

سورة



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

تعیین الگوی مناسب تزریق برای آب‌بندی پی سنگ سد تنگاب

نگارنده: اسحاق شهریاری

استاد راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

شهریور ۱۳۹۶

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

تشکر و قدردانی

ستایش مخصوص ذات بی‌همتای خداوند مهربان است؛ که هر آنچه نیکی و خوبی است تنها در ذات مقدس اوست. اکنون که در سایه لطف و عنایت پروردگار مهربان توانستم مرحله دیگری از تحصیلات خود را با موفقیت به اتمام رسانم، بر رسم ادب و سنت حسنه سپاس، لازم می‌دانم از تمام کسانی که مراد این مسیریاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. باینکه می‌دانم فراتر از توان و میان من است، ولی امیدوارم که مراتب امتنان و احترام مرا پذیرا باشند. با تشکر از زحمات استاد ارجمند و گرامی، جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که بار اهنمایی‌های بی‌دریغشان، اینجانب را در طول این مدت و در امر تهیه‌ی این پژوهش یاری نمودند، سپاس فراوان از تمام اساتید دانشکده مهندسی معدن که در دوران کارشناسی ارشد آموخته‌های فراوانی از ایشان فراگرفتم و همچنین از زحمات کسانی که مراد تهیه این پروژه یاری کردند کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب اسحاق شهریاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: **تعیین الگوی مناسب تزریق برای آب‌بندی پی سنگ سد تنگاب تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی** متعهد می شوم.

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

تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی 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

بسیاری از مخازن سدهای ساخته شده دارای مشکلات ناشی از نشت می باشند که این نشت ممکن است از پی یا بدنه سد رخ دهد. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از این پدیده در زیر سازه های آبی صورت می گیرد احداث پرده های آب بند است. مطالعه پیش رو برای تعیین الگوی مناسب تزریق برای آب بند نمودن پی سنگ ساختمانی سد تنگاب است. در این تحقیق در گام نخست، مطالعات صحرایی از ساختمانی سد مذکور شامل برداشت ناپیوستگی ها (جهت داری، باز شدگی، تداوم و...) انجام شده و سپس داده های برداشت شده توسط نرم افزار DIPS و EASY-FIT مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و توابع توزیع آماری حاکم بر خصوصیات ناپیوستگی ها برداشت شده، بدست آمده است. در گام دوم، شبکه شکستگی مجزای (DFN) بر اساس داده های مذکور به صورت سه بعدی در نرم افزار المان مجزای 3DEC ساخته شده است. در مرحله سوم تانسور نفوذپذیری ساختمانی سد با کاربرد روش عددی بدست آمده و با مقادیر نفوذپذیری برجا توسط تست لوژان در ساختمانی سد تنگاب مقایسه و اعتبار سنجی شده است. در مرحله چهارم برای بدست آوردن میزان انتشار مواد تزریق شده، مدل سازی عملیات تزریق را در چندین مرحله با افزایش فشار تزریق انجام داده و در نهایت با توجه به منطقه ساختمانی سد با حداکثر فشار مجاز تزریق که کمتر از فشار روباره است مناسب ترین انتشار در فشار ۲۵ بار با فاصله داری ۱/۵ متر چال های تزریق بدست آمد که موجب هم پوشانی چال ها شد و می تواند به عنوان الگوی مناسب تزریق برای آب بند نمودن پی سد تنگاب در برابر فرار آب ارایه شود.

کلمات کلیدی: مدل سازی عددی، عملیات تزریق، شبکه شکستگی مجزا، نفوذپذیری، فشار تزریق،

دو غاب پایه سیمانی

فهرست مطالب

فصل اول - کلیات

۱-۱	تعریف مساله	۲
۲-۱	سابقه موضوع	۳
۳-۱	لزوم انجام تحقیق	۵
۴-۱	روش تحقیق	۶
۵-۱	ساختار تحقیق	۶

فصل دوم - بررسی عوامل تاثیرگذار بر عملیات تزریق

۱-۲	مقدمه	۱۰
۲-۲	خصوصیات هیدرولیکی سنگ	۱۰
۳-۲	رفتار هیدرولیکی درزه	۱۴
۴-۲	تعیین خصوصیات هیدرولیکی سنگ	۱۶
۱-۴-۲	آزمایش‌های اکتشافی	۱۶
۱-۱-۴-۲	آزمایش‌های پمپاژ	۱۶
۲-۱-۴-۲	آزمایش لوژان کلاسیک	۱۸
۲-۴-۲	آزمایش‌های چال تزریق	۲۶
۱-۲-۴-۲	آزمایش یک پله لوژان یا یک پکر تست ساده	۲۷
۳-۴-۲	رابطه لوژان با نفوذپذیری و قابلیت تزریق	۳۰
۵-۲	خصوصیات مکانیکی و هندسی توده سنگ	۳۱
۶-۲	روشهای اکتشاف توده‌سنگ در عملیات تزریق	۳۶
۷-۲	مواد و مصالح مورد استفاده در دوغاب	۳۸
۱-۷-۲	سیمان پرتلند	۴۰
۲-۷-۲	نسبت آب به سیمان (W/C)	۴۱
۳-۷-۲	مخلوط کردن دوغاب	۴۳
۴-۷-۲	پوزولان‌ها	۴۳
۵-۷-۲	سیمان‌های ریزدانه	۴۵
۶-۷-۲	افزودنی‌های دوغاب	۴۵
۷-۷-۲	دوغاب‌های رسی	۴۹
۸-۷-۲	دوغاب‌های شیمیایی	۴۹

۵۱.....	۸-۲ فشار تزریق.....
۵۴.....	۹-۲ جمع بندی.....

فصل سوم - مروری بر مطالعات گذشته

۵۸.....	۱-۳ مقدمه.....
۵۹.....	۲-۳ عملیات تزریق.....
۶۲.....	۳-۳ مدل سازی تحلیلی عملیات تزریق.....
۶۶.....	۵-۳ مدل سازی عددی عملیات تزریق.....
۷۱.....	۶-۳ جمع بندی.....

فصل چهارم - معرفی ساختگاه سد تنگاب و تعیین مدل DFN

۷۴.....	۱-۴ مقدمه.....
۷۴.....	۲-۴ ویژگی های پروژه سد تنگاب.....
۷۵.....	۱-۲-۴ موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی.....
۷۵.....	۲-۲-۴ واحد سنگ چینه شناسی محل پروژه سد تنگاب.....
۷۶.....	۳-۴ توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی درزه ها.....
۷۶.....	۱-۳-۴ توزیع جهت داری.....
۷۷.....	۲-۳-۴ توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر شکستگی ها.....
۷۸.....	۳-۳-۴ توابع توزیع حاکم بر باز شدگی شکستگی ها.....
۷۸.....	۴-۳-۴ شبیه سازی تصادفی شکستگی های توده سنگ با استفاده از روش مونت کارلو.....
۷۹.....	۴-۴ مطالعات میدانی.....
۸۱.....	۱-۴-۴ تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه ها.....
۸۳.....	۲-۴-۴ تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر باز شدگی درزه ها.....
۸۶.....	۳-۴-۴ فراوانی و فاصله داری شکستگی های توده سنگ.....
۸۸.....	۵-۴ تولید شبکه شکستگی های مجزا ساختگاه سد تنگاب با استفاده از کد 3DEC.....
۸۹.....	۶-۴ جمع بندی.....

فصل پنجم - مدل سازی عددی

۹۲.....	۱-۵ مقدمه.....
۹۲.....	۲-۵ کد 3DEC.....
۹۳.....	۱-۲-۵ جریان سیال در درزه ها در نرم افزار 3DEC.....
۹۴.....	۲-۲-۵ الگوریتم پایه برای جریان سیال در نرم افزار 3DEC.....

۹۸.....	۳-۵ هندسه مدل عددی توده‌سنگ درزه‌دار
۹۸.....	۱-۳-۵ تخصیص پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سیال به مدل عددی
۱۰۰.....	۲-۳-۵ اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل
۱۰۲.....	۴-۵ برآورد مولفه‌های تانسور نفوذپذیری
۱۰۵.....	۱-۴-۵ ارزیابی نتایج نفوذپذیری در مقایسه با نتایج مطالعات آزمایش لوژان در منطقه
۱۰۶.....	۵-۵ مراحل مدلسازی عددی عملیات تزریق
۱۱۱.....	۱-۵-۵ تکرار مدل با DFN
۱۱۶.....	۶-۵ جمع‌بندی

فصل ششم - نتیجه‌گیری

۱۱۸.....	۱-۶ نتیجه‌گیری
۱۱۸.....	۲-۶ پیشنهادات
۱۲۰.....	منابع:

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ مفهوم بازشدگی هیدرولیکی..... ۱۳
- شکل ۲-۲ وضعیت جریان شعاعی در یک چاه در یک سفره محصور ۱۸
- شکل ۳-۲ دسته‌بندی اصلی و معمول نمودارهای P-Q ۲۲
- شکل ۴-۲ نمودارهای ستونی جهت تفسیر نتایج آزمایش‌های فشار آب ۲۸
- شکل ۵-۲ نقش فاصله‌داری درزه‌ها در سهولت عملیات تزریق: راست) تزریق سخت، چپ) تزریق آسان ۳۲
- شکل ۶-۲ نقش یکنواختی محیط در کیفیت و سهولت عملیات تزریق..... ۳۴
- شکل ۷-۲ نقش کیفیت سنگ در سهولت و کیفیت عملیات تزریق، در صورت ریزش چال‌ها، تزریق مشکل می‌شود ۳۴
- شکل ۸-۲ مقادیر جابجایی برشی و جریان ورودی بر حسب زاویه اصطکاک داخلی..... ۳۶
- شکل ۹-۲ منحنی دانه‌بندی مواد دوغاب و خاک ۴۰
- شکل ۱۱-۲: دانه‌های کاملاً کروی خاکستر بادی در یک عکس میکروسکوپی ... ۴۴
- شکل ۱۲-۲ نمودارهای افزایش فشار با عمق..... ۵۳
- شکل ۱-۳ نمای شماتیک فرایند تزریق..... ۶۰
- شکل ۲-۳ درزه دیسک مانند با گمانه‌ای در مرکز آن..... ۶۳
- شکل ۳-۳ نفوذ دوغاب با زاویه گسترش α ۶۴
- شکل ۴-۳ نفوذ دوغاب درون درزهای با بازشدگی b ۶۴
- شکل ۵-۳ نمایی از تأثیر فیلتر کیک بر محدود شدن میزان تزریق دوغاب در زمان تزریق یکسان... ۶۶
- شکل ۶-۳ مقایسه شعاع نفوذ دوغاب محاسبه شده با استفاده از مدل عددی..... ۶۷
- شکل ۷-۳ نمایش دوغاب درون توده سنگ برای بررسی عملیات تزریق در ساختگاه سد سیمره ۶۷
- شکل ۸-۳ مدل‌های اولیه بررسی عملیات تزریق زمانی که شکستگی‌ها موازی و غیر موازی..... ۶۸
- شکل ۹-۳ میزان نفوذ دوغاب در مقاطع مدل‌شده..... ۶۸
- شکل ۱۰-۳ هندسه مدل ساخته شده جهت بررسی عملیات تزریق..... ۶۹
- شکل ۱۱-۳ عمق نفوذ محاسبه شده برای دوغاب زمانی که بازشدگی درزه‌ها $1/6$ mm و فاصله‌داری آن‌ها ۱m است ۶۹
- شکل ۱۲-۳ مدل ساخته شده جهت بررسی برهم کنش درزه‌ها در عملیات تزریق ... ۷۰
- شکل ۱۳-۳ مدل ساخته شده برای بررسی عملیات تزریق در ساختگاه سد بختیاری..... ۷۱
- شکل ۱۴-۳ میزان نفوذ دوغاب زمانی که بازشدگی درزه‌های توده‌سنگ $0/5$ mm، فشار تزریق ۱ MPa ۷۱
- شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیای سد تنگاب..... ۷۵
- شکل ۲-۴ روش‌های برداشت ناپیوستگی‌های توده سنگ در رخنمون..... ۸۰
- شکل ۳-۴ استریونت دسته درزه‌های غالب و جهت‌داری هر دسته درزه در ساختگاه سد تنگاب..... ۸۰
- شکل ۴-۴ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۱ ۸۲

