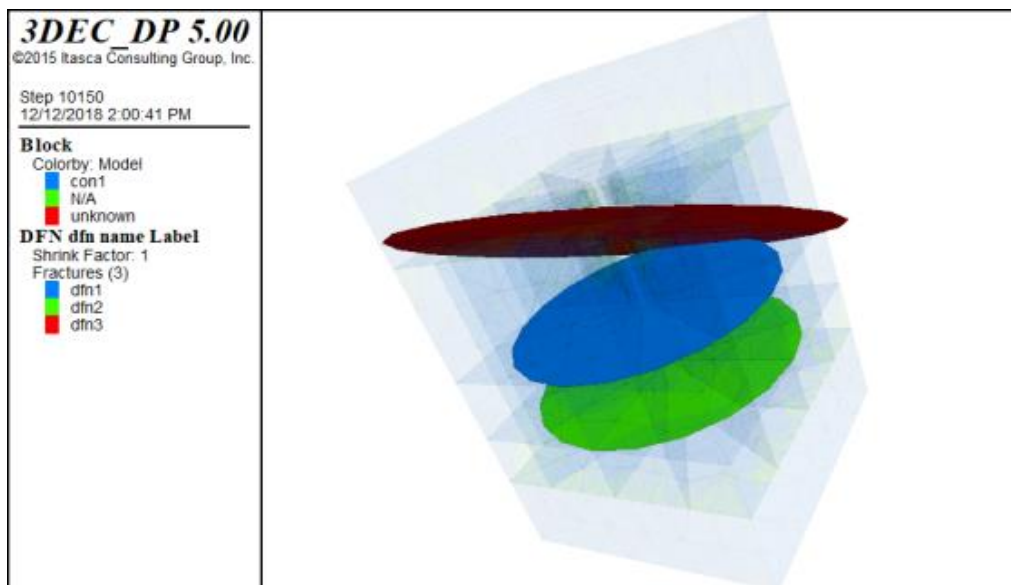


(۱)

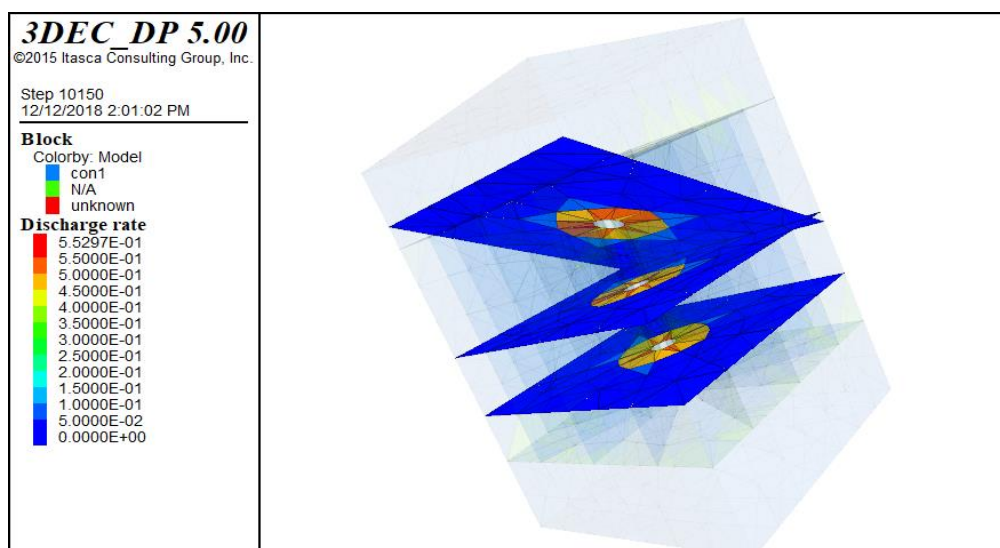


(۲)

شکل ۵-۷ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل دو درزه



(۱)



(۲)

شکل ۵-۸ مقدار نرخ تخلیه در توده سنگ شامل سه درزه

همانطور که در قسمت‌های قبل گفته شد، آزمایش لوژان انجام شده در طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان مقدار ۹,۶ را نشان می‌دهد که با استفاده از رابطه‌ی لوژان (۲-۳۸)، مقدار دبی (Q) در فشار ثابت ۲۲ بار برابر ۰,۰۲۶ مترمکعب بر ثانیه به دست می‌آید.

به منظور محاسبه دبی حجمی خروجی سیال از گمانه در این تحقیق، از رابطه‌ی ۵-۱۳ استفاده شده است.

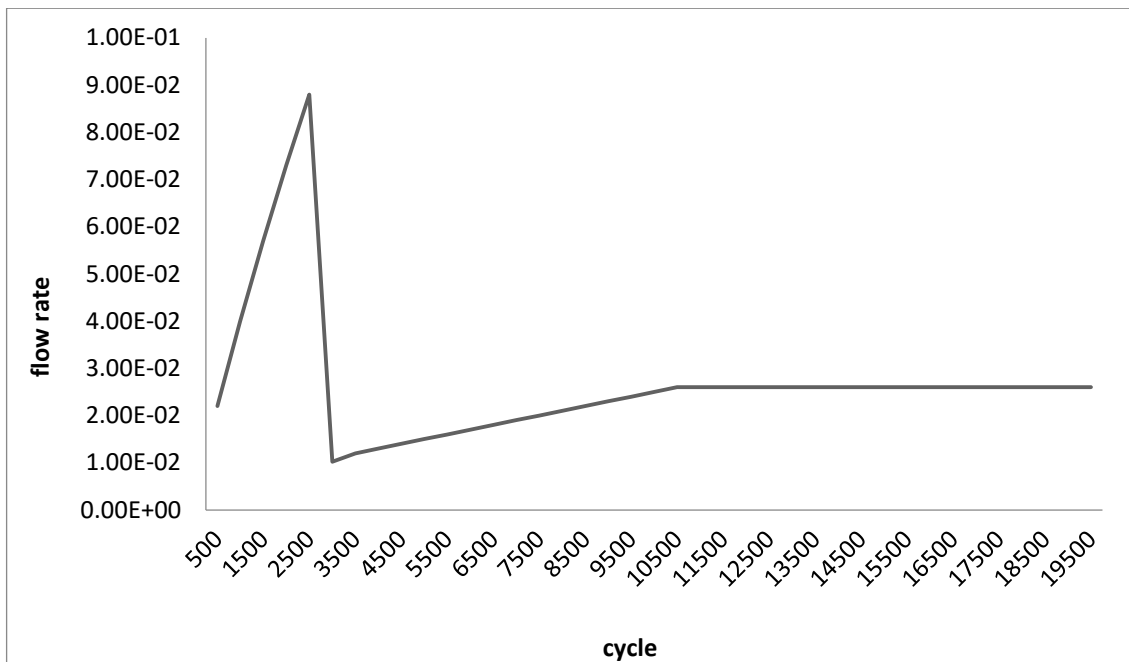
$$Q = \frac{fl - rate}{n \times l \times P_{10}} \quad (5-13)$$

در رابطه ۵-۱۳ fl-rate نرخ خروجی سیال از گمانه که برابر مجموع نرخ‌های جریان تمامی قطاع‌های یک صفحه درزه یا صفحه جریان است و با کدنویسی در نرم‌افزار محاسبه شده است. n تعداد تقسیمات یا قطاع‌های هر صفحه درزه در اطراف گمانه است که به عنوان مثال در شکل ۴-۱۱، این مقدار برابر با ۱۲ است. L طول گمانه و P_{10} شدت یک بعدی درزه (تعداد درزه‌های قطع شده با گمانه در یک متر طول گمانه) است.

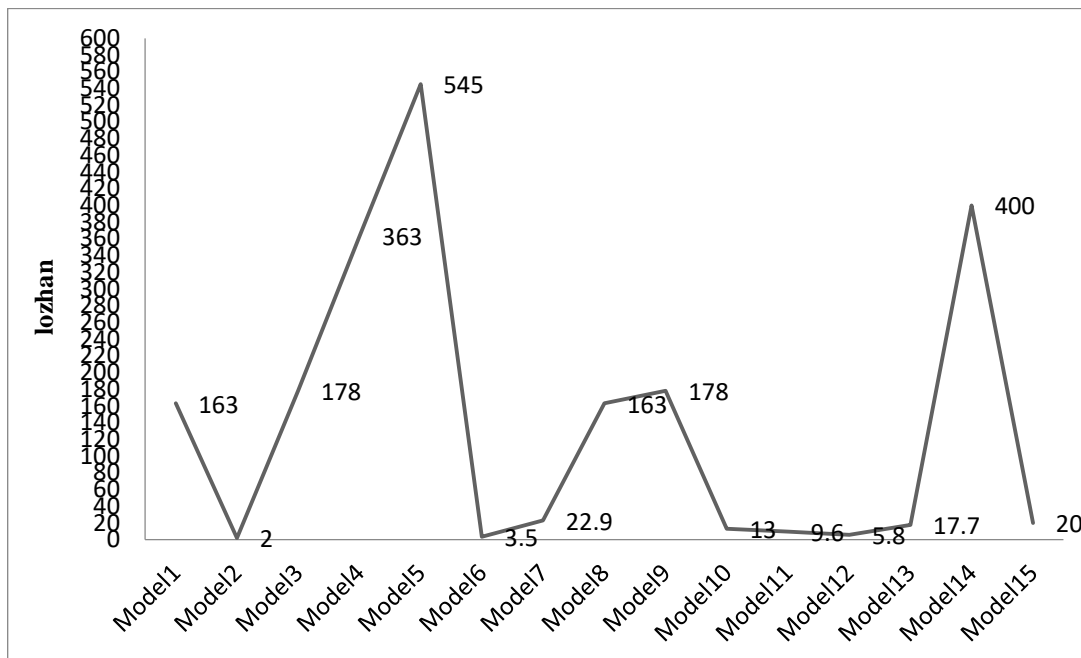
این پژوهش با کامپیوتر سوپر ماکرو، ۲۴ هسته، CPU 3.00GHz، RAM 64.0 GB، انجام شده است که هر ۵۰۰ دوره گردش یک روز به طول می‌انجامد. با توجه به مدل‌سازی توامان هیدرومکانیکی نیاز به زمان اجرا بالا دارد، ضروری است نسبت به تعداد دوره گردش تحلیل حساسیت انجام شود. همان‌طور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است، پس از ۱۰۵۰۰ دوره گردش، مقدار نرخ جریان ثابت می‌شود. لذا تعداد ۱۰۵۰۰ دوره گردش به عنوان تعداد بهینه انتخاب می‌شود.

تعداد ۱۵ مدل با ابعاد $15 \times 15 \times 7$ با فشار ثابت ۲۲ بار و با ویژگی‌های سیال آب برای دستیابی به دبی $0,026$ مترمکعب بر ثانیه یا لوژان ۹,۶ ساخته شده است که با تغییرات پارامتر بازشدگی تحلیل حساسیت شده‌اند. نتایج تحلیل‌های جریان به شرح زیر در شکل ۵-۱۰ و جدول ۵-۵، آورده شده است. مدل ساخته شده با ابعاد $15 \times 15 \times 7$ مترمکعب با گمانه مرکزی ۶ متر در شکل ۵-۱۲، نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج، مدل ۱۱ با دبی $0,026$ مترمکعب بر ثانیه، به عنوان مدل

اعتبارسنجی شده و مبنا برای آزمایش‌های تزریق بعدی در نظر گرفته شده است. تاریخچه‌ی نیروهای نامتعادل مدل اعتبارسنجی شده در شکل ۵-۱۱، نمایش داده شده است.

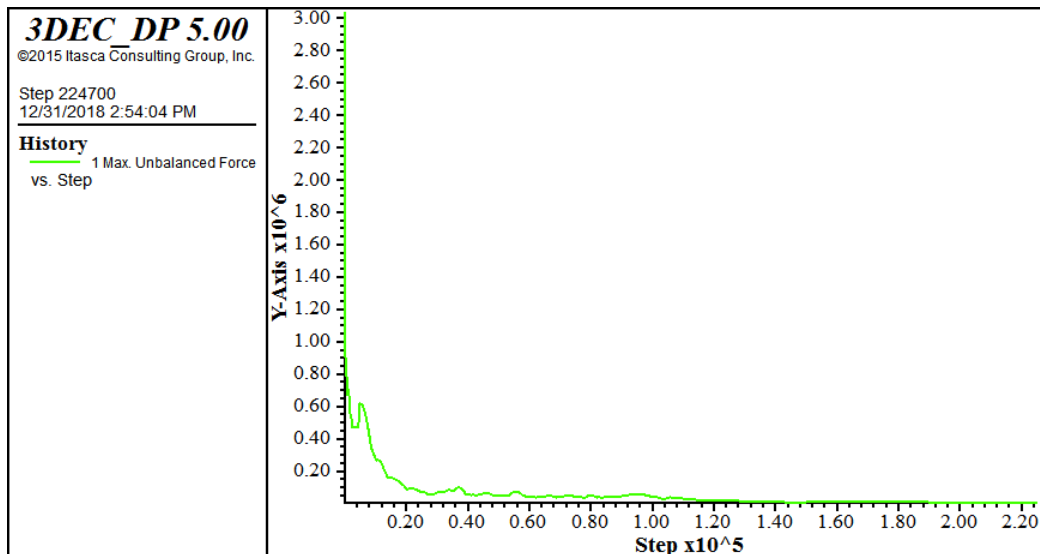


شکل ۵-۹ تحلیل حساسیت نسبت به دوره گردش



شکل ۵-۱۰ اعتبارسنجی مدل عددی

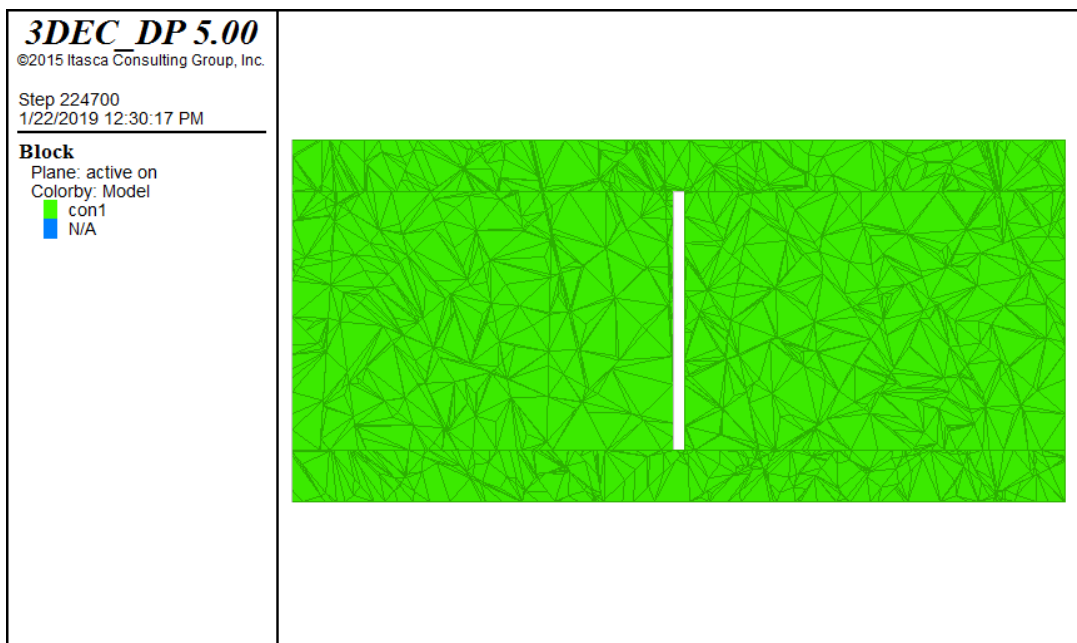
خروجی‌های گرفته شده از این مدل اعتبارسنجی شده به شرح زیر است.



شکل ۵-۱۱ تاریخچه نیروهای نامتعادل مدل اعتبارسنجی شده

جدول ۵-۵ نتایج تحلیل‌های جریان بر حسب بازشدگی درزه

بازشدگی درزه (متر)		مدل
مقدار متوسط	انحراف معیار	
۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۰۴	۱
۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۰۴	۲
۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۵	۳
۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۶	۴
۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۰۷	۵
۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۴۵	۶
۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۵	۷
۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۵	۸
۰,۰۰۰۵۹	۰,۰۰۰۵	۹
۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۰۲	۱۰
۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۵۵	۱۱
۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۵	۱۲
۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۰۶۵	۱۳
۰,۰۰۰۷	۰,۰۰۰۵	۱۴
۰,۰۰۰۶۸	۰,۰۰۰۶۲	۱۵



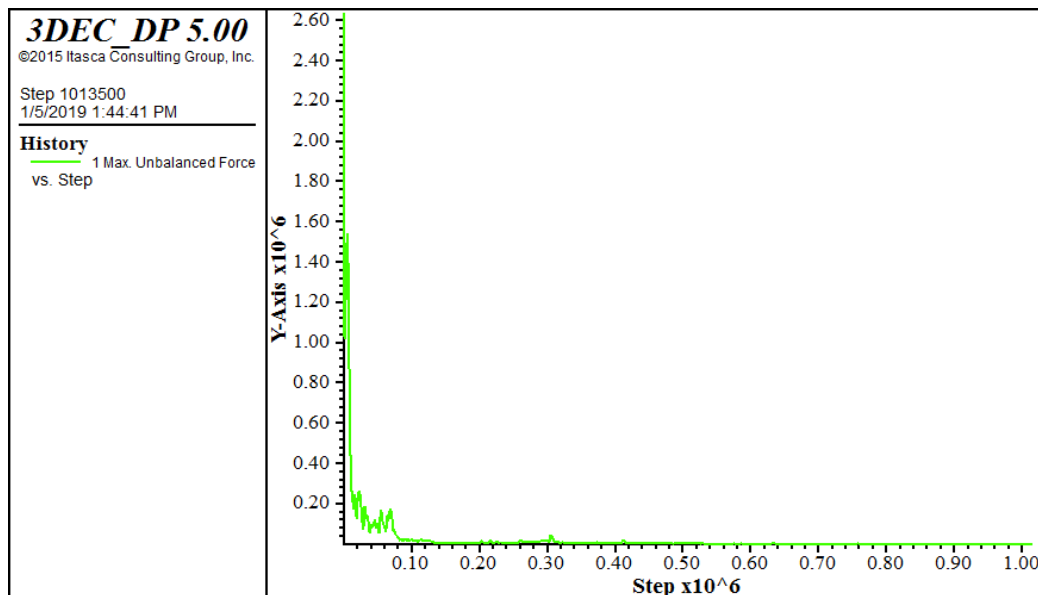
شکل ۵-۱۲ مدل عددی آزمایش لوژان

۵-۸ مدل سازی عملیات تزریق

پس از ساخت و اعتبارسنجی مدل به ابعاد $15 \times 15 \times 7$ مترمکعب، سه عدد چال تزریق با آرایش مثلثی به فاصله‌ی ۳ متر از یکدیگر با شعاع ۱۰ سانتی‌متر بنابر اطلاعات موجود در گزارش شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، در مدل وارد شده است. قبل از حفاری چال‌های تزریق لازم است تعادل اولیه مدل با محاسبات مکانیکی و با شرایط تنش برجا انجام شود. میزان تنش وارد به مدل با توجه به بار روباره شبیه‌سازی شده است، تاریخچه نیروهای نامتعادل و به تعادل رسیدن مدل در این مرحله در شکل ۵-۱۳، نشان داده شده است.

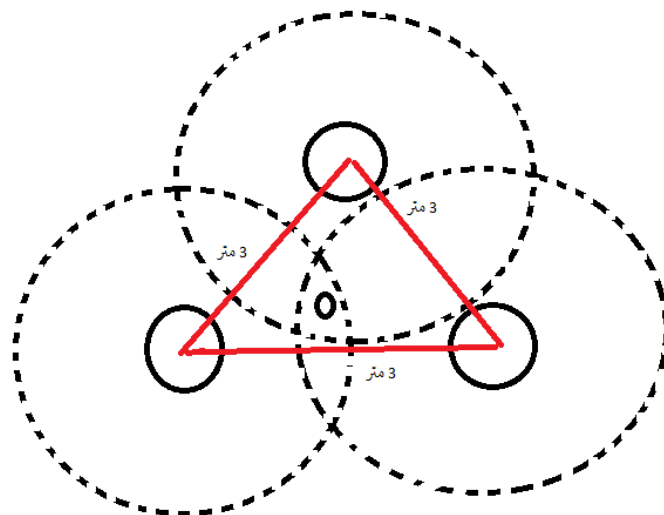
بعد از حفر چال‌های تزریق و تعیین مشخصات دوغاب شامل چگالی، ویسکوزیته و مدول بالک، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH در محیط نرم‌افزار 3DEC، تزریق سیال دوغاب با فشار به درون گمانه تحت اندرکنش هیدرومکانیکی توده سنگ اجرا شده است. برای تزریق سیال به چال‌های

حفاری شده در هر مدل، ۰,۵ متر ابتدا و انتهای هر چال برای شبیه‌سازی پکر نفوذناپذیر تعریف شده است، سبب می‌شود که تزریق دوغاب به درون توده سنگ در طول ۵ متر از گمانه انجام شود.



شکل ۵-۱۳ تاریخچه نیروهای نامتعادل قبل از حفاری چال‌های تزریق

شکل شماتیکی از نقشه چال‌های تزریق و چال کنترلی و پیش‌بینی شعاع تاثیر دوغاب در شکل ۵-۱۴، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۴ شماتیکی از شعاع تاثیر دوغاب در تزریق

باتوجه به گزارش شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس براي ويژگي‌هاي دوغاب تزريقي فقط نسبت آب به سيمان برابر ۳ ذکر شده و مشخصات آن بيان نشده است، لذا لازم است اين مشخصات تعيين شوند. با بررسي‌هاي صورت گرفته ويژگي‌هاي دوغاب با نسبت‌هاي مختلف آب به سيمان، همانطور که در جدول ۵-۶، نشان داده شده است، به دست آمد.