- شکل ۴-۵ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۲ ۸۲
- شکل ۴-۶ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر درزه ۳ ۸۳
- شکل ۴-۷ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۱ ۸۵
- شکل ۴-۸ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۲ ۸۵
- شکل ۴-۹ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۳ ۸۶
- شکل ۴-۱۰ ضریب $1C13$ در مقابل ثابت فیشر K و زاویه ρ ۸۷
- شکل ۴-۱۱ ثوابت a, b, c جهت محاسبه ضریب C_{13} ۸۸
- شکل ۴-۱۲ شبکه شکستگی مجزا به تفکیک دسته درزه‌ها ۸۹
- شکل ۵-۱ فعل انفلات بین سیال و سنگ در ناپیوستگی ۹۳
- شکل ۵-۲ جریان در درزه‌ها همانند بین دامنه‌ها مدل می‌شود ۹۵
- شکل ۵-۳ ارتباط بین بازشدگی هیدرولیکی، a و تنش نرمال درزه، σ_n در 3DEC ۹۷
- شکل ۵-۴ شبکه شکستگی مجزای مدل عددی تولید شده ۹۸
- شکل ۵-۵ فشار منفذی براساس هد ناشی از سطح ایستابی ۱۰۲
- شکل ۵-۶ شرایط مرزی هیدرولیکی مدل عددی ۱۰۴
- شکل ۵-۷ شرایط مرزی هیدرولیکی برای تخمین نفوذپذیری در مدل ۱۰۴
- شکل ۵-۸ مقادیر تیپیک نفوذپذیری توده سنگ ۱۰۵
- شکل ۵-۹ رابطه بین لوژان و نفوذپذیری ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰ تاریخچه نیروهای نامتعادل بعد از رسیدن به شرایط تعادل اولیه ۱۰۷
- شکل ۵-۱۱ تزریق در فشار $7/5$ بار دید از افق ۱۰۹
- شکل ۵-۱۲ تزریق در فشار $7/5$ بار دید از قائم ۱۰۹
- شکل ۵-۱۳ تزریق در فشار 25 بار دید از افق ۱۱۰
- شکل ۵-۱۴ تزریق فشار 25 بار دید از قائم ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵ تکرار DFN برای دومین بار ۱۱۱
- شکل ۵-۱۶ تزریق دید از افق تکرار دوم ۱۱۲
- شکل ۵-۱۷ تزریق دید از قائم تکرار دوم ۱۱۲
- شکل ۵-۱۸ تکرار DFN برای سومین بار ۱۱۳
- شکل ۵-۱۹ تزریق دید از افق تکرار سوم ۱۱۳
- شکل ۵-۲۰ تزریق دید قائم تکرار سوم ۱۱۴
- شکل ۵-۲۱ تکرار DFN برای چهارمین بار ۱۱۴
- شکل ۵-۲۲ تزریق دید از افق تکرار چهارم ۱۱۵

شکل ۵-۲۳ تزریق دید از قائم تکرار چهار..... ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ روش تعیین عدد لوژان بر اساس مقادیر لوژان و الگوی تغییرات آن‌ها در پله‌ای آزمون فشار آب ۲۵
- جدول ۲-۲ روابط ارائه شده به منظور محاسبه نفوذپذیری متوسط در محیط اطراف مقطع بر اساس مقدار لوژان ۳۰
- جدول ۳-۲: مقایسه اثر سدیم سیلیکات و کلسیم کلراید بر خصوصیات فیزیکی دوغاب ۴۷
- جدول ۴-۲: زمان گیرش مخلوط‌های سدیم سیلیکات-سیمان ۵۱
- جدول ۴-۱ توابع توزیع آماری مرسوم در تولید شبکه شکستگی مجزا ۷۶
- جدول ۴-۲ مشخصات هندسی درزه‌های ساختگاه سد تنگاب ۸۰
- جدول ۴-۳ اولویت توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته درزه‌ها ۸۱
- جدول ۴-۴ نتایج تحلیل‌های توابع توزیع نرمال حاکم بر طول خط اثر دسته درزه‌ها ۸۳
- جدول ۴-۵ مقادیر بازشدگی برداشت خطی و گمانه‌ها ۸۴
- جدول ۴-۶ اولویت‌بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها ۸۴
- جدول ۴-۷ نتایج فراوانی طولی و شدت حجمی دسته درزه‌ها ۸۸
- جدول ۵-۱ خواص مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی ۹۹
- جدول ۵-۲ خصوصیات آب تخصیص یافته به مدل عددی ۹۹
- جدول ۵-۶ روابط تجربی برای تعیین مقدار k ۱۰۱

فصل اول

کلیات

۱-۱ تعریف مساله

سد "تنگاب" سدی سنگریزه‌ای با استه رسی در ۹۰ کیلومتری جنوب شرق شهر شیراز بر روی تشکیلات سازند آسماری احداث شده است. در سدهای مخزنی حجم بسیار زیادی آب در پشت سد ذخیره می‌شود و با توجه به نیاز روزافزون بخش خانگی، کشاورزی و صنعتی، مراقبت از سد در مقابل فرار آب نیازی اساسی به شمار می‌آید. پرده‌ی آب‌بند در تکیه‌گاه‌ها و پی سد برای جلوگیری از فرار آب از ناپیوستگی‌های موجود در آن‌ها و با در نظر داشتن تأمین پایداری سازه‌ی اصلی و کاهش گرادیان هیدرولیکی و فشار برکنش^۱ وارده طراحی می‌گردد در این عملیات با حفر گمانه و تزریق دوغاب از فرار آب جلوگیری به عمل می‌آید.

تزریق عبارت از یک روش راندن سیال به داخل شکستگی‌ها و منافذ سنگ به منظور تشکیل یک محیط پایدار و مقاوم از توده سنگ است که با این عمل علاوه بر کاهش نفوذپذیری، پایداری توده سنگ حفرشده نیز افزایش می‌یابد. برای این منظور گمانه‌هایی در توده سنگ حفرشده و سیال با فشار به درون شکستگی‌های محیط رانده می‌شود. تزریق روشی است که به علت طبیعت نامنظم آن و تغییر-پذیری محیط، نمی‌توان آن را به‌طور دقیق استاندارد نمود. تزریق مشتمل بر توالی عملیات مختلف به شرح ذیل است: حفاری گمانه با قطر مناسب در محل و عمق‌های پیش‌بینی‌شده، تهیه و توزین نسبت-های مواد مختلف و مخلوط نمودن مخلوط یا محلول تزریق انتخابی، تزریق ماده‌ی تهیه‌شده در مقاطعی از گمانه و در نتیجه پر نمودن شکاف‌ها و شکستگی‌ها یا خلل و فرج.

روش‌های متنوعی وجود دارد که برای رسیدن به بهترین نتایج می‌توان از آن‌ها بهره گرفت. انتخاب روش به شرایط محلی سنگ بستگی دارد. هدف نهایی در این پروژه تعیین الگوی مناسب تزریق برای آب‌بندی سد تنگاب است که مهم‌ترین عامل در جلوگیری از فرار آب است.

¹ Up-lift

۲-۱ سابقه موضوع

پدیده تزریق، به شکل امروزی آن، بیش از ۲۰۰ سال قدمت دارد که در مقایسه با مهندسی عمران و معدن عمر کوتاهی دارد. مبتکر فن تزریق یک مهندس عمران فرانسوی بنام کارلوس بریگنی^۱ است. وی در اوایل سال ۱۸۰۰ برای تعمیر پی یک بند 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 که به فاصله یک متر حفر شده بودند، به کمک پمپ ضربه‌ای استفاده کرد. بعدها به جای رس از پوزولانا، آهک هیدرولیکی و سیمان پرتلند استفاده شد. در سال ۱۸۳۸ کولین^۳ اولین کسی بود که برای پر نمودن درز و شکاف‌ها در سد گرسبوس^۴ فرانسه از تزریق استفاده کرد. در سال ۱۸۴۶ پیتر بارلو^۵ یک سپر تونل استوانه‌ای اختراع کرد که می‌توانست فضای خالی به وجود آمده به وسیله عقب سپر را به صورت شعاعی تزریق کند و این اولین استفاده از تزریق سیمان در سازه‌های زیرزمینی بود. در سال ۱۸۹۳ در آمریکا اولین تزریق سیستماتیک درون سنگ در سد نیو کورتن^۶ نیویورک اجرا شد. در سال ۱۹۹۷ تزریق تحکیمی برای اولین بار برای کنترل حرکت زمین در حین ساخت تونل بولتون هیل^۷ استفاده شد [Chan Man, 2005]. روش‌های تجربی توسط والنر^۸ در سال ۱۹۷۶ و هاسلر^۹ در سال ۱۹۹۲ برای تعیین میزان نفوذ تزریق به کار گرفته می‌شد که کاربردهای آن به بیان دقیق باید با توجه به شرایط آزمون و هرگونه تعمیم دهی صورت می‌گرفت. محققین مختلف از جمله لویس^{۱۰} در سال ۱۹۴۷، هی^{۱۱} در سال ۱۹۹۰ و احمدی و ایلانگاسکر^{۱۲} در سال ۱۹۹۴ با فرض دوغاب به عنوان یک سیال نیوتونی رفتار می‌کند، روابط تخمین جریان سیال در شکستگی‌ها را توسعه دادند تا نفوذ دوغاب را پیش‌بینی کنند [Ahmadi and Savage, 2001]. اما چون دوغاب یک سیال ویسکوز است و به صورت یک سیال غیر نیوتونی رفتار می‌کند رویکردها ناصحیح بودند بنابراین احمدی و ساوج^{۱۳} در سال ۲۰۰۱ دوغاب را

¹ Charles Berigny

² Dieppe

³ Collin

⁴ Grosbois

⁵ Peter Barlow

⁶ New Croton

⁷ Bolton Hill

⁸ Wallner

⁹ Hassler

¹⁰ Louis

¹¹ He

¹² Illangasekare

¹³ Savage

به‌عنوان یک سیال بینگهام مدل کردند و یک راه‌حل تحلیلی برای میزان نفوذ دوغاب در یک شکستگی را به دست آوردند [Ahmadi and Savage, 2001]. چنین راه‌حل‌ها برای مکانیسم عملکرد تزریق می‌تواند درک خوبی بدهد اما در توسعه مدل به جریان واقعی در توده سنگ با الگوی پیچیده‌ی ناپیوستگی‌ها مشکلات زیادی به وجود می‌آورد [Hassler, 1988]. بنابراین به روش‌های عددی روی آورده شد. بر اساس روش مونت کارلو، لانگ^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۲ یک روش برای تولید شبکه‌های شکستگی توسعه دادند. انیشتین^۲ و بچر^۳ در سال ۱۹۸۳، السورس^۴ در ۱۹۸۶ با استفاده از شبکه شکستگی تصادفی تولیدشده تحلیل‌هایی برای جریان دوغاب در طول شکستگی‌ها انجام دادند [Hassler, 1988]. برخی دیگر از پژوهشگران گسترش دوغاب را با استفاده از مدل‌های عددی و تحلیلی آنالیز کردند. گوستافسون^۵ در سال ۱۹۹۶ روش عددی برای تخمین منطقه گسترش دوغاب در درزه‌های سنگ بر پایه‌ی خواص ژئومکانیکی سنگ و خصوصیات دوغاب گسترش داد [Gustafson, 1996]. یانگ^۶ در سال ۲۰۰۴ یک شبیه‌سازی با استفاده از درزه‌های تصادفی انجام داد و تأثیر خصوصیات درزه را بر روی عمق نفوذ دوغاب نشان داد. مدل او خواص دوغاب میانگین و انحراف استاندارد، مقدار عمق درزه، بازشدگی هیدرولیکی، طول و چگالی درزه‌ها را به عمق نفوذ مرتبط می‌ساخت ولی در آن تأثیر زبری درزه و دوام درزه روی منطقه گسترش دوغاب در نظر گرفته نشده بود [Yang, 2004]. راه‌حل تحلیلی برای جریان‌های یک‌بعدی و دوبعدی در سنگ درزه‌دار توسط گوستافسون و استیل^۷ در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. در کشور ایران در سال ۱۳۸۲ برای آب‌بندی قسمتی از پی جوش سنگی (کلوخه‌ای) سد کرخه در ناحیه‌ای موسوم به گالری ۹۵۰ (با توجه به عدم امکان احداث دیوار آب‌بند در محل مذکور و نیز عدم موفقیت کامل پرده تزریق سیمانی اجراشده در جلوگیری از نشت) برای اولین بار از روش تزریق شیمیایی استفاده شد [فیروزی، ۱۳۹۰]. برای آب‌بند نمودن پی سد گتوند، که از آب اشباع است، گمانه‌هایی به طول ۱۰۰ متر حفر گردیده است و تزریق سیمان در آن‌ها، در مقاطع ۵ متری و از پایین

¹ Long

² Einstein

³ Baecher

⁴ Elsworth

⁵ Gustafson

⁶ Yang

⁷ Stille

به بالا در هر گمانه انجام شده است [مجدی، ۱۳۸۸]. مجدی و همکاران در سال ۱۳۸۸ برای تحلیل عددی حرکت آمیزه تزریق در پی سد در هر مقطع و با توجه به گرانی‌های دو فاز آب و آمیزه تزریق، عمق مقطع تزریقی و ضخامت موردنیاز برای پرده آب‌بند، یک مدل بلوکی در هر طبقه ایجاد کردند و به کمک این مدل بلوکی، فشار تزریق، چگونگی انتشار آمیزه تزریق در اطراف گمانه تزریق و درجات اشباع آن، به کمک تحلیل عددی جریان سیال به شکل دوفازی میزان خوردند دوغاب موردنظر در زمان تزریق برای هر مقطع، به دست آوردند [مجدی، ۱۳۸۸].