جدول ۵-۶ ويژگي‌هاي دوغاب با نسبت‌هاي مختلف آب به سيمان (saeidi et al, 2013)

مدول بالک (Gpa)	چگالي (kg/m ³)	ويسکوزيته (pa.s)	نسبت آب به سيمان	ردیف
۲۷	۱۸۷۰	۰,۰۴۴	۰,۴	۱
۲۵	۱۸۰۰	۰,۰۳۳	۰,۴۵	۲
۲۱	۱۷۷۰	۰,۰۲۵	۰,۵	۳
۱۲	۱۶۵۰	۰,۰۲	۰,۶	۴
۷	۱۵۹۰	۰,۰۱۲	۰,۷	۵
۳	۱۴۵۰	۰,۰۰۷	۱	۶

براي دستيابي به ويژگي‌هاي دوغاب شامل مدول بالک، ويسکوزيته و چگالي با نسبت آب به سيمان ۳، همانطور که در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است، از روش برازش منحنی بر داده‌هاي جدول ۵-۷ و تخمين ويژگي‌هاي دوغاب استفاده شده است.

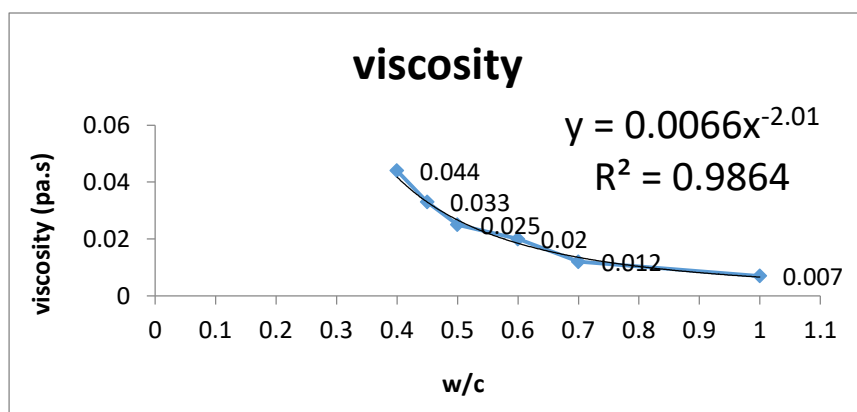
ويژگي‌هاي برآورد شده‌ي دوغاب با نسبت آب به سيمان ۳ در جدول ۵-۷، ارايه شده است. در مدل-هاي عددي اين ويژگي‌ها به کار برده شده است.

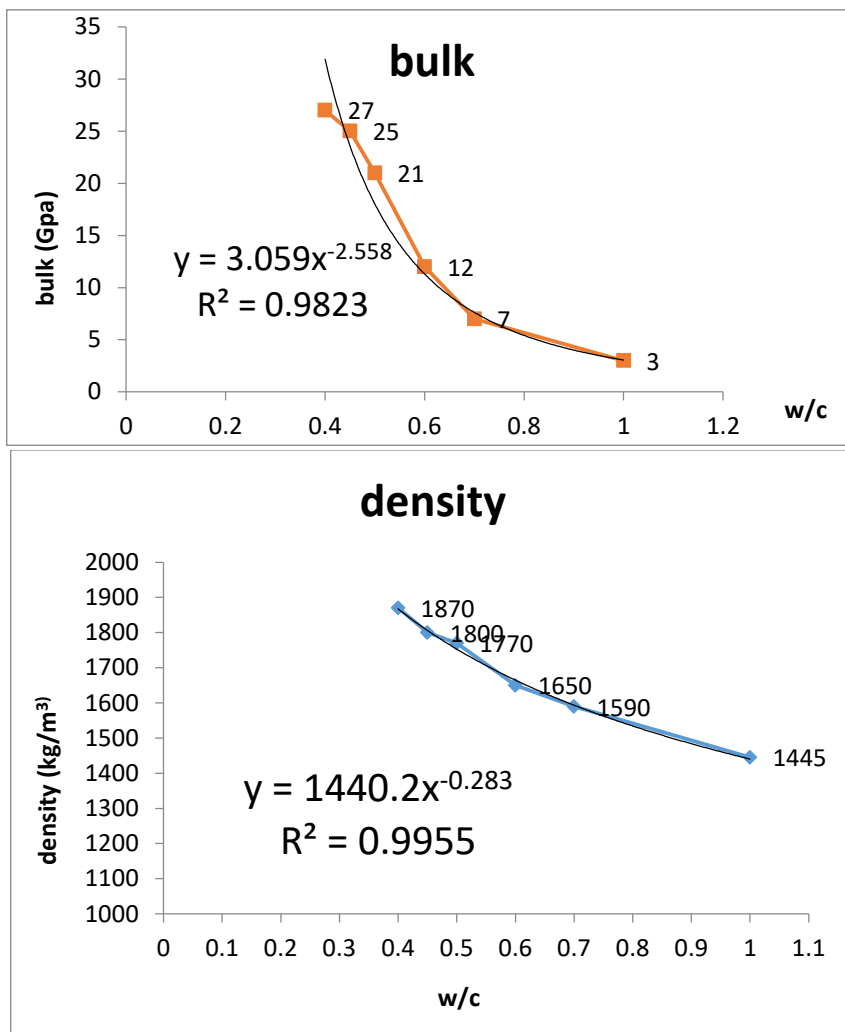
جدول ۵-۷ ويژگي‌هاي دوغاب استفاده شده در تزریق

مدول بالک (Gpa)	چگالي (kg/m ³)	ويسکوزيته (pa.s)	نسبت آب به سيمان	ردیف
۰,۱۸	۱۰۵۵	۰,۰۰۰۷۲۵	۳	۱

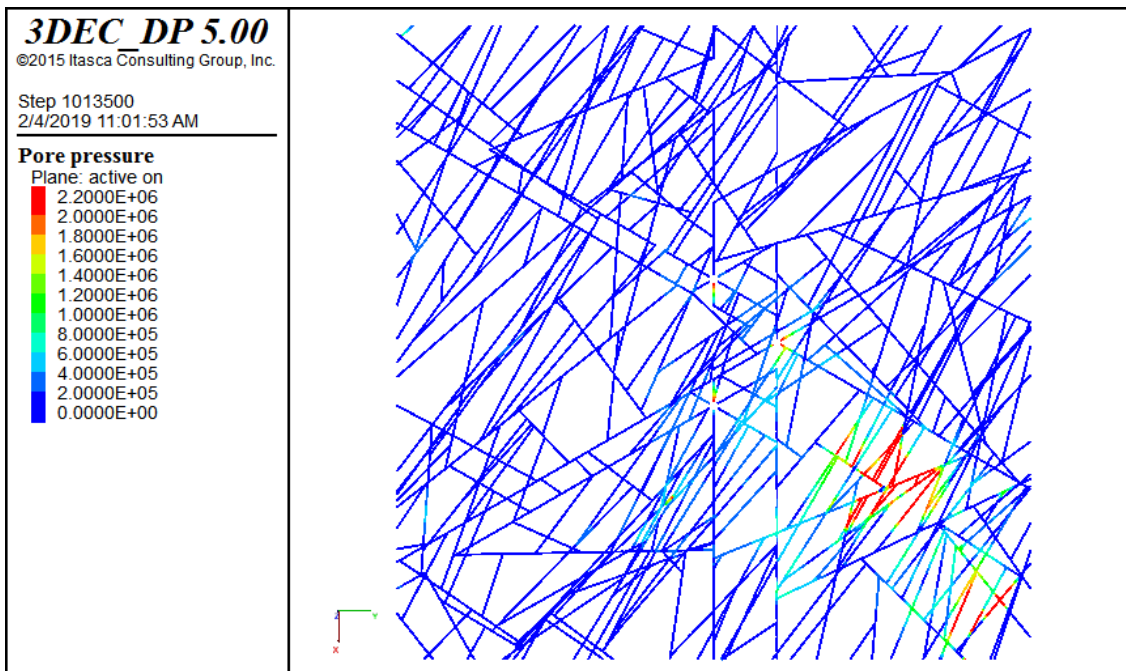
به طور کلی زمان تزریق دوغاب داخل گمانه‌های تزریق بر اساس فشار تزریق، ویسکوزیته و درزه-داری سنگ تعیین می‌شود. بر اساس دستورالعمل اجرایی شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، در خصوص مطالعه موردی طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان، تزریق دوغاب تا زمانی اجرا می‌شود که میزان خوردن دوغاب در هر متر گمانه از یک مقدار مشخص (یک یا دو لیتر بر دقیقه) کمتر باشد. با توجه به مشاهدات میدانی تزریق دوغاب گاهی مواقع تا یک ساعت نیز ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق نیز مدت زمان تزریق دوغاب در مدل عددی بر حسب پیشروی نفوذ دوغاب تعیین می‌شود. در صورتی که نفوذ بیشتری در طی زمان اجرای مدل مشاهده نشود، عملیات تزریق خاتمه می‌یابد.

هدف اصلی در مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق به دست آوردن میزان انتشار دوغاب تزریق شده است. میزان نفوذ دوغاب بر اساس مدل‌سازی‌های عددی انجام شده برای مورد مطالعاتی سد رودبار لرستان در شکل ۵-۱۷ برای هر تراز ارتفاعی نشان داده شده است. در ابتدای شروع تزریق از دور گمانه آغاز می‌شود و شروع به نفوذ در درون درزه‌ها می‌کند و به همین دلیل در هر تراز یک خط جریان دیده می‌شود وجود درزه‌داری پیچیده منطقه است.

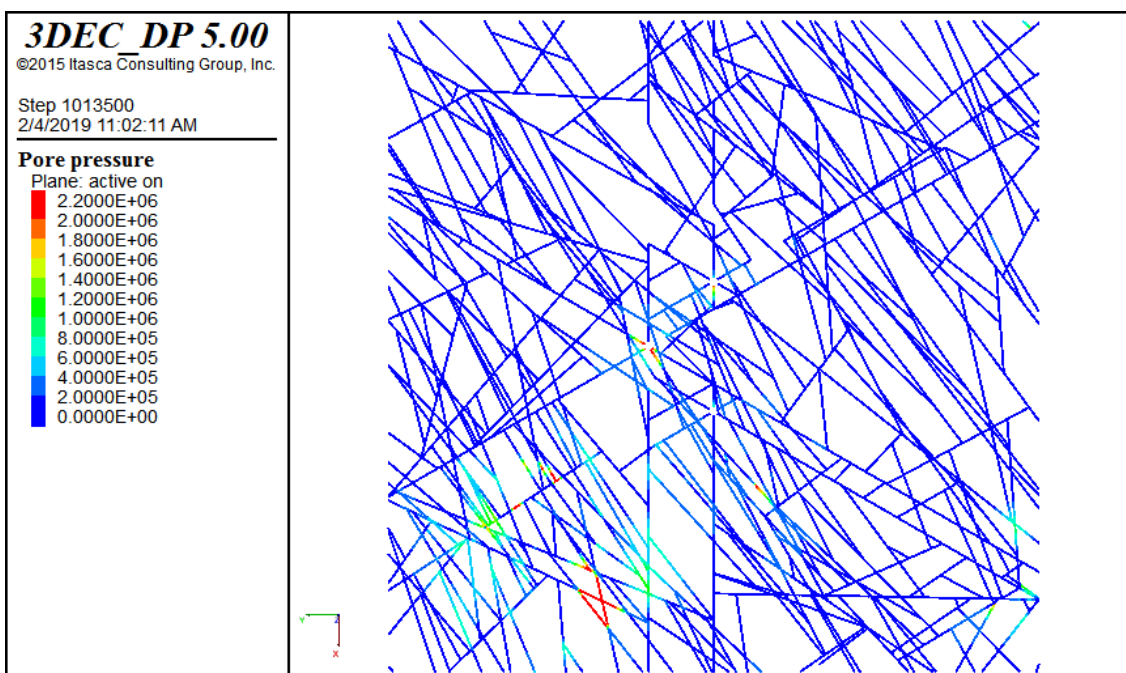




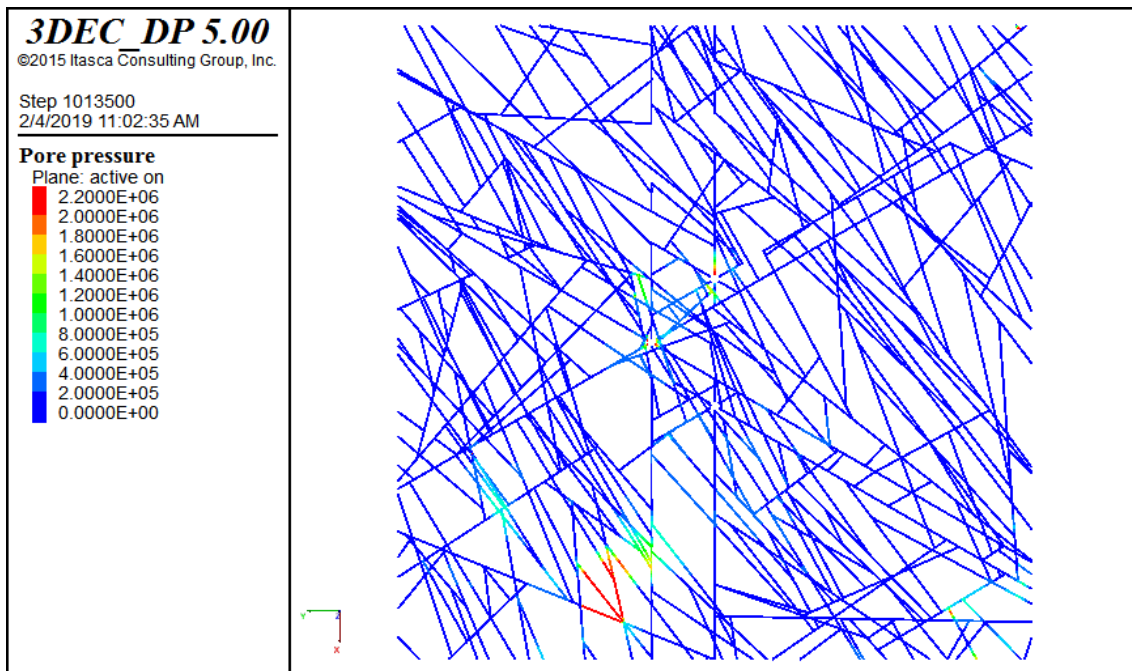
شکل ۵-۱۶ برازش منحنی داده‌های نسبت آب به سیمان



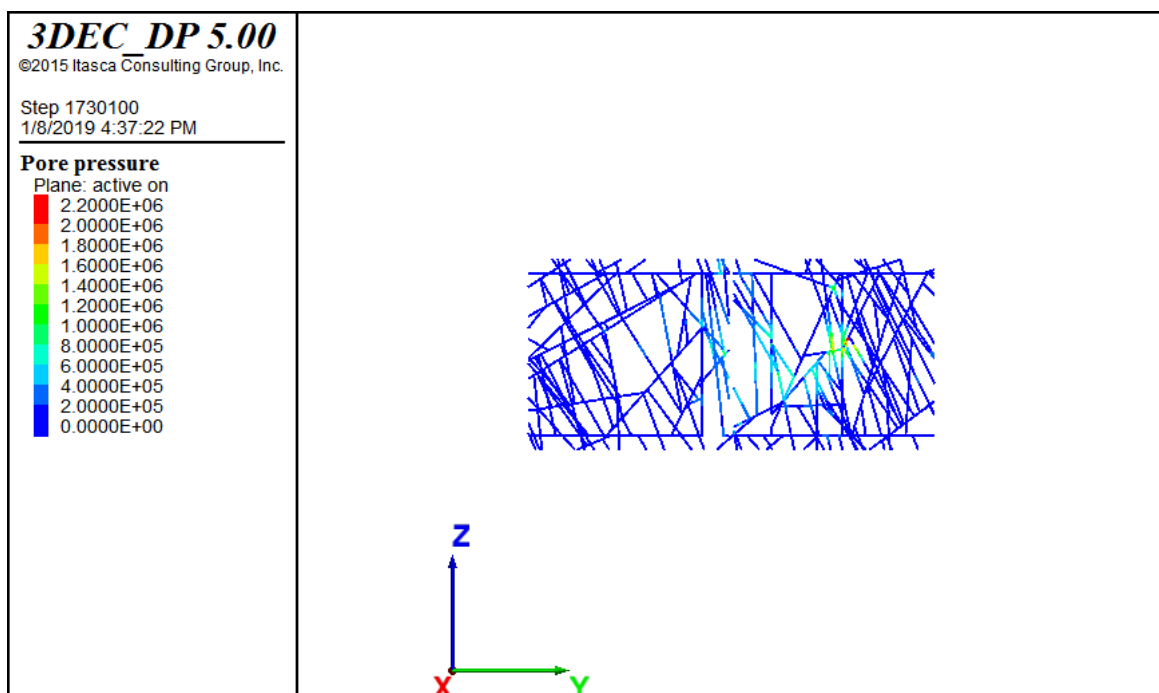
(الف) تراز ۱ متر از مدل



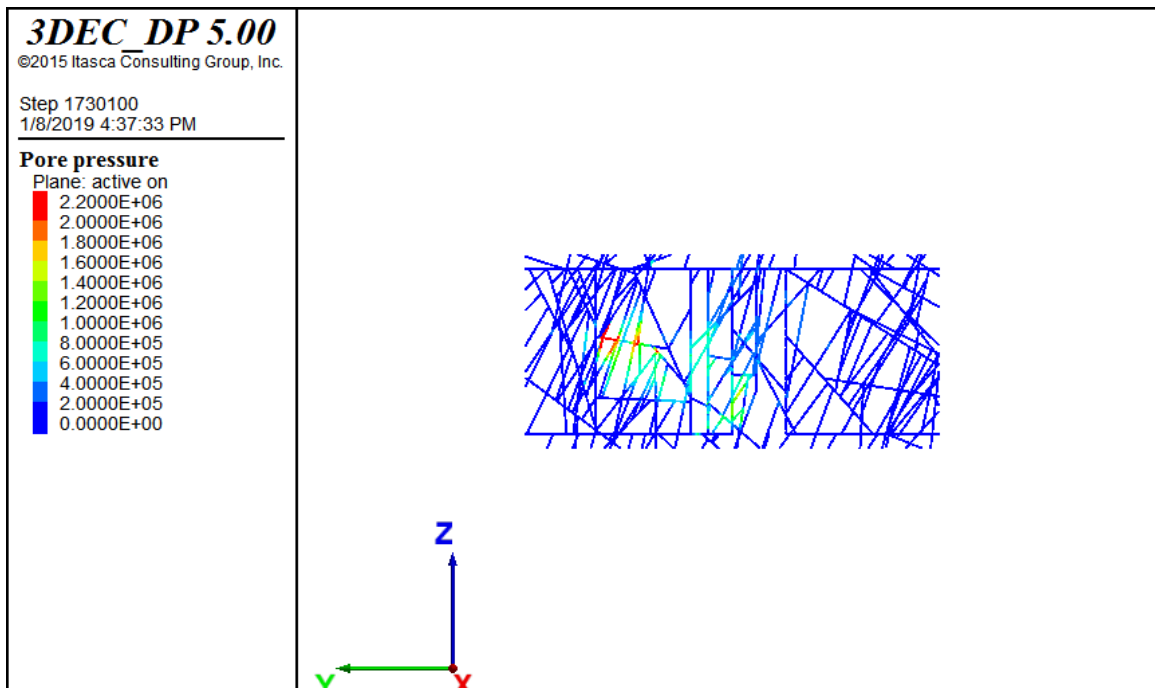
(ب) تراز ۱,۵ متر از مدل



(ج) تراز ۲ متر از مدل



(د) تراز ۱,۵ متر از مدل



(ه) تراز ۲ متر از مدل

شکل ۵-۱۷ میزان نفوذ دوغاب در مدل

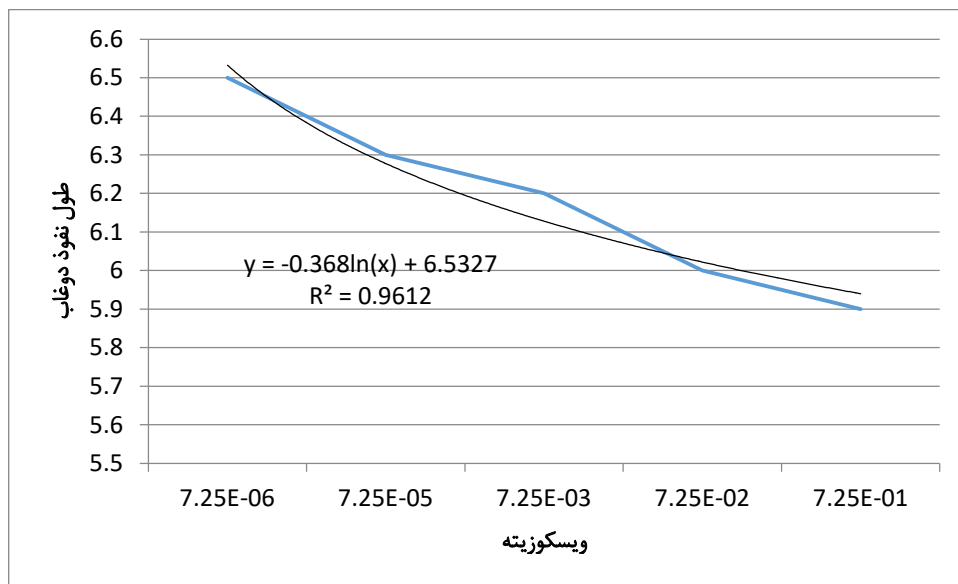
با توجه به شکل ۵-۱۷، عمق نفوذ دوغاب به گمانه کنترلی رسیده است که این موضوع با شواهد میدانی مطابقت خوبی دارد. علاوه بر این نفوذ یکی از گمانه‌ها طول نفوذ دوغاب ۱٫۵ متر دور گمانه است که حاکی از تاثیر جهت درزه‌داری بر عمق نفوذ دوغاب است.