۱-۳ لزوم انجام تحقیق

با توجه به حجم زیادی از پروژه‌های در دست اجرا در کشور از قبیل سدسازی، تونل‌سازی، معدن‌کاری و نظایر آن‌ها به‌طور عمده در توده سنگ‌ها انجام می‌شود، شناخت روش‌های بهسازی توده سنگ امری ضروری است. همچنین با توجه به بحران آب در دنیا به‌خصوص در ایران و نیاز روزافزون جامعه به آب و به طبع آن نیاز به احداث سدها و تونل‌های انتقال آب در محیط‌های کم آب و بنابراین عدم داشتن انتخاب گسترده برای محل ایجاد این سازه‌ها، توجه به پایدارسازی سازه‌ها روزبه‌روز در دنیا در حال گسترش و پیشرفت است. بررسی موارد علل شکست در سدهای بزرگ در نقاط مختلف دنیا، در اثر نادیده گرفتن پاره‌ای از نکات فنی-مهندسی در طراحی شالوده و عدم طراحی صحیح عملیات تزریق و تحکیم پی، اهمیت و حساسیت این بخش از دانش سدسازی و در کل ساخت سازه در سنگ‌های نیازمند به تحکیم را به اثبات رسانده است. بسیاری از مخازن سدهای ساخته‌شده دارای مشکلات ناشی از نشست هستند که ممکن است از پی یا بدنه سد اتفاق افتد. در ایران مشکل نشست آب از پی سد، در سدهای کرخه، ۱۵ خرداد، لار و شهید شاه‌چراغی گزارش شده است. از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از این پدیده در زیر سازه‌های آبی صورت می‌گیرد احداث پرده‌های آب‌بند است که از طریق الگوی مناسب تزریق می‌توان این پرده‌های آب‌بند در برابر فرار آب مؤثر واقع شوند.

۴-۱ روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای انجام و منابع و اطلاعات مورد نیاز گردآوری می‌شود، در گام بعدی پردازش اطلاعات می‌شود این مرحله شامل؛ بررسی و تحلیل ویژگی‌های هندسی و مکانیکی توده سنگ، بررسی و تحلیل روش و مشخصات تزریق و ماده مورد استفاده برای تزریق است. سپس مدل هندسی ناپیوستگی‌ها با استفاده از الگوی توسعه داده شده در نرم‌افزار 3DEC نسخه ۵ ساخته خواهد شد، در ادامه شاخص‌های تزریق پذیری تعیین می‌شود. به منظور تعیین شاخص‌های تزریق پذیری از نتایج آزمایش‌های لوژان انجام شده در ساختگاه سد تنگاب استفاده خواهد شد. سپس تحلیل عددی با نرم‌افزار 3DEC با توجه به مشخصات توده سنگ و مشخصات رئولوژیکی مواد باهدف به دست آوردن میزان انتشار مواد تزریق شده در توده سنگ پرداخته می‌شود. در نهایت از نتایج به دست آمده از انتشار مواد به درون توده سنگ، الگوی مناسب تزریق به دست می‌آید.

۵-۱ ساختار تحقیق

این کار تحقیق به عنوان پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد در ۶ فصل تهیه و تدوین شده است. در فصل اول با عنوان کلیات به صورت خلاصه به عناوینی مشتمل بر ضرورت، سابقه و روش پژوهش پرداخته شده است.

در فصل دوم عوامل تأثیرگذار بر عملیات تزریق که شامل خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ و مواد مصالح مورد استفاده در عملیات تزریق است به تفصیل شرح داده شده است.

در فصل سوم مطالعه‌ای از پیشینه روش‌های عملیات تزریق ارائه شده است.

در فصل چهارم به معرفی ساختگاه سد تنگاب و وضعیت زمین‌شناسی این ساختگاه پرداخته شده است. سپس داده‌های صحرایی برداشت شده از ناپیوستگی‌های ساختگاه به منظور تعیین دسته‌درزه‌ها،

خصوصیات پارامتری و توابع توزیع آماری حاکم بر هریک آورده شده است و با استفاده از توابع توزیع به دست آمده شبکه شکستگی مجزا (DFN) ایجاد شده است.

در فصل پنجم به مدل سازی عددی توده سنگ ساختگاه سد تنگاب توسط نرم افزار المان مجزای 3DEC پرداخته شده و بر اساس شبکه شکستگی مجزای ایجاد شده وضعیت نفوذپذیری توده سنگ ساختگاه مذکور توسط نرم افزار تحلیل و مدل سازی شده و سپس با مقادیر برجای تست لوژان اعتبار سنجی شده است. در نهایت به مدل سازی عملیات تزریق پرداخته شده است.

در فصل ششم نتایج حاصل از تحقیق و پیشنهادهایی برای پیشبرد مطالعه پیش رو ارائه شده است.

فصل دوم

بررسی عوامل تأثیرگذار بر عملیات تزریق

۱-۲ مقدمه

طراحی یک عملیات تزریق، اعم از انتخاب دوغاب مناسب، فشار تزریق، فاصله و جهت چال‌ها بستگی به ویژگی‌های ژئومکانیکی محیط تزریق دارد، زیرا قابلیت تزریق یک توده سنگ کاملاً وابسته به خصوصیات هیدرولیکی آن و هندسه جریان است. تفسیر نتایج آزمایش‌های تخمین نفوذپذیری توده سنگ و همچنین قضاوت در مورد قابلیت تزریق آن تنها بر اساس آزمایش‌های مذکور بدون در نظر گرفتن خصوصیات هندسی درزه‌ها به نتایج قابل قبولی منتهی نخواهد شد. خصوصیات مکانیکی خلل و فرج سنگ بکر و ناپیوستگی‌های توده سنگ نیز تأثیر زیادی بر انتخاب پارامترهای تزریق به خصوص فشار آن دارد. بنابراین می‌توان ادعا کرد شناخت عوامل مؤثر بر تزریق یکی از پایه‌های موفقیت هر پروژه تزریق به شمار می‌آید.

۲-۲ خصوصیات هیدرولیکی سنگ

همان‌گونه که در بخش قبل عنوان شد، قابلیت تزریق یک محیط وابسته به خصوصیات هیدرولیکی آن است. شناخت این دسته از ویژگی‌های محیط، همواره هدف اصلی در عملیات تزریق به‌ویژه با هدف آب‌بندی است. در این بخش خصوصیات هیدرولیکی سنگ تعریف شده و در بخش بعد روش‌های تخمین این ویژگی‌ها و نحوه تفسیر نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوطه شرح داده می‌شود.

اولین خصوصیت نفوذپذیری است که در اصل یک تانسور مرتبه دو (k_{ij}) است و به صورت رابطه ۱-۲ تعریف می‌شود:

$$q_i = \frac{-k_{ij}}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad 1-2$$

که در آن:

q_i = دبی ویژه^۱ (دبی در واحد سطح)

¹ Specific discharge

$$\frac{\partial P}{\partial x_j} = \text{گرادیان فشاری که سبب جریان می‌شود.}$$

$$\mu = \text{ویسکوزیته سیال}$$

تقریباً در اغلب مسائل مهندسی سنگ، جریان یک بعدی در نظر گرفته شده و نفوذپذیری نیز با یک مقدار عددی تعیین می‌شود. اگر جریان یک بعدی در یک ناپیوستگی در نظر گرفته شود رابطه ۲-۱ به صورت زیر ساده خواهد شد [Hudson and Harrison, 1997]:

$$q = \frac{-k \partial p}{\mu \partial x} \quad 2-2$$

نفوذپذیری دارای بعد L^2 است. واحد آن داری^۱ است یک داری معادل 10^{-8} سانتی متر مربع است [Widmann, 1996]. حال با توجه به اینکه اغلب اوقات در مهندسی سنگ سیال تراوش کننده آب است، رابطه ۲-۲ به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$q = \frac{k \partial P}{\gamma_f \partial x} \quad 3-2$$

که در آن:

$$\gamma_f = \text{وزن مخصوص سیال}$$

K یا هدایت هیدرولیکی^۲، در رابطه ۳-۲ دارای بعد LT^{-1} است و وابسته به خصوصیات سیال است. بیشتر اوقات در مهندسی سنگ از هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود و نفوذپذیری جز در پاره‌ای مواقع (مثلاً در مهندسی نفت و مخزن) کاربرد چندانی ندارد. به همین دلیل بسیاری از مولفین نیز کلمه نفوذپذیری را برای هدایت هیدرولیکی بکار می‌برند. به منظور ایجاد هماهنگی، در این پایان‌نامه نیز از واژه نفوذپذیری برای معرفی K استفاده می‌شود. هدایت هیدرولیکی (یا از این پس نفوذپذیری) از قانون داری تعیین می‌شود. طبق این قانون برای جریان-های آرام می‌توان نوشت [Hudson and Harrison, 1997]:

$$Q = K A i \quad 4-2$$

¹Darcy

² Laminar

$$V = K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad 5-2$$

که در آن:

$$Q = \text{دبی جریان}$$

$$A = \text{مقطع عبوری جریان}$$

$$K = \text{هدایت هیدرولیکی}$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \text{گرادیان هیدرولیکی}$$

$$V = \text{سرعت ظاهری در قانون دارسی}$$

قابلیت انتقال (T)، نتیجه حاصل ضرب ضخامت سفره (b) در نفوذپذیری (K) آن است که معمولاً

توسط آزمایش‌های فشار آب^۱ از طریق رابطه زیر بدست می‌آید [Widmann,1996].

$$T = K \cdot b \quad 6-2$$

بازشدگی هیدرولیکی^۲ (e)، نظریه جریان سیال درون ناپیوستگی‌ها، به وسیله هوک^۳ و بری^۴ براساس

جریان بین دو صفحه صاف و موازی بنا گردید که قانون مکعب^۵ نامیده می‌شود. در این تئوری، درزه‌های

واقعی با درزه‌هایی که دیواره‌های صاف و موازی دارند ساده سازی شده است. بر طبق این تئوری می‌توان

قانون دارسی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Q = \frac{ge^3}{12\vartheta L} \cdot H_L \quad 7-2$$

که در آن:

$$H_L = \text{افت هد جریان بین دو نقطه}$$

$$\vartheta = \text{ویسکوزیته سینماتیکی آب}$$

$$L = \text{طول درزه در جهت حرکت سیال}$$

$$e = \text{بازشدگی دو صفحه صاف و موازی}$$

$$g = \text{شتاب گرانش}$$

¹ Water pressure test (WPT)

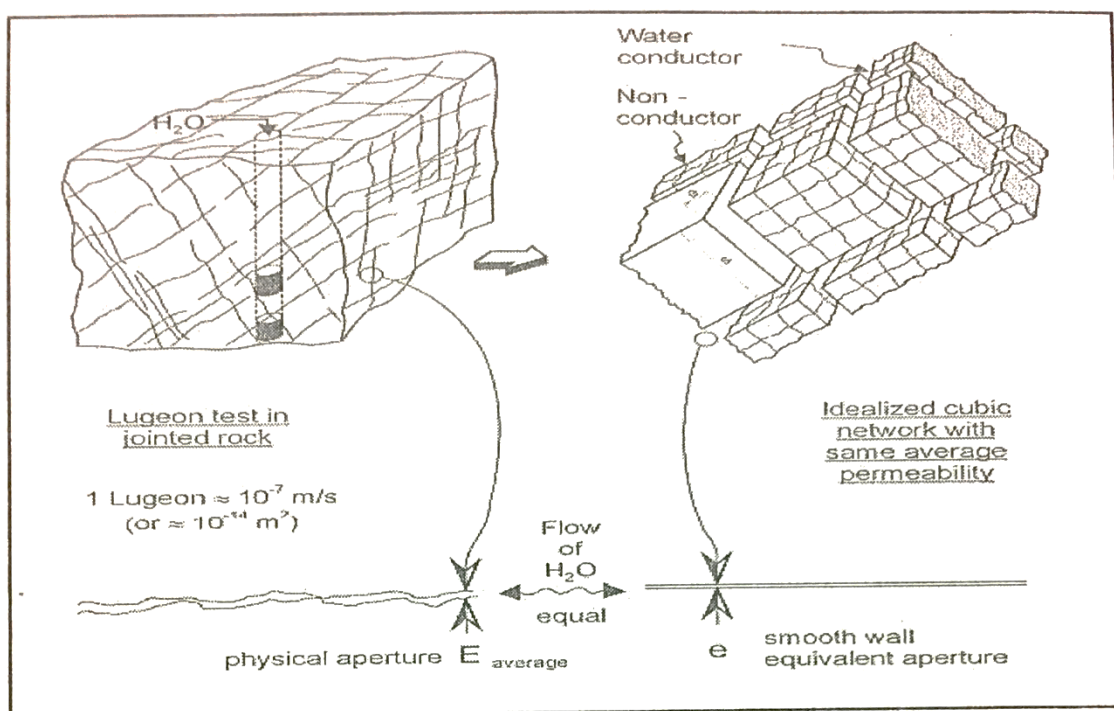
² Hydraulic aperture

³ Hoek

⁴ Bary

⁵ Cubic law

همان گونه که در فرمول ۲-۷ مشهود است، نفوذپذیری یک درزه شبیه‌سازی شده، با توان سوم بازشدگی درزه رابطه مستقیم دارد (قانون مکعب). این بازشدگی به بازشدگی هیدرولیکی مشهور است و برای یک درزه با بازشدگی فیزیکی^۱ (E)، برابر با مقدار بازشدگی یک درزه صاف با دیواره‌های موازی است که نفوذپذیری آن به اندازه نفوذپذیری درزه E باشد. این بازشدگی تابع پیچیده‌ای از زبری درزه، تغییرات بازشدگی و پرشدگی بخشی آن است. شکل ۲-۱ ساده‌سازی درزه‌های واقعی را با درزه‌های صاف و موازی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱ مفهوم بازشدگی هیدرولیکی [Brassington,2007]