۵-۸-۱ تحلیل حساسیت پارامتر ویسکوزیته دوغاب بر روی نرخ گسترش آن

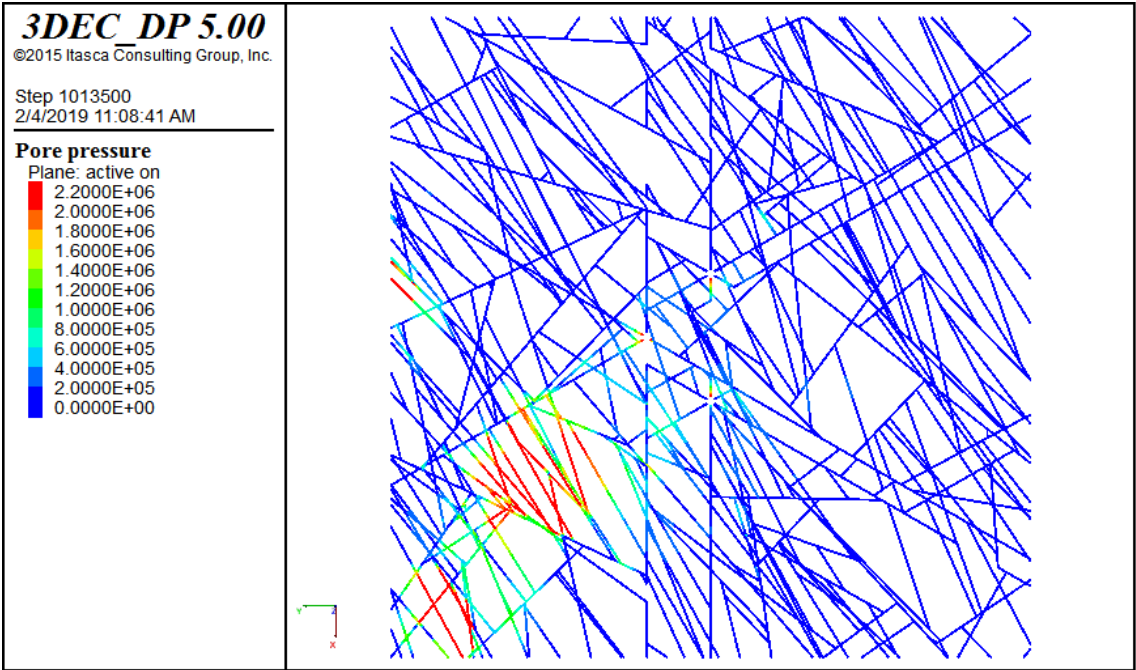
در این تحقیق مدل پایه برای شبیه‌سازی عددی عملیات تزریق با سه چال به فاصله‌ی ۳ متر، با میزان نفوذ دوغاب با توجه به ویژگی‌ها نسبت آب به سیمان ۳ با فشار ثابت ۲۲ بار تزریق صورت می‌گیرد که در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. در این قسمت میزان نفوذ دوغاب بر اساس ویسکوزیته دوغاب مورد بررسی قرار گرفته است که مدل‌ها تنها در ویسکوزیته اختلاف دارند.

همانطور که در قسمت‌های قبل گفته شد، در صورتی که نفوذ بیشتری در طی زمان اجرای مدل مشاهده نشود، عملیات تزریق خاتمه می‌یابد. بر همین مبنا و با توجه به اینکه از دوره گردش ۵۰۰۰ به بعد در میزان نفوذ دوغاب تغییری نداشت، لذا دوره گردش ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

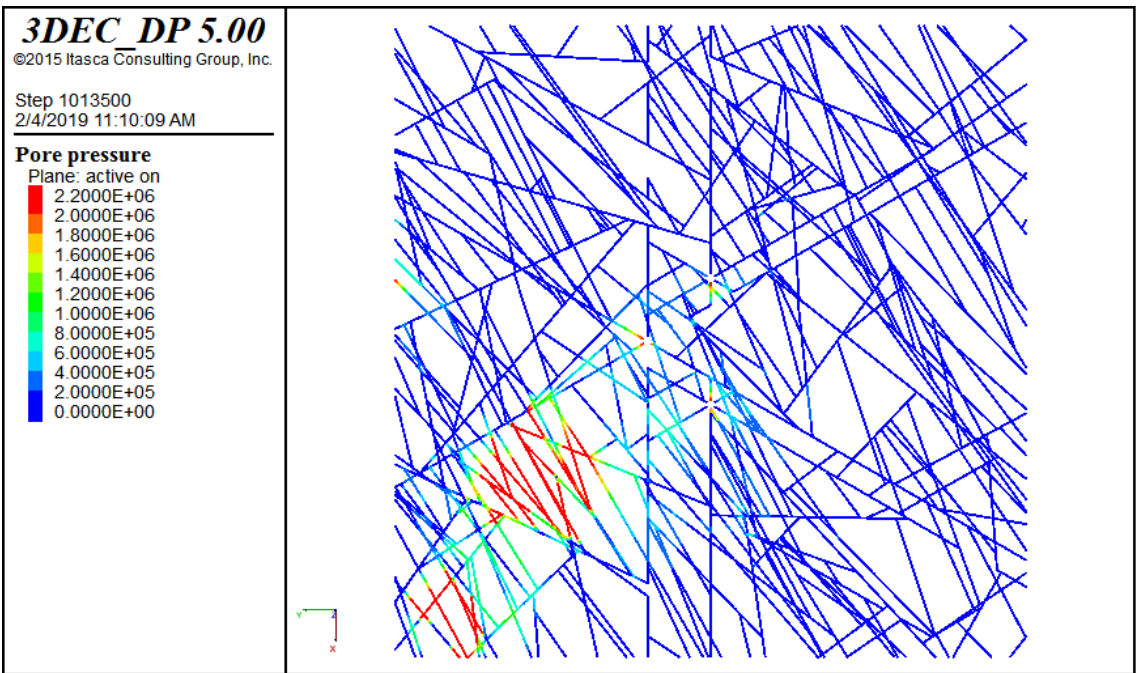
نتایج به دست آمده از تزریق مدل عددی در شکل ۵-۱۸ آمده است، این شکل رابطه‌ی ویسکوزیته دوغاب با میزان نفوذ دوغاب در توده سنگ را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار میرفت با کاهش ویسکوزیته میزان نفوذ دوغاب بیشتر شده است.



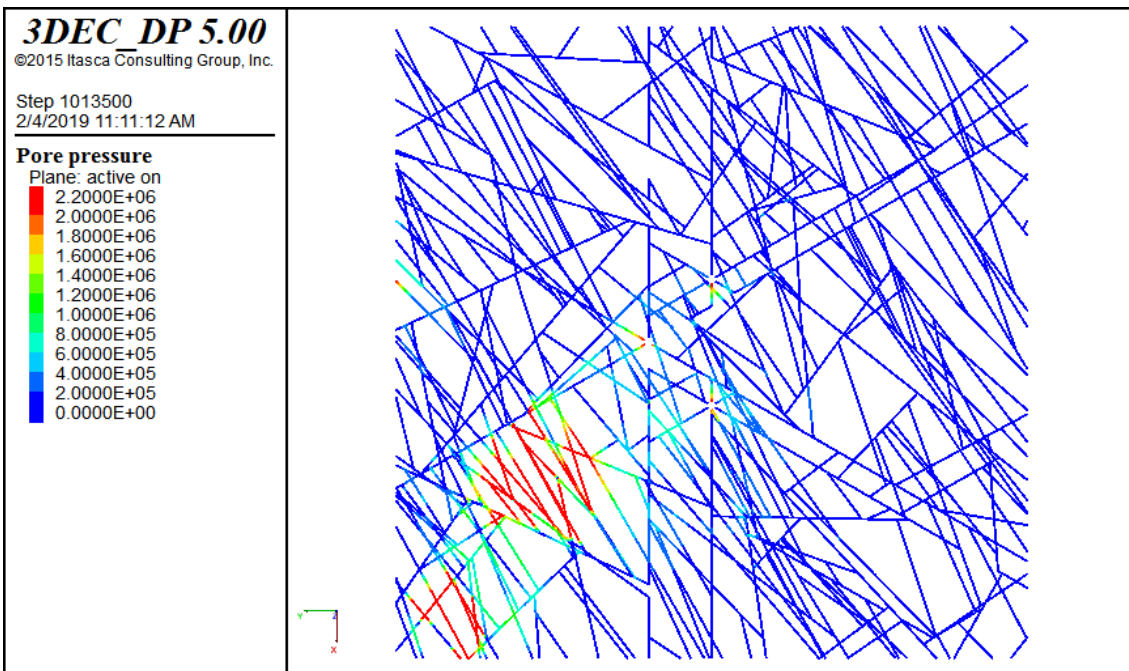
شکل ۵-۱۸ طول نفوذ دوغاب با تغییر ویسکوزیته



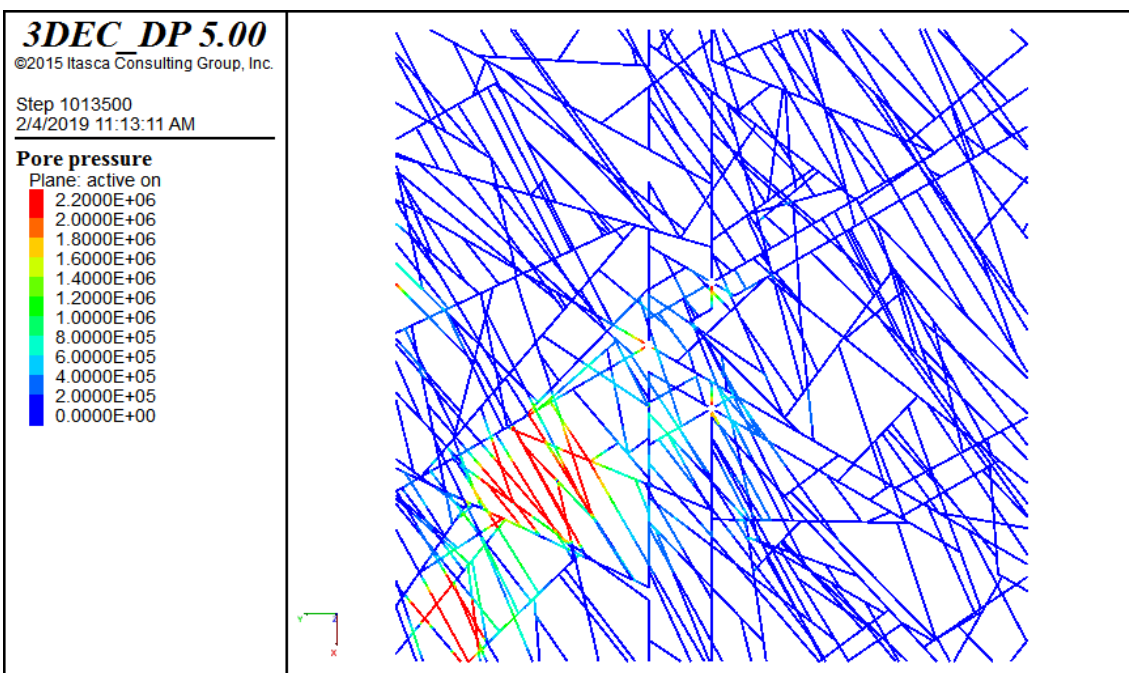
visc = $7.25e-6$ (الف)



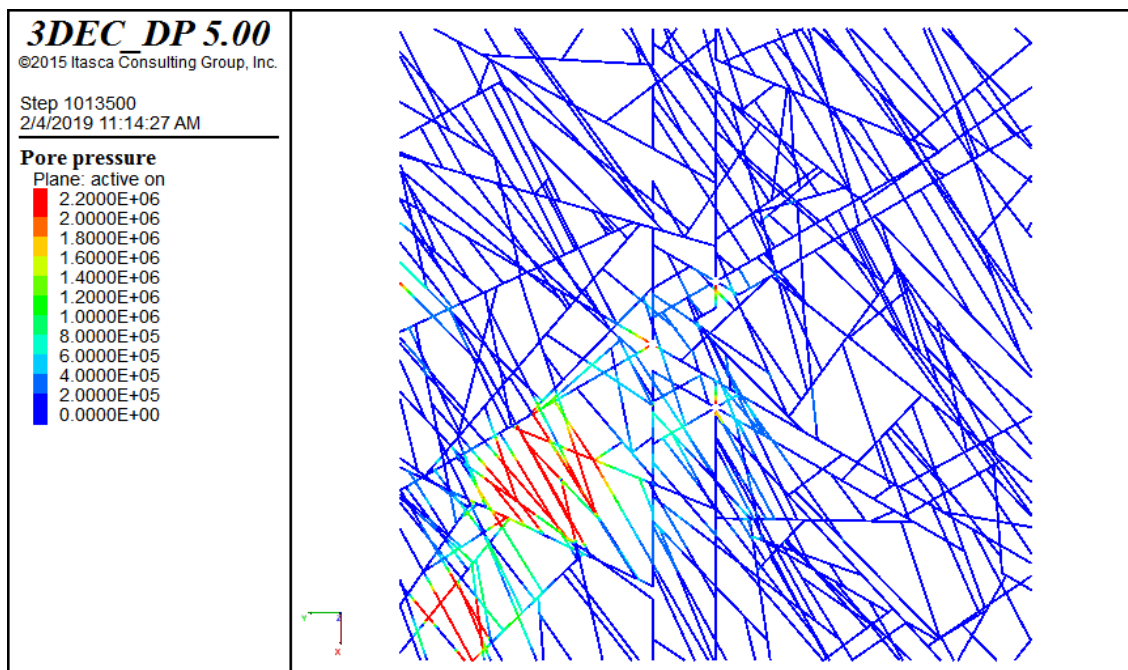
visc = $7.25e-5$ (ب)



visc = 7.25e-3 (c)



visc = 7.25e-2 (s)

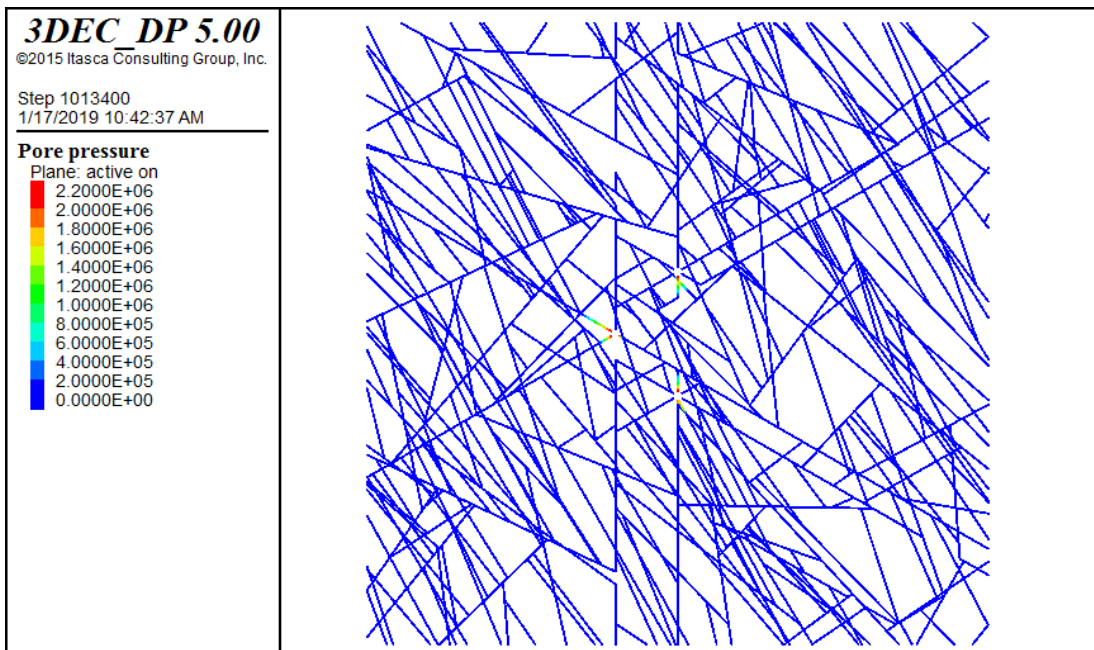


$$\text{visc} = 7.25e-1 \text{ (e)}$$

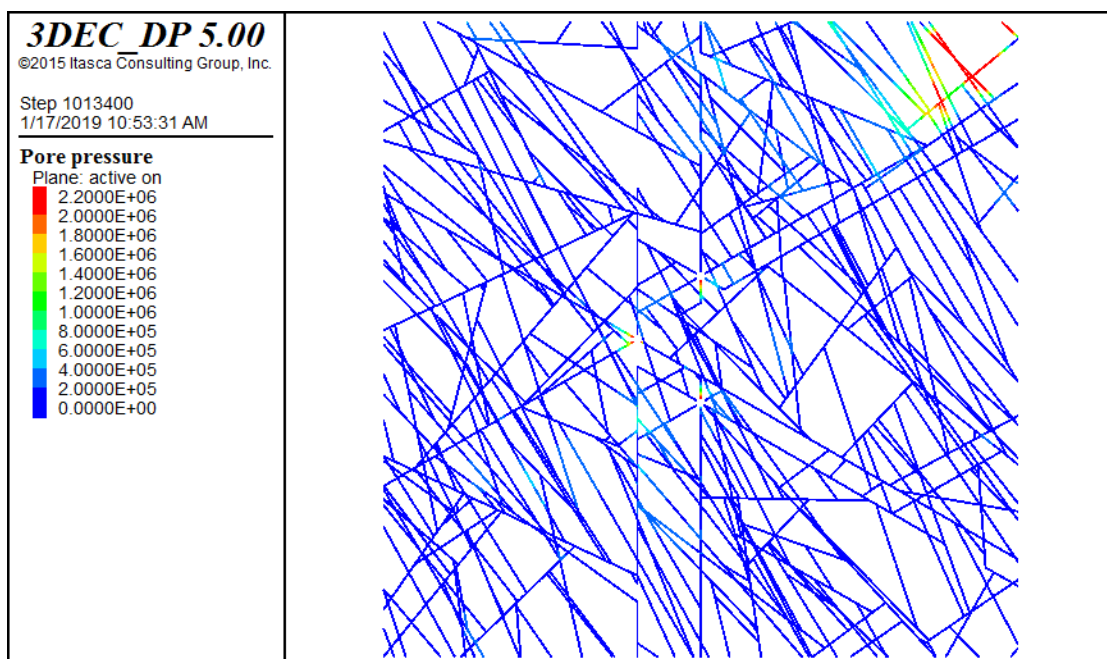
شکل ۵-۱۹ تحلیل حساسیت بر مبنای ویسکوزیته دوغاب

۵-۸-۲ تحلیل حساسیت بازشدگی درزه بر روی نرخ گسترش دوغاب

در این بخش با تغییر در میزان بازشدگی درزه‌ها با فشار ثابت ۲۲ بار تزریق دوغاب صورت گرفته، میزان گسترش دوغاب در درون توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت مشاهده می‌شود که بازشدگی رابطه‌ی مستقیمی با طول نفوذ دوغاب در درون توده سنگ را دارد. برای این منظور بازشدگی‌ها ۳۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ از میزان اولیه خود کاهش و افزایش داده شده است.



الف) ۹۰٪ کاهش بازشدگی



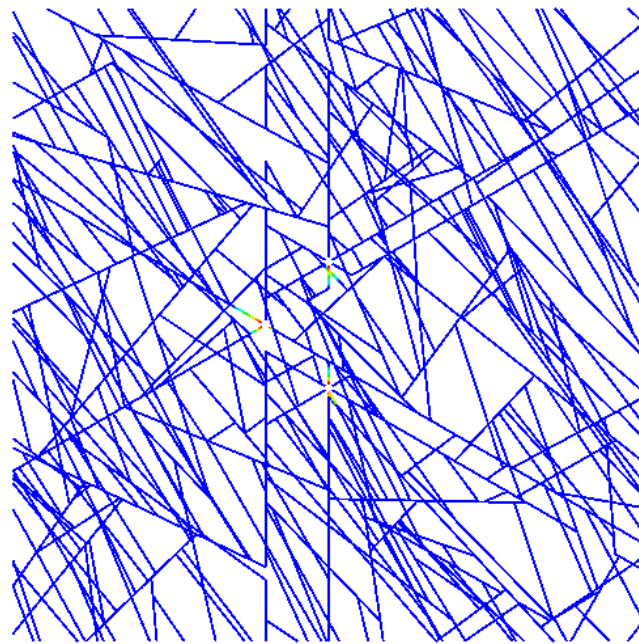
ب) ۹۰٪ افزایش بازشدگی

3DEC DP 5.00
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 1013400
1/17/2019 10:52:12 AM

Pore pressure

Plane: active on
2.2000E+06
2.0000E+06
1.8000E+06
1.6000E+06
1.4000E+06
1.2000E+06
1.0000E+06
8.0000E+05
6.0000E+05
4.0000E+05
2.0000E+05
0.0000E+00



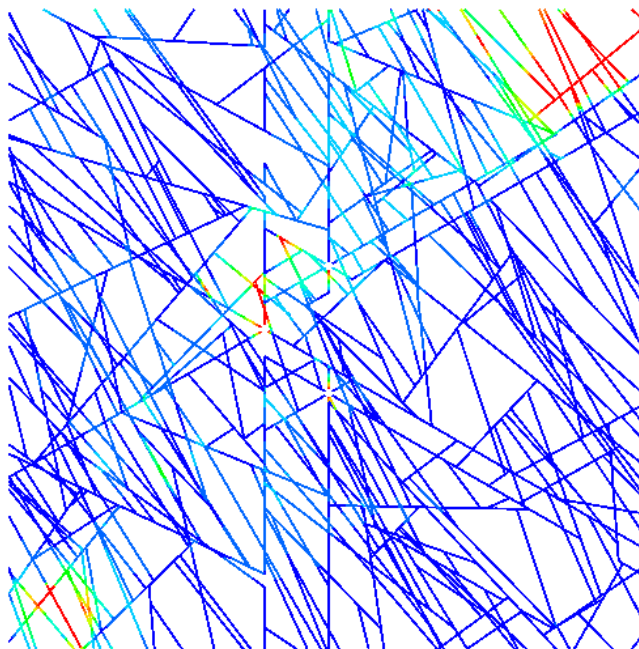
ج) ۶۰٪ کاهش بازشدگی

3DEC DP 5.00
©2015 Itasca Consulting Group, Inc.