بازشدگی هیدرولیکی بسیار کوچک‌تر از بازشدگی فیزیکی است. از آنجا که محاسبه بازشدگی فیزیکی در اغلب موارد غیرممکن و یا پیچیده است، بنابراین به‌طور معمول از بازشدگی هیدرولیکی استفاده می‌شود [Fransson,2001, Brassington,2007].

¹ Physical aperture

به شکل کاربردی تر قانون مکعب را می توان براساس تحقیقات گوستافسون^۱ برای یک درزه به صورت زیر نوشت [Dalmalm,2004]:

$$T = \frac{e^3 \rho_w g}{12 \mu_w} \quad ۸-۲$$

که در آن:

μ_w = ویسکوزیته دینامیکی آب

ρ_w = چگالی آب

T = قابلیت انتقال درزه

g = شتاب گرانش زمین

بازشدگی هیدرولیکی در تزریق سنگ های درزه دار از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در اکثر تحقیقاتی که در زمینه نفوذ دوغاب های پایه سیمانی انجام شده است، سعی شده ارتباطی بین باز شدگی هیدرولیکی و اندازه دانه های دوغاب یافت شود. همان گونه که از معادلات بالا برمی آید این خصوصیات وابسته به یکدیگر هستند.

۲-۳ رفتار هیدرولیکی درزه

در بسیاری از توده سنگ ها، بیشترین مقدار جریان سیال عبوری از میان درزه ها، گسل ها، و یا شکستگی ها اتفاق می افتد و مقدار کمی از سیال از میان جسم سنگ جریان می یابد. در بعضی از موارد بیشترین مقدار سیال از درون یک ناپیوستگی منفرد جریان می یابد و در موارد دیگر جریان سیال در میان یک شبکه به هم متصل از درزه ها عبور می کند. در نتیجه جریان سیال در میان درزه ها از اهمیت خاصی در مطالعات ژئوتکنیکی برخوردار است.

تقریباً نیمی از ذخایر هیدروکربنی شناخته شده و بیشتر ذخایر ژئوترمال در توده سنگ های درزه دار واقع هستند. همچنین فهم چگونگی جریان سیال در درزه ها از اهمیت خاصی در فهم و پیش بینی بررسی

¹ Gustafsson

عملکرد ذخایر دفن زباله‌های استه‌ای در زیرزمین برخوردار است. در نتیجه مطالعه جریان سیال در میان توده سنگ درزه‌دار دارای اهمیت خاصی در مطالعات ژئوتکنیکی است. فرآیندهای هیدرولیکی در ژئوتکنیک از جنبه‌های مختلف مانند فشار منفذی (در محیط‌های پیوسته)، فشار بلند کننده^۱ (در محیط‌های ناپیوسته)، جریان، انتقال و حمل مواد^۲ و تأثیر شیمیایی و فیزیکوشیمیایی سیال بر سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. محیط‌های متخلخل شامل خاک‌ها و سنگ‌هایی که در آن‌ها جسم سنگ دارای تخلخل بالا است [Jing, Stephansson, 2007]. در سنگ‌های سختی که دارای شکستگی می‌باشند و ماتریکس سنگ دارای نفوذپذیری ناچیزی باشد، محیط را می‌توان محیط ناپیوسته در نظر گرفت. در صورتی که توده‌سنگ دارای تخلخل و شکستگی‌های زیادی باشد، توده سنگ را محیط متخلخل دوگانه در نظر می‌گیرند [Jing, Stephansson, 2007]. در اغلب موارد به‌خصوص در سنگ‌های سخت مانند سنگ‌های کریستالین، عبور جریان سیال از شبکه درزه‌ها بیشترین مقدار جریان عبوری از توده سنگ را تشکیل می‌دهد و عبور جریان از جسم سنگ بسیار کم است و اغلب از عبور جریان جسم سنگ صرف نظر می‌شود. در اینجا می‌بایست به این نکته اشاره شود که در بسیاری از موارد جریان سیال در میان توده سنگ به‌صورت جریان گذرا^۳ است. به عنوان نمونه در معادن به علت حفاری، بارگذاری و بابررداری-هایی متوالی در توده‌سنگ اتفاق می‌افتد که این خود موجب می‌شود جریان سیال در میان درزه‌ها به‌صورت گذرا باشد [Jing, Stephansson, 2007]. جریان گذرا در درزه‌ها ممکن است موجب تغییر فشار سیال شده و ایجاد تغییر شکل در درزه‌ها ایجاد می‌شود. همچنین در پی سدها در مواقع آبرگیری، فشار آب در درزه‌ها افزایش می‌یابد و افزایش فشار ممکن است موجب افزایش بازشدگی درزه‌ها شود و رژیم جریان در توده‌سنگ را تغییر دهد. این فرآیندها لزوم تحلیل هیدرو مکانیکی برای بدست آوردن شناخت درستی از رفتار آبرگیری توده‌سنگ را برجسته می‌کند [Indraratna, 1999].

¹ Uplift pressure

² Particle transport

³ Transient flow

۲-۴ تعیین خصوصیات هیدرولیکی سنگ

آزمایش‌هایی که برای تعیین نفوذپذیری استفاده می‌شوند به آزمایش‌های هیدرولیکی^۱ مشهور می‌باشند [Dalmalm,2004]. این آزمایش‌ها به صورت تک چالی^۲ و یا چند چالی^۳ انجام می‌گردند با توجه به سرعت بیشتر و نیز اقتصادی بودن، آزمایش‌های تک چالی در اکتشافات عمیق زمین‌شناسی بسیار معمول هستند. اما در ارتباط با چال‌های تزریق، می‌توان آزمایش‌های هیدرولیکی را به دو نوع اصلی تقسیم کرد. نوع اول آزمایش‌های اکتشافی^۴ که برای طراحی عملیات تزریق و به منظور ارزیابی میزان نفوذپذیری محل مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع دوم آزمایش‌های چال تزریق^۵ که حین عملیات، هر چال قبل از آنکه تزریق شود تحت آزمایش قرار می‌گیرد [Houlsby,1990]. در ادامه به تشریح هر یک از انواع آزمایش‌ها مذکور پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱ آزمایش‌های اکتشافی

۲-۴-۱-۱ آزمایش‌های پمپاژ

این آزمایش‌ها، شامل پمپاژ آب به بیرون گمانه با نرخ کنترل شده و اندازه‌گیری اثرات آن روی سطح تراز آب در چاه‌های پمپاژ و یا گمانه‌های شاهد هستند. وقتی که آب یک چاه پمپ می‌شود سطح آب در اطراف چاه در پاسخ به پمپ شدن آب پایین می‌آید و یک فرورفتگی مخروطی^۶ 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 بکار رود. این آزمایش‌ها بسیار وقت‌گیر و اغلب هزینه‌بر بوده و به طور معمول به خاطر شرایط زمین‌شناسی و در نتیجه پیچیده بودن شرایط آب زیرزمینی به سادگی قابل تفسیر نیستند. اما به هر حال، بهترین راه تخمین خصوصیات کلی هیدرولیکی یک سفره آب زیرزمینی به شمار می‌آیند. هر چند این آزمایش‌ها کاربرد بسیار گسترده‌ای در علم هیدرولوژی دارند، اما حداقل در بررسی‌های عمیق زمین‌شناسی و به‌ویژه در تزریق (به دلایلی که به

¹ Hydraulic tests

² Single borehole

³ Multiple borehole

⁴ Exploratory tests

⁵ Borehole test

⁶ Cone of depression

آن‌ها اشاره شد) کاربرد ندارند [Brassington,2007]. براساس مدارک موجود، تاکنون گوستافسون و فرانسون^۱ 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^۲ است که رابطه تعادل^۳ یا حالت پایدار^۴ نیز خوانده می‌شود [Brassington,2007]. 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 به طور کامل در این سفره فرورفته است، از رابطه ۹-۲ بدست می‌آید. پارامترهای رابطه ۹-۲، در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌اند.

$$Q = AV = 2\pi r b k \frac{dh}{dr} \quad 9-2$$

که در آن:

V = سرعت ظاهری قانون دارسی (رابطه ۵-۲)

A = مقطع جریان

r = فاصله شعاعی نقطه اندازه‌گیری هد

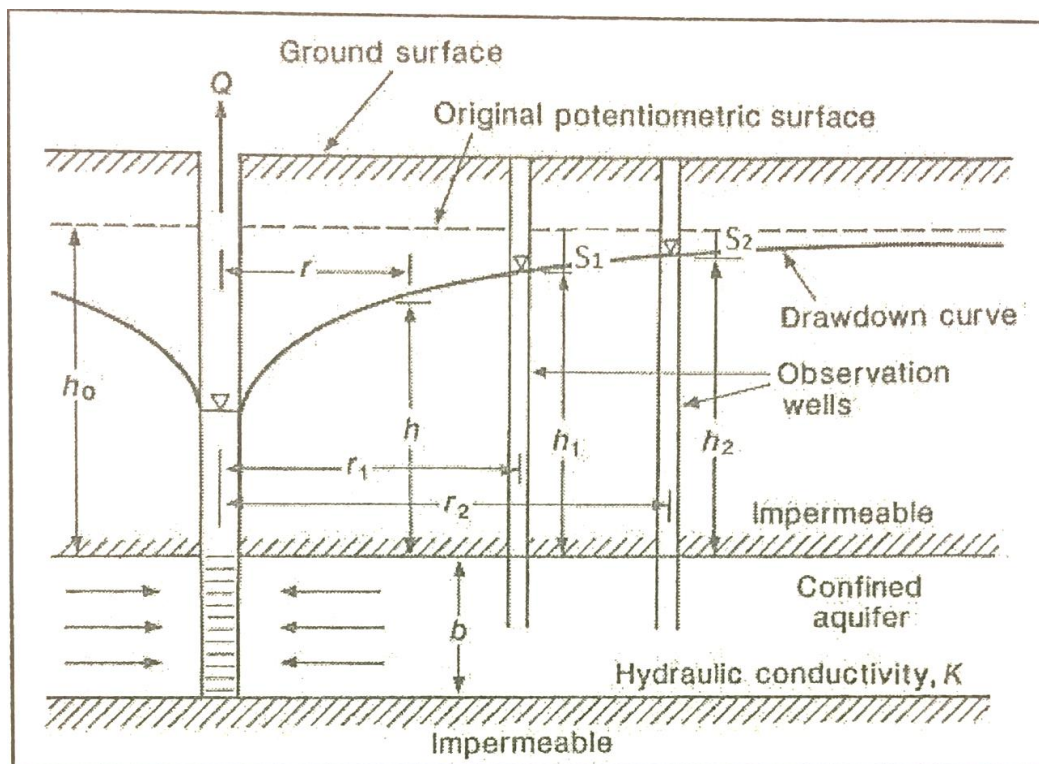
B = ضخامت سفره

¹ Fransson

² Thiem

³ Equilibrium

⁴ Steady state



شکل ۲-۲ وضعیت جریان شعاعی در یک چاه در یک سفره محصور [Hiscock,2005]

با مرتب سازی و انتگرال گرفتن از رابطه ۲-۹ برای شرایط مرزی در هر نقطه‌ای که در آن $h = h_w$ و $r = r_w$ باشد، رابطه ۲-۱۰ بدست می‌آید.

$$Q = \frac{2\pi kb(h-h_w)}{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} \quad 10-2$$

کاربرد رابطه تیم مستلزم اندازه‌گیری افت هد در دو فاصله مختلف توسط دو چاه شاهد است. پس از آن قابلیت انتقال محیط از رابطه ۲-۱۱ بدست خواهد آمد [Hiscock,2005].

$$T = kb = \frac{Q}{2\pi(h_2-h_1)} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{Q}{2\pi(s_1-s_2)} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad 11-2$$

۲-۱-۴-۲ 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

¹ Packer tests

فشار آب^۱ یا اندازه‌گیری نشت آب^۲ 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 بدست آمده برای تخمین نفوذپذیری و بررسی رفتار و واکنش سنگ در برابر جریان و فشارهای مختلف هیدرولیکی است. اگر در رابطه داری به جای ΔH ، پارامتر مؤثر P_{eff} به صورت ذیل وارد شود، رابطه داری به صورت روابط ۱۳-۲ و ۱۴-۲ قابل بازنویسی خواهد بود.

$$P = \gamma \Delta H \quad 12-2$$

$$k = \frac{C \cdot Q}{P_{eff}} \quad 13-2$$

$$C = \frac{P_w \cdot g \cdot L}{A} \quad 14-2$$

در آن‌ها P_{eff} برابر ΔH یعنی افت فشار هیدرواستاتیک معادل با افت هد ΔH است. به عبارت دیگر در این آزمایش فرض بر این است که مقدار فشار هیدرواستاتیک جریان در ابتدای مسیر برابر P_{eff} و در انتهای مسیر به صفر خواهد رسید. بنابراین نسبت دبی ویژه به فشار مؤثر (اختلاف فشار آب مورد تزریق و آب زیرزمینی موجود در محیط) متناسب با شدت نفوذپذیری محیط خواهد بود.

بنا به نظر اکثر قریب به اتفاق محققین، این آزمون به‌عنوان بهترین روش ارزیابی وضعیت هیدرولیکی یک مقطع شناخته شده است. 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 به شمار 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. علیرغم معایب مذکور، این آزمون با توجه به مزایای منحصر به فرد خود تاکنون به‌عنوان

¹ Water pressure tests

² Water loss measurement

پربکاربردترین آزمون برجا به منظور ارزیابی وضعیت هیدرولیکی توده سنگ در مطالعات ژئوتکنیکی، به خصوص مطالعات تزریق پذیری شناخته شده است. این آزمایش معمولاً در ۵ پله صورت می گیرد. ابتدا حدود ۵ دقیقه تحت فشار بسیار کم و نزدیک به صفر، آب به درون گمانه تزریق می شود. هدف از این کار شستشوی سطح مقطع گمانه است. پس از طی این مرحله با گشودن بیشتر شیر تزریق، به آرامی مرحله اول پله اول آغاز می شود که با باز کردن بیشتر شیر مقدار فشار موردنظر در پله اول کسب می گردد. این فشار در تمام مرحله اول حفظ می شود. هر مرحله از هر پله حدود ۵ دقیقه طول خواهد کشید و مقدار دبی آب در این ۵ دقیقه محاسبه می گردد. پس از طی این مرحله، مراحل دوم و سوم پله اول با همین روال تحت فشار مشخص و موردنظر در پله اول انجام می شود. پارامتر دبی ویژه در هر مرحله، از تقسیم حجم آب تزریق شده بر حاصل ضرب طول مدت اجرای مرحله در طول مقطع بدست خواهد آمد. شرط اتمام یک پله کاهش اختلاف دبی ویژه در دو مرحله متوالی انتهایی پله به کمتر از مقدار ۱۰ درصد است (معمولاً هر پله در ۳ مرحله کامل می گردد).

سایر پله های آزمون لوژان همچون پله اول با تنظیم فشار مورد نظر و ثبت دبی ویژه در مراحل آن پله صورت می گیرد. نحوه اعمال فشار به صورت رفت و برگشتی است. در این حالت فشار مانومتری از صفر آغاز شده و به صورت پلکانی تا مقدار حداکثر افزایش می یابد. پس از طی پله حداکثر، فشار مجدداً به صورت پلکانی تا مقدار حداکثر تنظیم می شود [کربلا، ۱۳۸۸]. اما محققین مختلف در ارتباط با نحوه تعیین فشار حداکثر مجاز، ملاکها و معیارهای متفاوتی را ارائه داده اند 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 می کنند 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 می گردد و فشار حداکثر ۱ مگا پاسکال در موارد معمول خیلی بالاتر از فشار حداکثر

¹ Lugeon

² Houlsby

³ Ewert

در آزمون لوژان است. هر چند در مواردی در آزمایش‌های زیرزمینی فشار بالاتر از آن نیز استفاده می‌گردد [Ewert,1998].

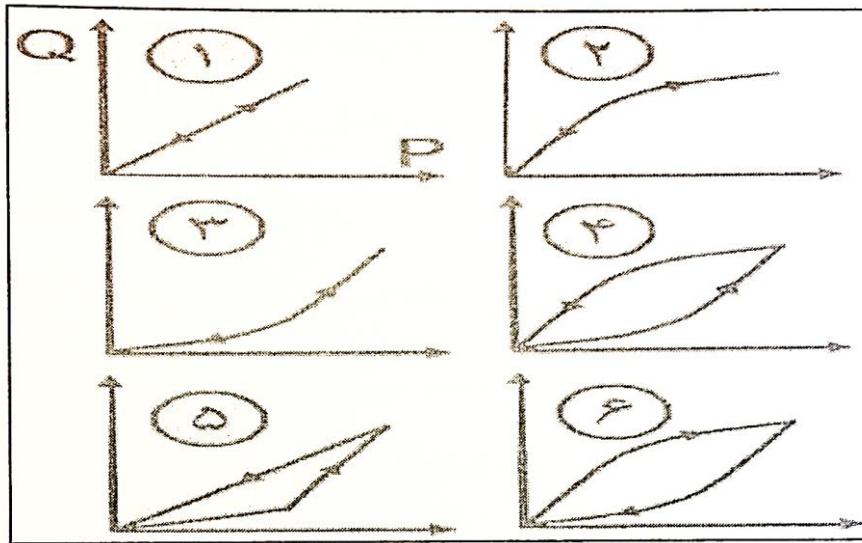
همچنین اورت عنوان می‌کند که فشار حداکثر آزمایش لوژان، حداقل در چند چال آزمایش باید آنقدر زیاد باشد تا بتوان فشار بحرانی که سبب شکست هیدرولیکی می‌شود را پیدا کرد. چون این خصوصیت برای تعیین فشار تزریق لازم خواهد شد [Ewert,1998]. هنیز^۱ معتقد است که ابتدا فشار شکست هیدرولیکی باید تعیین شود و سپس آزمایش‌های فشار آب در فشاری بین ۲۰ الی ۳۰ درصد کمتر از فشار شکست هیدرولیکی انجام گیرد [Heinz,1998].

به عنوان آخرین نکته، طول مقطع این آزمایش معمولاً ۵ متر است. اما در صورت تغییرات شدید مشخصات هیدرولیکی سنگ به ترتیب به ۳ و حتی ۱ متر نیز کاهش می‌یابد [کربلا، ۱۳۸۸].

با توجه به مطالب عنوان شده می‌توان گفت در هر پله از آزمایش لوژان یک زوج مرتب (P,Q) بدست می‌آید. پارامتر P فشار مؤثر و پارامتر Q دبی در واحد طول مقطع است. این دو پارامتر به ترتیب باید بر حسب MPa و $Lit/m \times min$ بیان شوند. در صورتی که زوج‌های مرتب بدست آمده از تمامی پله‌ها به دستگاه مختصاتی که در آن محورهای افقی و قائم به ترتیب بیانگر P و Q است، منتقل شده و براساس ترتیب دستیابی به هم متصل گردند، نمودار P-Q مقطع مورد نظر قابل ترسیم بوده و از لحاظ کیفی مد نظر قرار می‌گیرند [کربلا، ۱۳۸۸].

در دسته‌بندی معمول، نمودارها در ۶ گروه اصلی جای می‌گیرند. در شکل ۲-۳ این حالات اصلی نشان داده شده‌اند.

¹ Heinz



شکل ۲-۳ دسته‌بندی اصلی و معمول نمودارهای P-Q (نمودار ۱: جریان آرام، نمودار ۲: جریان آشفته، نمودار ۳: اتساع الاستیک، نمودار ۴: آب شستگی، نمودار ۵: شکست هیدرولیکی، نمودار ۶: انسداد) [کربلا، ۱۳۸۸]

۱ - جریان آرام^۱ (یکنواخت): بر اثر این جریان وضعیت سنگ دچار تغییر نمی‌شود. اصولاً جریان یکنواخت در فشار و دبی پایین ایجاد می‌شود و از نظر ژئوتکنیکی مربوط به درزه‌های بسته است. رفتار مقطع در جریان یکنواخت در حالت کلی برگشت‌پذیر است [کربلا، ۱۳۸۸].

۲ - جریان آشفته^۲: در این حالت با افزایش فشار، دبی به صورت خطی افزایش نمی‌یابد بلکه از نرخ افزایش کمتری برخوردار خواهد بود. رفتار مقطع در این جریان نیز برگشت‌پذیر است [کربلا، ۱۳۸۸].

در صورتی که نرخ جذب و متعاقباً مقدار نفوذپذیری کم باشد، می‌توان ایجاد جریان آشفته را بیشتر ناشی از زبری درزه‌ها دانست. اما در صورت مشاهده نفوذپذیری زیاد آن را باید به باز بودن درزه‌ها منسوب کرد. اصولاً تزریق در مقاطعی که نرخ افزایش فشار بیشتر از نرخ افزایش دبی است، مشکل آفرین خواهد بود. در فشارهای پایین نفوذ زیاد، به علت کم بودن فشار، رخ نمی‌دهد. در فشارهای بالا نیز به علت ایجاد جریان آشفته نفوذ دوغاب صورت نمی‌گیرد. سنگ‌هایی که در دسته‌بندی‌های ۱ و ۲

¹ Laminar

² Turbulent

قرار می‌گیرند حداقل در فشارهای مورد آزمایش، تغییرات نفوذپذیری ناچیزی دارند و مدول الاستیسیته آنها نیز بالا است. اما به هر حال واکنش سنگ به آزمایش لوژان ممکن است متفاوت باشد [کربلا، ۱۳۸۸].

۳ – اتساع الاستیک^۱: این نوع رفتار اصولاً با اندک تغییرات اولیه پلاستیک همراه است. به علت بازتر شدن مسیرهای نشست آب در فشارهای بالا، دبی ورودی نسبت به حالت عادی بیشتر افزایش یافته و در نتیجه منحنی به سمت بالا تقعر می‌یابد. اما به هر حال تغییرات نفوذپذیری برگشت پذیر است. در صورت تزریق در چنین مقاطعی انتظار می‌رود که با حفظ فشار دوغاب در حدود حداکثر فشار لوژان مقاطع دچار شکست نشود و به علت بازشدگی بیشتر، نفوذ دوغاب راحت تر صورت گیرد. همچنین به علت بازگشت مقاطع به حالت اولیه خود پس از حذف فشار تزریق، دوغاب در فضای شکستگی‌ها دچار تراکم می‌شود که از نظر آب‌بندی و تحکیم بسیار مناسب است [کربلا، ۱۳۸۸].

۴ – آب‌شستگی^۲: در شرایطی که درزه‌ها از مواد قابل شستشو پر شده باشند با حرکت آب از این درزه‌ها، مواد دچار فرسایش شده و در نتیجه مسیر جریان آب باز می‌گردد. به علت وجود حالت برگشت‌ناپذیر در محیط، منحنی رفت و برگشت فاقد انطباق هستند که اگر فرایند با سرعت بالایی واقع شود می‌توان نوع مواد پرکننده را درشت دانه و غیر چسبنده دانست و اگر زمان فرایند آب‌شستگی طولانی تر باشد نوع مواد پرکننده ریز دانه و چسبنده است [کربلا، ۱۳۸۸].

۵ – شکست هیدرولیکی: در اثر فشار آب درون درزه‌ها سنگ دچار شکست شده و مسیرهای آب‌بر جدیدی تشکیل خواهد شد. مهم‌ترین علامت وقوع شکست هیدرولیکی افزایش ناگهانی دبی پله(ها)ی آخر نسبت به پله(ها)ی میانی است. به طوری که دبی در انتهای نمودار بیش از ۲ تا چندین برابر دبی در پله‌های میانی خواهد بود و فشار در نقطه شکست منحنی به عنوان فشار بحرانی P_c معرفی می‌گردد [کربلا، ۱۳۸۸].