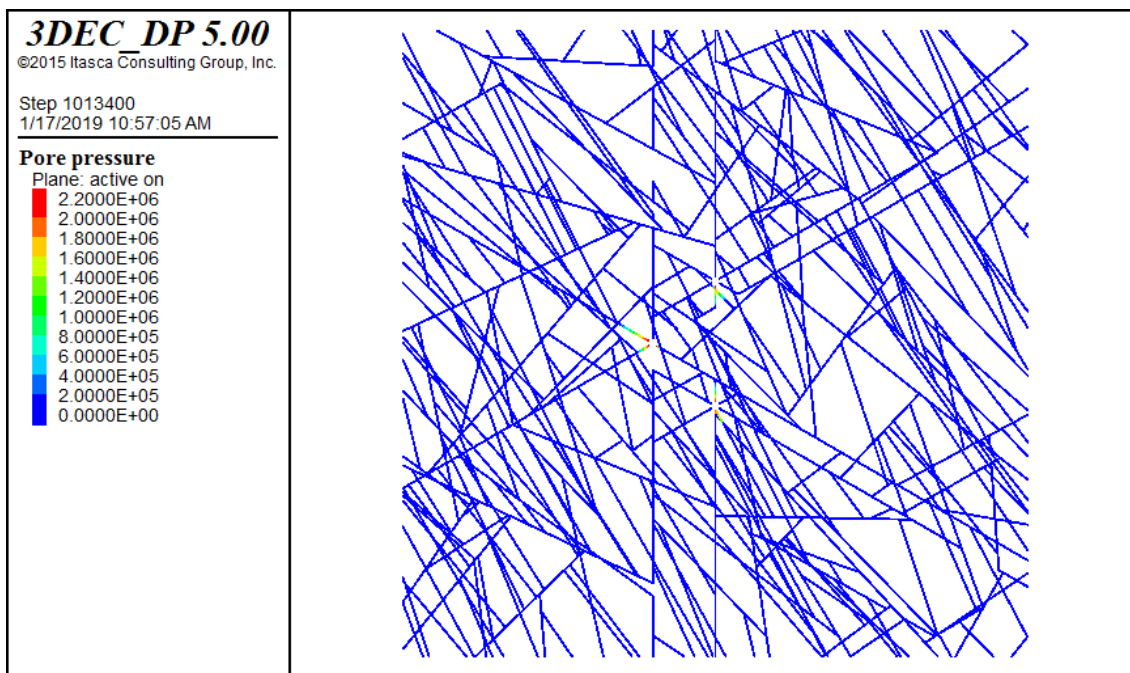
Step 1013400
1/17/2019 10:55:05 AM

Pore pressure

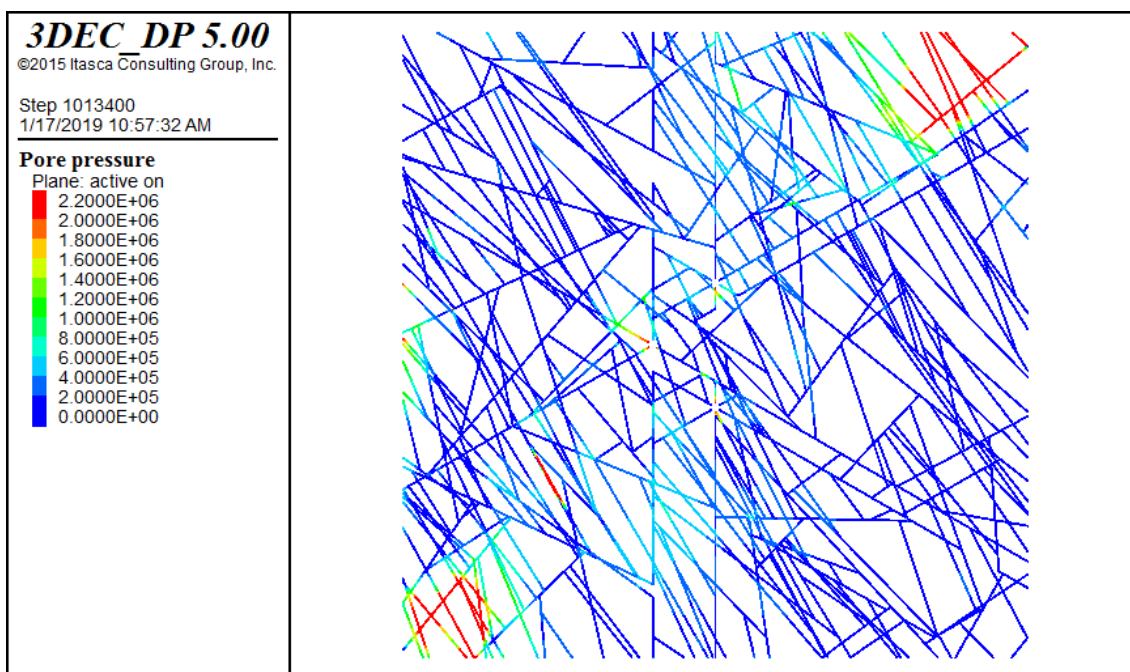
Plane: active on
2.2000E+06
2.0000E+06
1.8000E+06
1.6000E+06
1.4000E+06
1.2000E+06
1.0000E+06
8.0000E+05
6.0000E+05
4.0000E+05
2.0000E+05
0.0000E+00



د) ۶۰٪ افزایش بازشدگی



(ه) ۳۰٪ کاهش بازشدگی



(و) ۳۰٪ افزایش بازشدگی

شکل ۵-۲۰ تحلیل حساسیت بر مبنای بازشدگی درزه‌ها

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از انجام این تحقیق به شرح زیر است:

- به منظور اعتبارسنجی، مقادیر لوژان محاسبه شده به روش عددی در این تحقیق با مقادیر لوژان آزمایش شده‌ی برجا در ساختگاه سد رودبار لرستان، مقایسه و صحت مدل‌سازی سنجیده و تایید شده است.

- در این مدل‌سازی برای به‌دست آوردن میزان انتشار مواد تزریق شده، عملیات تزریق با آرایش مثلی گمانه‌های تزریق انجام شده است و میزان نفوذ دوغاب بر اساس مدل‌سازی، ۱,۵ متر به‌دست آمده است.

- تحلیل حساسیت نسبت به دو پارامتر بازشدگی درزه و ویسکوزیته دوغاب سیمانی انجام شده است که نتیج نشان می‌دهند که میزان نفوذ دوغاب به صورت مشهود در این منطقه به ویسکوزیته دوغاب بستگی نداشته و طول نفوذ به ازای ویسکوزیته‌های مختلف، اختلاف خیلی کم دارند. ولی در تحلیل حساسیت نسبت به بازشدگی می‌توان گفت که کاملاً طول نفوذ دوغاب وابسته به این پارامتر است.

- با توجه به مدل‌سازی‌ها و نتایج گرفته شده می‌توان نتیجه گرفت که ناهمسانگردی توده سنگ تاثیر بسیار مهمی در میزان نفوذ و جهت نفوذ دوغاب دارد.

علاوه بر این برخی نتایج در این پایان نامه حاصل شده که قبلاً توسط سایر محققان نیز به اثبات رسیده است:

- عوامل ورودی به عنوان داده‌های خام برای ساخت شبکه شکستگی‌های مجزا باید با دقت از رخنمون‌های سطحی و یا لاگ‌گمانه‌ها برداشت گردد و همچنین باید از صحت مقادیر تخصیص داده شده به مدل عددی از جمله مقاومت، مدول تغییر شکل‌پذیری و ... اطمینان حاصل شود تا خروجی‌های مدل عددی قابل اطمینان باشد.

- عوامل برشی درزه‌ها مانند صلبیت برشی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک و زبری درزه‌ها نقش مهمی در تعیین رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ درزه‌دار ایفا می‌کند. در نتیجه در نظر گرفتن رفتار مکانیکی مناسب برای رفتار برشی درزه‌ها شرط اصلی در موفقیت مدل‌سازی رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ درزه‌دار است.

۲-۶ پیشنهادات

مباحث مختلفی در مدل‌سازی تزریق وابسته به تنش توده سنگ درزه‌دار به صورت حل نشده باقی مانده است و تفسیر نتایج رفتار توامان توده سنگ وجود دارد.

برای ادامه فعالیت در این زمینه پیشنهاد می‌شود، تحلیل حساسیت نسبت به عواملی نظیر نسبت تنش افقی به قائم، مواد پرکننده درزه‌ها، سختی درزه‌ها، قطر گمانه تزریق و سایر مشخصات رئولوژیکی دوغاب شامل مدول بالک و چگالی، انجام شود.

مراجع

Alain Thoraval, Vincent Renaud. Hydro-mechanical upscaling of a fractured rock mass using a 3D numerical approach. International Conference on Coupled TH-M-C Processes in Geosystems, Oct 2003, Stockholm, Sweden. pp.263-268.

Amadei, B., Savage, W. Z. (2001). An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(2), 285-296.

Baecher G. B., Einstein H. H., Lanney N. A. (1977), "Statistical description of rock properties and sampling", Energy resources and excavation technology, The 18th U.S. symposium on rock mechanics, Golden: Colo. Sch. Mines Press, pp. 1–8.

Baghbanan, A. 2008. "Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses." PhD diss., KTH,.

Bahaaddini M., Sharrock G., Hebblewhite B. K. (2013), "Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression", Computers and Geotechnics, 49, pp. 206–225.

Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K. (1985). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. In International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts (Vol. 22, No. 3, pp. 121-140). Pergamon.

Butrón, C., Gustafson, G., Fransson, Å., & Funehag, J. (2010). Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(2), 114-121.

Bourke, P. J. Durrance, E. M., Hodgkinson, D. P. and Heath, M. J., (1985). Fracture

hydrology relevant to radionuclide transport, Report AERE-R 11414 of the Atomic Energy Research Establishment, Harwell.

Carter, T. G., Dershowitz, W., Shuttle, D., Jefferies, M. (2012). Improved methods of design for grouting fractured rock. In *Grouting and Deep Mixing 2012* (pp. 1472-1483).

Chan, M.P. (2005). "Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering." 1-98.

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).

Dalmalm, T. (2004). Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions (Doctoral dissertation, Bygghvetenskap).

Dean, R.H., Gai, X., Stone, C.M., and Minkoff, S.E., (2003), "A Comparison of Techniques for Coupling Porous Flow and Geomechanics", paper SPE 79709 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, TX.

El Tani, M. (2012). Grouting rock fractures with cement grout. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(4), 547-561.

Esmaili K., Hadjidiageorgiue J., Grenon M., (2010). Estimating Geometrical and Mechanical REV Based on Synthetic Rock Mass Models at Brunswick Mine. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 47, Issue6.

Ewert, F. K. (1998). Permeability, Groutability and Grouting of Rocks Related to Dam Sites. Part 2. *Dam Engineering*, 8, 123-176.

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.

Fransson, Å. (2001). Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field test. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 331-339.

Granet, S., Fabrie, P., Lemonnier, P., Quintard, M. (2001). A two-phase flow simulation of a fractured reservoir using a new fissure element method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 32(1), 35-52.

Gustafson, G., Stille, H. (1996). Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data. *Tunnelling and underground space technology*, 11(3), 325-332.

Gustafson, G., Stille, H. (2005). Stop criteria for cement grouting. *Felsbau: Zeitschrift für Geomechanik und Ingenieurgeologie im Bauwesen und Bergbau*, 25(3), 62-68.

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

Hassler, L., Stille, H., & Hakansson, U. (1987, January). Simulation of grouting in jointed rock. In 6th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.

Hiscock, K. M. (2005). *Hydrogeology: principles and practice*. John Wiley and Sons.

Houlsby, A. C. (1990). *Construction and design of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations* (Vol. 67). John Wiley and Sons.