¹ Dilation

² Wash-out

۶ - انسداد^۱: بر اثر عواملی چون تورم مواد پرکننده در اثر جذب آب، تجمع مجدد آن‌ها در مسیر جریان یا تورم دیواره درزه در حضور جریان آب، سطح مقطع مسیر هیدرولیکی در درزه‌ها دچار کاهش می‌شود. بر همین اساس دبی جریان با گذشت زمان و افزایش فشار چنانچه باید افزایش نمی‌یابد. رهاسازی این چنین مقاطع، به حساب کاهش نفوذپذیری در آن‌ها و عدم اجرای تزریق باعث افزایش احتمال ایجاد مناطق نفوذپذیر خواهد شد. به ویژه در مواردی که نفوذپذیری به شدت دچار کاهش شده است باید نسبت به حذف یا بازگشایی مسیرهای مسدود در درزه‌ها اقدام نمود. این امر به وسیله انجام مجدد آزمون لوژان با اعمال مقادیر فشار بیشتر در پله‌های آزمون امکان‌پذیر است. هرچند شکست هیدرولیکی عموماً پدیده‌ای مضر شناخته می‌شود، اما در صورت عدم رفع انسداد توسط آزمون لوژان در شرایط ذکر شده (کاهش شدید نفوذپذیری) شکست هیدرولیکی در حین تزریق دوغاب و با اعمال فشاری بیش از حد مقاومت مقطع توصیه شده است [کربلا، ۱۳۸۸].

اورت سنگ‌هایی که دچار آب شستگی یا انسداد می‌شوند، سنگ‌های با نفوذپذیری بسیار تغییرپذیر معرفی می‌کند. شناخت رفتارهای این‌چنینی سنگ، مهم‌ترین کاربرد نمودارهای P-Q است. به منظور ارزیابی دقیق رفتار سنگ بکار بردن فشار مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چه بسا در آزمون لوژان به علت پایین بودن فشار طراحی چنین رفتارهایی تشخیص داده نشود.

ب) عدد لوژان

عدد لوژان از تقسیم دبی ویژه مقطع مورد آزمایش، در پله i ام بر فشار پله i ام بدست 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

¹Void filing

به دست آمده از هر پله آزمایش در یک مقطع، مطابق روش ارائه شده توسط هولسی انتخاب می‌گردد. جدول ۱-۲ روش تعیین عدد لوژان بر اساس مقادیر لوژان و الگوی تغییرات آن‌ها در پله‌های آزمون فشار آب را ارائه می‌دهد [کربلا، ۱۳۸۸].

جدول ۱-۲ 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 یکپارخت	۱			
	۲		۱۰	متوسط مقادیر
	۳		۱۰	تمامی لوژان
	۴		۱۰	
	۵		۱۰	
پایان آشفته	۱			
	۲			کمترین مقدار
	۳		۱۰	بالاترین فشار ایجاد می‌شود
	۴			
	۵			
اتساع	۱			
	۲			بیشترین مقدار در
	۳		۱۰	بالاترین فشار ایجاد می‌شود
	۴			تغییرات نسبتاً ملایم
	۵			
آبشستگی	۱			
	۲			مقادیر با پیشرفت
	۳			آزمایش افزایش می‌یابد
	۴			
	۵		۱۰	
آب شکست	۱			
	۲		۱۰	بیشترین مقدار در
	۳		۱۰	بالاترین فشار ایجاد می‌شود
	۴		۱۰	تغییرات در پله‌های
	۵		۱۰	
انسداد	۱			
	۲			مقادیر با پیشرفت
	۳			آزمایش کاهش می‌یابد
	۴			
	۵		۱۰	

IO: پله مورد نظر برای انتخاب عدد لوژان

یکی از آزمایش‌هایی که ممکن است در زمینه آزمایش‌های اکتشافی فراوان به آن اشاره شده باشد، آزمایش لوفران^۱ است که برای تعیین نفوذپذیری رسوبات ناپیوسته از جمله آبرفت‌ها، واریزه‌ها و خاک‌های برجا در صحرا به کار می‌رود [معاونت امور فنی و تدوین معیارها، ۱۳۷۸].

۲-۴-۲ آزمایش‌های چال تزریق

آزمایش‌هایی که تا کنون به آن‌ها اشاره شده است، آزمایش‌هایی هستند که به منظور بررسی نفوذپذیری کلی ساختگاه مورد مطالعه و به اصطلاح، در بررسی‌های اکتشافی کاربرد دارند. از این میان آزمایش‌های لوژان کلاسیک به علت سادگی اجرا و تفسیر نتایج آن با وجود آنکه دقت پایینی نسبت به آزمون پمپاژ دارد به طور بسیار گسترده‌تری نسبت به آزمایش پمپاژ، در بررسی‌های تزریق‌پذیری توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما نوع دیگر آزمایش‌های تعیین نفوذپذیری، در هر مقطع از هر چال قبل از تزریق (در سدها) و یا در چند چال تزریق در سینه کار تونل، (تزریق پیش از اجرا) استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها نسخه‌ای ساده‌تر از آزمایش‌های اکتشافی هستند که هدف از انجام آن‌ها در ادامه تشریح می‌گردد:

- ✓ از آن می‌توان به عنوان راهنمایی برای انتخاب مخلوط اولیه مناسب استفاده کرد.
- ✓ تخمینی از مقدار خوردند دوغاب^۲ در طول تزریق ارائه خواهد داد که برای برنامه ریزی کاربرد دارد.
- ✓ این داده‌ها را می‌توان با مقادیر موجود در طراحی مقایسه کرده و در صورت وجود اختلاف زیاد، ممکن است طراحی دوباره انجام گیرد.

¹ Lefranc

² Grout take

✓ وجود نشت‌های سطحی، ارتباط بین چال‌ها و هر اتفاق دیگری را نشان می‌دهد که ممکن است در فرایند تزریق در لحظه شروع تأثیر بگذارد و تمهیدات خاصی را طلب کند [Houlsby, 1990]. در ادامه دو نمونه از این آزمایش‌ها تشریح می‌گردد.

۲-۴-۱-۲ آزمایش یک پله لوژان یا یک پکر تست ساده

در این آزمایش، چال قبل از تزریق شدن به وسیله یک پکر بسته شده و تنها در یک فشار ثابت آب به درون چال تزریق می‌گردد. سپس از مقدار خوردن آب، نفوذپذیری چال در محدوده اثر آن بررسی می‌شود. این آزمایش برای توده سنگی با نفوذپذیری متوسط تا بالا کاربرد دارد [Dalmalm, 2004]. اما نحوه انجام و تحلیل این آزمایش به دو گونه ممکن خواهد بود.

بر اساس روش عنوان شده توسط هولسبی ابتدا باید مقطع مورد تزریق در یک چال شسته شود. سپس تجهیزات پمپاژ به چال وصل شده و در حالی که شیر کنترل^۱ بسته است، آب به سمت تجهیزات روانه می‌گردد. سپس در حالی که شیر تخلیه^۲ به طور جزئی یا تماماً باز است، به آرامی شیر کنترل باز شده تا فشار آزمایش ایجاد شود. وقتی که فشار آزمایش به چال رسید زمان آزمایش یادداشت شده و هم‌زمان کنترل اندازه‌گیری حجم آب تزریق شده^۳ خوانده می‌شود. مقدار کنترل در ۵، ۱۰، ۱۵ دقیقه بعد نیز ثبت می‌شود و پس از ۱۵ دقیقه آزمایش معمولاً به اتمام می‌رسد. در واقع انجام این آزمایش، به روش پیشنهادی هولسبی، یک پله از آزمایش لوژان کلاسیک است که مقدار لوژان برای هر دوره ۵ دقیقه، توسط تقسیم خوردن آب بر حاصل ضرب فشار آزمایش، در طول مقطع، در زمان آزمایش (۵ دقیقه) همانند آزمون لوژان کلاسیک بدست خواهد آمد. هولسبی سه حالت برای این آزمایش متصور است:

۱. اگر خوردن آب در هر ۳ مرحله مشابه باشد (حالت ۱ شکل ۲-۴)، هر کدام از ۳ مرحله می‌تواند برای محاسبه جواب بکار رود.

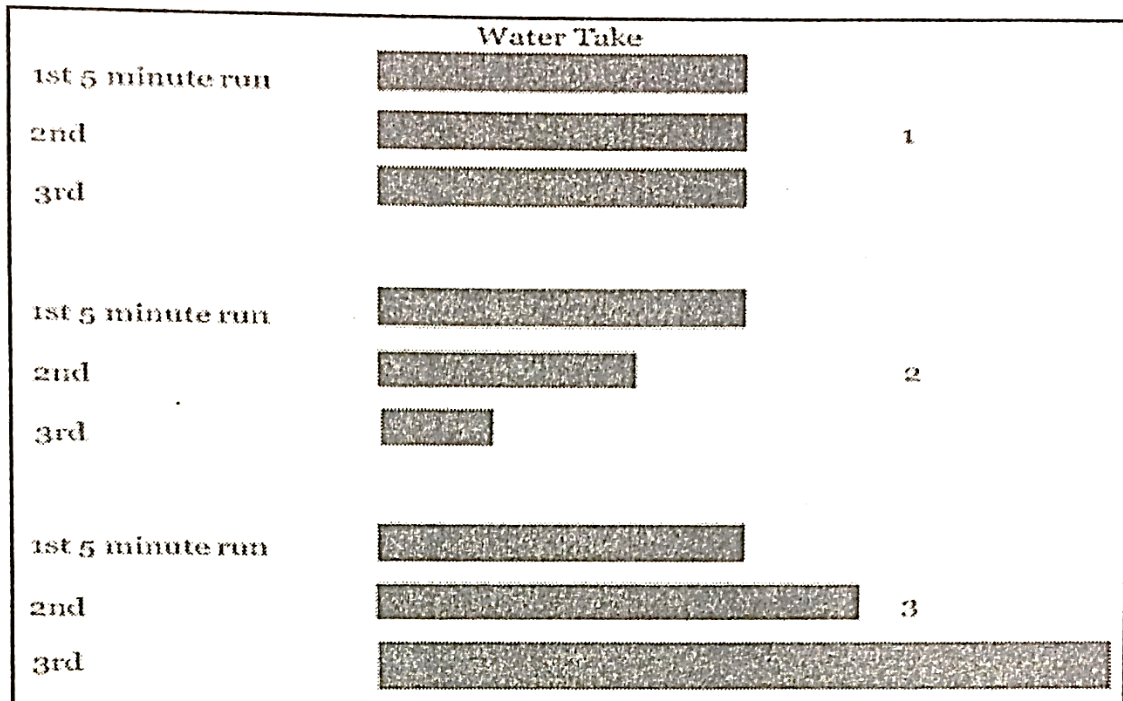
¹ Control valve

² Waste valve

³ Water meter

۲. اگر خوردن کاهش پیدا کرد (حالت ۲ شکل ۲-۴)، اغلب فضای خالی ترک‌ها بسته و فضاهایی که نفوذپذیری سراسری را نشان نمی‌دهند با آب پر شده‌اند. بنابراین عاقلانه است که آزمایش را اندکی بیشتر ادامه داد تا به حالت پایدار دست یافت.

۳. اگر خوردن افزایش یابد، (حالت ۳ شکل ۲-۴) حالتی نامطلوب رخ داده و نشان می‌دهد که حرکت سنگ‌ها یا شکست اتفاق افتاده است. برای جلوگیری از بروز این پدیده، فشار چال‌های مجاور بعدی باید کاهش پیدا کند.



شکل ۲-۴ نمودارهای ستونی جهت تفسیر نتایج آزمایش‌های فشار آب [Houlsby,1990]

هولسبی فشار ۰/۱ مگاپاسکال (۱ بار) را برای تمامی چال‌ها توصیه می‌کند مگر اینکه سنگ خیلی ضعیف باشد (در موارد نادر). به علت اینکه آب می‌تواند در فاصله بیشتری از دوغاب نفوذ کند و در نتیجه هرگونه تمایل سنگ به حرکت یا اتساع تحت فشار سبب به وجود آمدن اشتباه می‌گردد. بنابراین هولسبی انجام این آزمایش را در فشار مساوی با فشار تزریق توصیه نمی‌کند [Houlsby,1990].

اما شکل دیگر این آزمایش بر اساس گزارش اداره راه سوئد به این صورت است که بعد از پمپاژ و ایجاد شرایط پایدار، تحت فشار ۰/۵ مگا پاسکال (۵ بار) بالاتر از سطح آب زیرزمینی حدود چهار دقیقه، آزمایش ادامه پیدا کرده و مقدار خورند در این چهار دقیقه برای محاسبه قابلیت انتقال به صورت زیر استفاده می‌شود.

اگر یک ناحیه درون چال، بین دو پکر محدود بوده و آب به این ناحیه پمپ شود، با استفاده از رابطه ۲-۱۲ و بازنویسی رابطه تیم در مواد همگن، قابلیت انتقال از رابطه ۲-۱۵ محاسبه می‌گردد [Dalmalm,2004]:

$$T = \frac{Q \cdot P_w \cdot g}{2\pi \Delta p} \cdot \ln\left[\frac{L}{r_w}\right] \quad ۱۵-۲$$

L طول ناحیه محدود شده بین دو پکر (اگر انتهای یک چال به شکلی بسته شود این پارامتر برابر طول چال تزریق خواهد بود).

r_w شعاع چال

به نظر می‌رسد، اختلافی که بین فشار عنوان شده توسط هولسبی و اداره راه سوئد وجود دارد به علت اختلاف بین کیفیت سنگ‌هایی است که هولسبی به عنوان متخصص پرده آب‌بند سد با آن‌ها معمولاً مواجه شده است (یعنی تزریق در سنگ‌های نزدیک به سطح زمین که همواره کیفیت نامطلوب‌تری نسبت به سنگ‌های عمق دارند) و تفاوت آن با سنگ‌های میزبان غالب پروژه‌های تونل‌سازی در کشورهای حوزه اسکاندیناوی است که عموماً در اعماق زمین اجرا می‌گردند.

۲-۲-۳-۲ آزمایش ایجاد فشار^۱

در این آزمایش ابتدا چال آزمایش حفر و سپس اجازه داده می‌شود آب درون آن خارج شود. چال با یک پکر بسته شده و یک گیج برای اندازه‌گیری فشار در آن قرار می‌گیرد. نفوذپذیری براساس روند افزایش

¹ Pressure building test

فشار اندازه‌گیری می‌شود [Dalmalm,2004]. مثلاً در دو بازه زمانی ۳۰ دقیقه پس از نصب پکر مقدار فشار قرائت می‌گردد [Fransson,2001]. این آزمایش برای توده سنگی با نفوذپذیری پایین مناسب است [Dalmalm,2004].

۲-۴-۳ رابطه لوژان با نفوذپذیری و قابلیت تزریق

با توجه به محدوده تأثیر کوچکی که در هر آزمون لوژان مورد بررسی قرا می‌گیرد و همچنین شرایط مجهول حاکم بر محیط (مثل میزان دقیق بازشدگی، تعداد درزه‌ها و حدود شعاع تأثیر جریان)، تعیین نفوذپذیری در محیط توده سنگ بر اساس آزمون لوژان، نه تنها به سادگی امکان‌پذیر نیست، بلکه دقیق هم نخواهد بود [کربلا، ۱۳۸۸]. اما به هر حال در این زمینه تلاش‌هایی انجام شده و روابطی نیز ارائه گردیده است. جدول ۲-۲ برخی از این روابط را برای توده سنگ و خاک ارائه می‌دهد.

جدول ۲-۲ روابط ارائه شده به منظور محاسبه نفوذپذیری متوسط در محیط اطراف مقطع بر اساس مقدار لوژان [Widmann,1996]، [کربلا، ۱۳۸۸]

مرجع	مقدار لوژان	نفوذپذیری معادل $\left(\frac{m}{s}\right)$	محیط
ISRM(1995)	۱	$1/3 \times 10^{-7}$	خاک‌های دانه‌ای و یک چال ۷۵ میلی‌متری
ISRM(1956)	۱	$1/5 \times 10^{-7}$	خاک‌های دانه‌ای و یک چال ۵۰ میلی‌متری
بارتن (2003)	N	$N \times 10^{-7}$	سنگ همگن
فرانسون (2004)	N	$1/635 N \times 10^{-7}$	سنگ همگن

اما نکته بسیار حائز اهمیت این است که مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری، نباید بدون داشتن ایده‌ای از اندازه ترک‌ها و فاصله‌داری آن‌ها بکار رود. به طور مثال اعداد لوژان یکسان می‌تواند ناشی از وجود یک درزه با بازشدگی زیاد یا تعدادی درزه با بازشدگی کم باشد. بنابراین با در نظر گرفتن میزان درزه شدگی (تعداد درزه در متر) ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت تزریق توده سنگ بر حسب مقادیر لوژان بدست می‌آید. بر این اساس اورت سنگ‌ها را به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی کرده است:

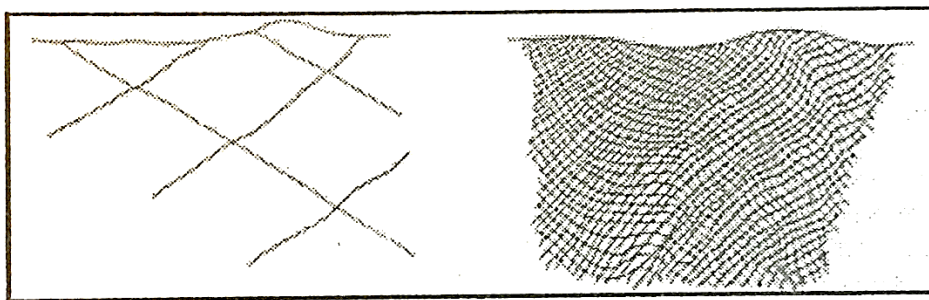
۱. گروه اول (سنگ با صفحات ناپیوستگی با فاصله‌داری زیاد): این صفحات معمولا در فواصل چند دسی‌متری ظاهر می‌شوند. مقطع یک متری از گمانه، تنها تعداد معدودی ناپیوستگی را قطع می‌کند. در این حالت مقدار مجاز برای شروع تزریق، با دوغاب‌های پایه سیمانی استاندارد، حداقل ۱ لوژان است.
۲. گروه دوم (سنگ با صفحات ناپیوستگی با فاصله‌داری متوسط): فاصله بین ناپیوستگی‌ها تقریبا ۲۰-۱۵ سانتی‌متر است و تعداد درزه‌ها در هر متر گمانه بین ۱۰-۵ عدد تغییر می‌کند. (بسته به جهت ناپیوستگی‌ها و جهت گمانه). در این حالت مقدار مجاز برای شروع تزریق حداقل ۵ لوژان خواهد بود.
۳. گروه سوم (سنگ با صفحات ناپیوستگی با فاصله‌داری کم): فاصله بین ناپیوستگی‌ها تقریبا ۵ سانتی-متر است بنابراین به طور متوسط در هر متر گمانه حدود ۲۰ ناپیوستگی وجود خواهد داشت. در این حالت مقدار مجاز برای شروع به تزریق حداقل ۱۰ لوژان است [طاهری، ۱۳۸۲].

۲-۵ خصوصیات مکانیکی و هندسی توده سنگ

در این بخش نحوه اثر و عملکرد آن دسته از خصوصیات از سنگ که می‌تواند روی طراحی و عملیات تزریق تاثیرگذار باشند شرح داده می‌شود. دانستن اطلاعات جزئی از این خصوصیات ضروری نیست و اغلب اوقات یک دید کلی از وضعیت توده‌سنگ با اطلاعات جزئی‌تری که در موارد خاص توسط یک زمین‌شناس ارائه می‌گردد کافی است [Houlsby, 1990].

۱- فاصله‌داری درزه‌ها

اگر در تزریق دوغاب سیمانی، درزه‌های باز قابل تزریق فاصله‌داری زیادی داشته باشند، معمولاً تزریق آسان‌تر از حالتی است که درزه‌ها نزدیک به هم است. زیرا در درزه‌های نزدیک به هم، احتمال نشست از سطح، چال‌های ریزشی و نفوذ ناپیوسته دوغاب وجود خواهد داشت [Houlsby,1990]. از طرفی هرچه درزه‌ها ارتباط بیشتری با هم داشته باشند، افت فشار در ابتدای چال بیشتر است. در نتیجه فشار بیشتری مورد نیاز خواهد بود (شکل ۲-۵) [Ewert,1998].



شکل ۲-۵ نقش فاصله‌داری درزه‌ها در سهولت عملیات تزریق: راست) تزریق سخت. چپ) تزریق آسان [Houlsby,1990]

۲- بازشدگی و زبری درزه‌ها

باز شدگی هیدرولیکی به همان میزان که در مقدار آب‌دهی یک درزه اهمیت دارد در فرایند تزریق خصوصاً در دوغاب‌های سیمانی، یک پارامتر اساسی به شمار آمده و بر شعاع نفوذ دوغاب و خوردن آن نیز مؤثر است [Fransson,2001]. به عقیده هولسبی آسان‌ترین درزه‌ها برای تزریق (با استفاده از دوغاب‌های تهیه شده توسط سیمان‌های پرتلند معمولی) دارای بازشدگی بین ۶-۰/۵ میلیمتر می‌باشند. نفوذ دوغاب به درون درزه‌های با بازشدگی کمتر بسیار دشوارتر است. از سوی دیگر درزه‌های بزرگ‌تر از مقدار فوق، به سادگی اجازه می‌دهند دوغاب به فاصله زیادتری از محدوده مطلوب نفوذ کند. بنابراین تمهیدات خاصی جهت کنترل آن لازم خواهد شد [Houlsby,1990].

همان‌گونه که قبلاً نیز عنوان شد پارامتر بازشدگی هیدرولیکی (معادل) یک پارامتر اصلی در تزریق است که در واقع اثر زبری درزه را نشان می‌دهد و هر قدر یک درزه زبرتر باشد، نشست آب یا نفوذ دوغاب در

آن مشکل تر است. بر اساس یک رابطه تجربی بین بازشدگی فیزیکی و بازشدگی هیدرولیکی در رابطه ۱۶-۲ محاسبه می شود [کربلا، ۱۳۸۸]:

$$E = \sqrt{e.(JRC)^{2/5}} \quad ۱۶-۲$$

که در آن:

$JRC =$ ضریب زبری درزه

۳- شیب درزه‌ها

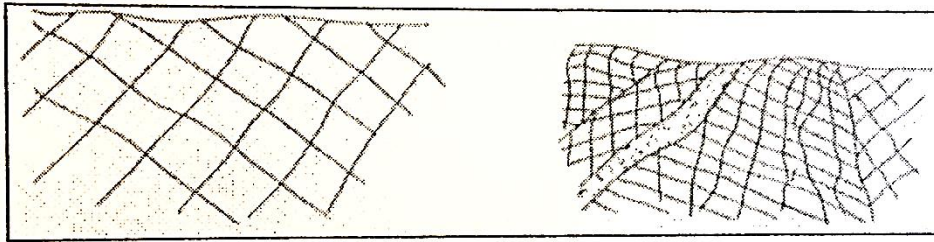
به عنوان یک قاعده کلی، راستای حفر گمانه‌ها باید قائم بر جریان نشت و در نتیجه، در تزریق محیط‌های سنگی باید عمود بر درزه‌ها باشد. هرچه این زاویه از قائم دورتر شود تزریق ناموفق تر و احتمال خیز^۱ زمین یا شکست سنگ بیشتر است. از طرفی حفر چال‌های تزریق با این زاویه ایده‌ال اغلب اوقات غیرممکن و یا مشکل است. و بین این دو مورد باید تعادل ایجاد شود. همچنین به نظر می‌رسد درزه‌های افقی قابلیت تزریق کمتری دارند. درزه‌های قائم به دلیل وجود نیروی ثقل و امکان خروج مواد پرکننده و آب راحت تر تزریق می‌شوند [Dalmalm,2004]، [Houlsby,1990].

۴- یکنواختی محیط^۲

هرچه محیط یکنواخت تر باشد، طرح تزریق نیز یکنواخت تر است اما درزه‌های نامنظم، دایک و امثال آن نیازمند جانمایی چال‌هایی در شیب‌ها و فاصله‌داری‌های متفاوت است. در این سنگ‌ها چال‌های بیشتر و کوتاه‌تری نسبت به سنگ‌های همگن لازم است (شکل ۲-۶) [Houlsby,1990].