Hudson, J. A., Harrison, J. P. (2000). Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Elsevier.

Hudson, J. A., Stephansson, O., Andersson, J. (2005). Guidance on numerical modelling of thermo-hydro-mechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(5-6), 850-870.

Jing, L., Ma, Y., Fang, Z. (2001). Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(3), 343-355.

Jing, L., Stephansson, O. (2007). Introduction. In *Developments in Geotechnical Engineering* (Vol. 85, pp. 1-21). Elsevier.

Jones, M. A., Pringle, A. B., Fulton, I. M. and O'Neill, S., (1999). Discrete fracture network modelling applied to groundwater resource exploitation in southwest Ireland. In: McCaffrey, K. J. W., Lonergan, L. & Wilkingson, J. J. (eds) *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*. Geological Society, London, special Publications, 155, 83-103.

Kucuk, K., Genis, M., Onargan, T., Aksoy, C. O., Guney, A., & Altındağ, R. (2009). Chemical injection to prevent building damage induced by ground water drainage from shallow tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(7), 1136-1143.

Lang1, A. Paluszny, and R.W. Zimmerman. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College, London, UK Permeability tensor of three-dimensional fractured porous rock and a comparison to tracemap predictions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, pp 6288-6307.

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

Liao, Q. H., Hencher, S. R. (1997). Numerical modelling of the hydro-mechanical behaviour of fractured rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 177-e1.

Lisa, H., Christian, B., Åsa, F., Gunnar, G., & Johan, F. (2012). A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 132-144.

Lorig, L., Gibson, W., Alvial, J., Cuevas, J. (1995). Gravity flow simulations with the particle flow code (PFC). *ISRM News J*, 3(1), 18-24.

INDRARATNA, P.G. RANJITH and W. GALE,(1999), "Single phase water flow through rock fractures", *Geotechnical and Geological Engineering*, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands,215-226.

Marmo, B. A., Wilson, C. J. L. (1999). A verification procedure for the use of FLAC to study glacial dynamics and the implementation of an anisotropic flow law. *S. arkk. a*, Eloranta, editors. *Rock mechanics—a challenge for society*. Swetz and Zeitlinger Lisse, ISBN, 90(2651), 821.

Min, Ki-Bok. 2004. "Fractured rock masses as equivalent continua-A Numerical Study." PhD diss., Mark och vatten.

Michie, U., 1996. The geological framework of the Sellafeld area and its relationship to hydrogeology, *Quarterly J. Engineering Geology*, 29, S 13-27.

Neretnieks, I., 1985. Transport in fractured rocks. In *Proceedings, Memories of the 17th*

Int. Cong. Of IAH, Int. Assoc. Hydrogeol., Tucson, Arizona, USA, Vol. 17, pp.301- 18.

Nolte, D. D., Pyrak-Nolte, L. J. and Cook, N. G. W., 1989. The fractal geometry of flow paths in natural fractures in rock and the approach to percolation, *PAGEOPH*, 131, 111-38.

Nonveiller, E. (2013). *Grouting theory and practice* (Vol. 57). Elsevier.

Oda MA. 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique*. Dec;35(4):483-95.

Olsson R, Barton N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci* 2001;38:317-329.

PRIEST, S. D. (1993). The collection and analysis of discontinuity orientation data for engineering design, with examples. In *Rock Testing and Site Characterization* (pp. 167-192). Pergamon.

PRIEST, S. D. (1993). The collection and analysis of discontinuity orientation data for engineering design, with examples. In *Rock Testing and Site Characterization* (pp. 167-192). Pergamon.

Raymond, M., Rousset, F. (1995). An exact test for population differentiation. *Evolution*, 49(6), 1280-1283.

Saeidi, O., Stille, H., Torabi, S. R. (2013). Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 11-25.

Samier, P., Onaisi, A., and Fontaine, G., (2003), "Coupled Analysis of Geomechanics and Fluid Flow in Reservoir Simulation", paper SPE 79698 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, TX.

Settari, A., and Walters, D.A., (2001), "Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling with Applications to Reservoir Compactions", SPE Journal, 6(3), 334-342.

Snow, D. T. (1968). Fracture deformation and changes of permeability and storage upon changes of fluid pressure.

Stille, H., Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(1), 46-64.

Sui, W., Liu, J., Hu, W., Qi, J., Zhan, K. (2015). Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water. Tunnelling and Underground Space Technology, 50, 239-249.

Sullivan, T. D. (2007). Hydromechanical coupling and pit slope movements. Proceedings of the. Slope Stability.

Weiss, M. (2008), "Techniques for estimating fracture size: A comparison of methods", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 15, pp. 460-466.

Yang, M. J., Yue, Z. Q., Lee, P. K., Su, B., Tham, L. G. (2002). Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation. Canadian Geotechnical Journal, 39(6), 1384-1394.

Zhang, X., Sanderson, D. J., Harkness, R. M., Last, N. C. (1996, January). Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts (Vol. 33, No. 1, pp. 17-37). Pergamon.

Zadhesh J., Jalali S. E., Ramezanzadeh A. (2013), "Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks", Arab. J. Geo. Sci., DOI 10.1007/s12517-013-0861-1.

Zhang, X., Sanderson, D. J. (Eds.). (2002). Numerical modelling and analysis of fluid flow and deformation of fractured rock masses. Elsevier.

اژدری پ، " تحلیل عددی تاثیر عوامل هندسی درزه و تنش تسلیم دوغاب بر روی کیفیت عملیات تزریق "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۴.

اصفهانى.ع، (۱۳۹۳)، " برآورد تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه دار با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی اجزا مجزا و مدل های شبکه شکستگی مجزا مطالعه موردی: ساختگاه سد مخزنی پارسیان "، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

بیرانوند پ، (۱۳۹۲)، " پایان نامه ارشد : " برآورد تزریق پذیری و بهینه سازی سیستم آب بندی محور سد سردشت با استفاده از روش های عددی "، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان .

رضانی. م، لشکری پور. غ، غفوری. م، طریق ازلی. ص، " تخمین آب ورودی به تونل با استفاده از روش های تحلیلی و تجربی (مطالعه موردی: تونل انتقال آب از بند انحرافی چهل چای به پشت سد نرماب) "، دومین کنفرانس ملی سازه-زلزله-ژئوتکنیک. مازندران، ۱۳۹۲.

زاهدی.م، زادهش.ج، قربانی.ک، " بررسی تاثیر طول و بازشدگی درزه بر مقاومت توده سنگ درزه دار با استفاده از روش عددی اجزا مجزا (نرم افزار UDEC) "، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، آذر ۱۳۹۳.

کربلا-م.ا، (۱۳۸۸) "تزریق دوغاب سیمانی در سنگ"، چاپ اول، اهواز.

کامگار.م، کارگران.ف، مهرنهاد.ج، "بررسی نفوذپذیری ثانویه و تزریق پذیری توده سنگ ساختگاه سد تنگ سرخ (بشار) جهت طراحی پرده آب بند"، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، مشهد، ۱۳۹۲.

کراری.س، اجل لوئیان.ر، "راهکار اجرایی تزریق در سد با استفاده از لوژان و شاخص نفوذپذیری ثانویه"، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۱، پاییز ۱۳۹۵.

کمالی بندپی.ع، شهریار.ک، شریفزاده.م، معارفوند.پ، "بررسی خصوصیات ناپیوستگی ها به- منظور تولید مدل شبکه شکستگی- مطالعه موردی: مغار نیروگاه تلمبه ذخیره ای رودبار لرستان"، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، سال سوم، شماره ۹، تابستان ۱۳۹۵.

صادقی.ع، ارومیه ای.ع، عابدینی.ع، "ارزیابی تزریق پذیری ساختگاه سد سرابی به منظور طراحی پرده آب بند" هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.

صیامی اصل.م، اصغری.ا، برادر رضی زاده.ف، "ارزیابی پرده تزریق سد گیوی اردبیل"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، اردیبهشت ۱۳۹۰.

مسعودی.م، کربلا.م، کتیبه.ه، "مدل سازی تحلیلی و عددی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه دار اساس نتایج تزریق آزمایشی در ساختگاه سد سیمره"، نشریه مهندسی معدن، سال سوم، شماره ۶، ۱۳۸۸.

مشیری علی آباد.س. "مدل سازی هندسی توده سنگ با هدف ارایه رابطه تجربی برای برآورد آب- گذری در سازه های زیرزمینی (مطالعه موردی ساختگاه سد مخزنی پارسیان)"، پایان نامه کارشناسی

ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- محمدپوره، میرزایی.ح، ترابی.ر، "تحلیل عددی تاثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه‌دار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۴.
- میرزایی نصیرآباد.ح، "تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه شکستگی‌های مجزای توده سنگ درزه‌دار"، اولین همایش زمین‌شناسی فلات ایران، کرمان، ۱۳۹۱ .
- مهتاب قدس، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی"، ۱۳۹۳.
- مهدوی‌نژاد.ح، (۱۳۹۰) "بررسی فرآیند تزریق آب‌بند در تونل‌های سنگ سخت مطالعه موردی تونل انتقال آب کرج-تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نوروزی.م، "برآورد مقاومت توده سنگ درزه‌دار (مورد مطالعاتی: سد نیروگاه رودبار لرستان)"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳.
- ولی‌پور شکوهی.ص، مرتضوی.ع، "تحلیل عددی تاثیر پارامترهای موثر در فرآیند تزریق در محیط-های سنگی ناپیوسته"، فصلنامه علمی پژوهشی شریف، شماره ۳۹، پاییز ۱۳۸۶.

Abstract

The ability to inject rock mass, in particular, the injection of rock ponds in dams, depends on a variety of factors that can be divided into three categories, geological factors, technical factors and characteristics of injectable grout. One of the most important issues in constructing a dam, is the sealing of the dam by the injection operation to prevent water from penetrating in the dam. The control of water leakage from the dam is important both economically and in terms of the stability of the dam. Therefore, in this study, the intrusiveness of the rock mass is investigated, focusing on the case study of Rudbar Lorestan reservoir pump system.

To do this research, the scientific background was first reviewed and the basic and essential information was collected. In the next step, the characteristics of rock mass including opening and roughness, spacing, direction, length of effect (stability), grout intensity and characteristics such as the value of the modulus of the block, viscosity and grout pressure, and their effect on the flow rate and grout penetration rate has been studied. Then, by focusing on the case study of Rudbar Lorestan Dam, a separate fracture network model (DFN) of rock mass geometric properties was developed using statistical information analysis. Subsequently, using 3DEC's separate software, a 3D numerical model of the grout penetration into the rock mass is prepared. This software has the ability to analyze fluid flow among discontinuities. The validity of the numerical model was measured based on the results of the Luzhan test and finally the sensitivity analysis for grout viscosity parameters and joint openings were investigated. The results show that grout penetration rate for the study of Roudbar dam is 1.5 meters. Grout viscosity has little effect on grout penetration, but joint opening has a direct effect on grout penetration. Also, anisotropy of rock mass has an important influence over grout penetration and orientation.

Keywords: Numerical modeling, Injection rate, Grout depth, 3DEC



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

grouting capability in jointed rock mass

By: Elham Ahmadi

Supervisor:

Dr Syed-Mohammad Esmail Jalali

Dr Mehdi Noroozi

Advisor:

Engineer Mohsen Sharifi

January 2019