¹ Uplift

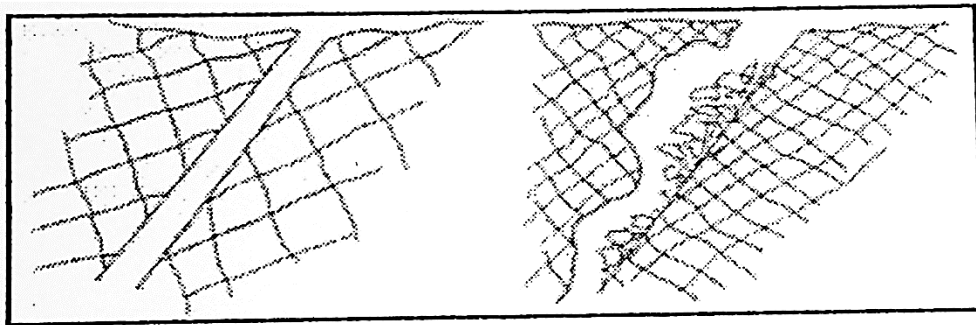
² Uniformity



شکل ۶-۲ نقش یکنواختی محیط در کیفیت و سهولت عملیات تزریق: راست) تزریق نیازمند چال‌های متفاوت است چپ) تزریق با چال‌های منظم انجام می‌شود [Houlsby,1990]

۵- استحکام و کیفیت سنگ^۱

هرچه سنگ استحکام بهتری داشته باشد تزریق آسان‌تر انجام می‌گیرد. در صورت کیفیت نامناسب سنگ، ممکن است چال‌ها با ریزش مواجه شوند و در نتیجه طول مقاطع تزریق از حد معمول کمتر می‌گردد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲ نقش کیفیت سنگ در سهولت و کیفیت عملیات تزریق، در صورت ریزش چال‌ها، تزریق مشکل می‌شود [Houlsby,1990]

۶- مقاومت

تزریق در سنگ‌های با مقاومت بالا، توده‌ای و محکم معمولاً آسان‌تر از وقتی است که سنگ ضعیف و شکسته باشد. چون در سنگ ضعیف و شکسته، چال‌ها مرتب ریزش می‌کنند و یا بلوک‌ها جابه‌جا می‌گردند.

¹ Rock soundness

۷- مواد پرکننده درزه‌ها

جایی که مواد موجود در درزه‌ها توسط جریان آب جابه‌جا، فرسایش و یا انحلال می‌یابند، می‌باید فرایند تزریق با دقت بسیار بیشتری انجام گردد تا اطمینان لازم حاصل شود که جریان آب در چنین درزه‌هایی واقعا از بین رفته است. به بروز چنین پدیده‌ای در عملیات تزریق رگابی^۱ گفته می‌شود.

۸- سختی نرمال و برشی درزه‌ها

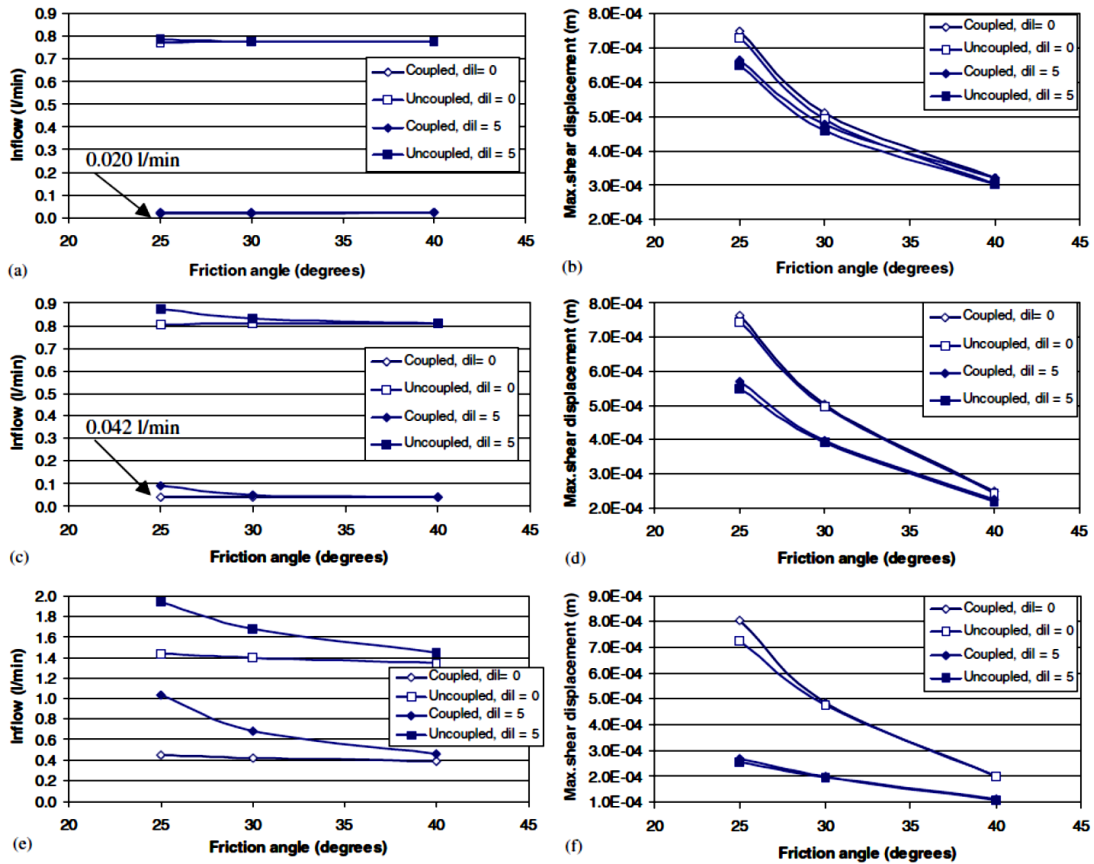
نیروی لازم برای ایجاد تغییر طول واحد را سختی گویند. درزه‌ها یا ناپیوستگی‌ها دارای دو سختی عمودی (k_n) و برشی (k_s) است. سختی عمودی مقاومت درزه برابر بارهای عمودی را نشان می‌دهد و سختی برشی بیانگر رفتار ناپیوستگی تحت برش است و مقاومت برشی و جابجایی برشی درزه را کنترل می‌کند. اگر سختی نرمال بالا باشد درزه به راحتی بسته نمی‌شود و اگر سختی برشی بالا باشد، برآمدگی‌ها و زبری‌های درزه در اثر برش به راحتی خرد نمی‌شود و هنگام برش، اتساع برشی و در نتیجه بازشدگی بیشتری ایجاد می‌شود. ایوارس برای بررسی تأثیر سختی نرمال و برشی درزه بر میزان جریان ورودی به تونل، مدل‌هایی با مقادیر سختی نرمال و برشی مختلف تولید کرد. وی با مقایسه‌ی دو حالت تحلیلی هیدرولیکی و هیدرو مکانیکی نشان داد که در حالت هیدرولیکی به دلیل عدم اثر تنش روی درزه‌ها دهانه‌ی درزه‌ها بسته نشده و مقادیر نفوذپذیری در آن‌ها بیشتر است. نتایج این مقایسه در شکل ۲-۸ آمده است [Ivars,2006]. با توجه به این موضوع و همان‌طور که از نمودارهای شکل برمی‌آید با افزایش سختی نرمال و برشی جریان آب گذرا از توده سنگ افزایش می‌یابد و برعکس. سختی نرمال و برشی در تحلیل‌های عددی به ترتیب از روابط ۲-۱۷ و ۲-۱۸ محاسبه می‌گردد [Itasca,2013].

$$k_n = \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \quad ۱۷-۲$$

$$k_s = \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)} \quad ۱۸-۲$$

^۱ Piping

در روابط بالا E_m و E_r به ترتیب مقدار مدول دگرشکل توده سنگ و مدول یانگ سنگ بکر هستند. G_m و G_r نیز مدول برشی توده سنگ و سنگ بکر هستند. همچنین S بیانگر فاصله‌داری هر دسته‌درزه است.



شکل ۲-۸ مقادیر جابجایی برشی و جریان ورودی بر حسب زاویه اصطکاک داخلی در حالت آنالیز هیدرولیکی و هیدرو مکانیکی شکل‌های a و b مربوط به K_n [Ivars,2006]

۲-۶ روش‌های اکتشاف توده‌سنگ در عملیات تزریق

به منظور تعیین ویژگی‌های مهندسی درزه‌ها، روش‌های اکتشافی متفاوتی وجود دارد که شامل موارد زیر است. در ادامه این روش‌ها به اختصار توضیح داده شده‌اند:

۱. بررسی‌های سطحی

۲. مغزه‌گیری

۳. دوربین‌های مشاهده گمانه‌ها^۱

۴. پریسکوپ‌های مشاهده گمانه‌ها^۲

۵. چاه و تونل‌های اکتشافی

۶. پکرهای مخصوص (پکرهای چاپی)^۳

معمول‌ترین این روش‌ها در بررسی‌های زمین‌شناسی عمومی مغزه‌گیری است که در سطح وسیعی استفاده می‌گردد. همچنین از چال حفر شده جهت انجام آزمایش‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. این روش هزینه قابل توجهی دارد و خصوصیات هیدرولیکی مهمی چون بازشدگی درزه‌های توده‌سنگ را مشخص نمی‌کند. از طرفی مغزه‌گیری در برخورد با سنگ‌های ضعیف عملکرد نامناسبی خواهد داشت. به‌خصوص در گمانه‌های عمیق، سنگینی رادهای حفاری سبب فشرده شدن آن‌ها و عدم بازیابی صحیح می‌گردد. همچنین ممکن است مواد سست پرکننده درزه‌ها توسط سیال حفاری شسته شده و تشخیص پدیده "رگابی" امکان‌پذیر نباشد.

دوربین‌های مشاهده گمانه نیز بر دو نوع هستند. یک نوع در راستای محور گمانه و نوع دیگر عمود بر محور گمانه تصویربرداری می‌کند (در نوع اخیر بازشدگی ترک‌ها را نیز می‌توان مشاهده کرد). این تکنیک پر هزینه بوده و احتمال صدمه دیدن توسط سنگ‌های لغزان گمانه و یا حتی افتادن درون آن نیز وجود دارد که این مسئله اصلی‌ترین مانع برای استفاده از این تلویزیون‌هاست. در مقابل پریسکوپ‌ها ساختار ساده‌ای دارند و در هر کارگاهی می‌توان آن‌ها را ساخت. در آن‌ها برداشت درزه‌ها به صورت دستی انجام می‌گیرد، هر چند عکس‌برداری هم می‌توان انجام داد. این وسیله بهترین وسیله جهت بررسی ترک‌های بالای سطح آب ایستابی یا جایی است که چال‌ها بعد از پمپ شدن آب درون آن‌ها بسیار آرام پر از آب می‌شوند.

¹ Borehole TV

² Borehole Periscope

³ Impression packer

وسایلی شامل پکرهای پلاستیکی نرمی نیز وجود دارند که برای یک لحظه کوتاه باد شده و محکم به دیواره چال می‌چسبند. سپس فوراً باد آن‌ها خالی شده، بیرون کشیده می‌شوند و اثر ترک‌ها روی پکرها بررسی می‌گردد. البته در مورد اینکه این کار به طور موثری انجام پذیرد تردید وجود دارد [Houlsby,1990].

۲-۷ مواد و مصالح مورد استفاده در دوغاب

در طراحی یک عملیات تزریق برای شرایط ویژه، مهندسین نیاز به داشتن اطلاعاتی راجع به انواع مختلف دوغاب‌ها و خواص آن‌ها دارند. از مواد مختلفی برای تزریق استفاده می‌شود که نوع آن‌ها به هدف از انجام تزریق و مشخصات سنگ و یا خاک موردنظر بستگی دارد. این مواد شامل مواد پلاستیک، سوسپانسیون‌های رقیق و غلیظ سیمان و یا دیگر ترکیبات و مواد مضاعف در آب، محلول‌ها و مواد شیمیایی، رزین‌ها، فوم‌های مصنوعی، بیتومین‌های داغ و امولسیون بیتومین هستند.

- سوسپانسیون‌ها در توده‌سنگ‌های درزه و شکاف‌دار و در محیط‌های دانه‌ای دارای تخلخل زیاد و حفره‌های بزرگ تزریق می‌شوند.
- ملات‌ها که از ماسه‌های ریزو درشت، سیمان و روان‌کننده‌ها ساخته می‌شوند برای مسدود کردن شکاف‌ها و حفره‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- محلول‌ها در خاک‌های دانه‌ای متخلخل که سوسپانسیون‌ها قابلیت نفوذ در آن‌ها را ندارند تزریق می‌شوند.
- محلول‌های شیمیایی و رزین‌ها تنها در طبقات ماسه‌ای و یا در مکان‌هایی که قبلاً سوسپانسیون‌های سیمان-بتونیت تزریق شده باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- فوم‌ها همراه با ملات‌های غلیظ یا دیگر پرکننده‌ها برای قطع جریان آب در شکاف‌های عریض عملکرد مناسبی دارند [Harrison,2000].

مواد لازم جهت ساخت سوسپانسیون‌های تزریق عبارت‌اند از: سیمان^۱ (C)، بنتونیت^۲ (B)، رس^۳ (CL)، ماسه^۴ و پرکننده^۵ (S)، مواد مضاف^۶ جهت پایداری (A) و آب (w) در عمل سوسپانسیون‌های تزریق استاندارد شده نمی‌باشند و انتخاب آمیزه تزریق مناسب، به مشخصات زمین و هدف از عملیات تزریق بستگی دارد.

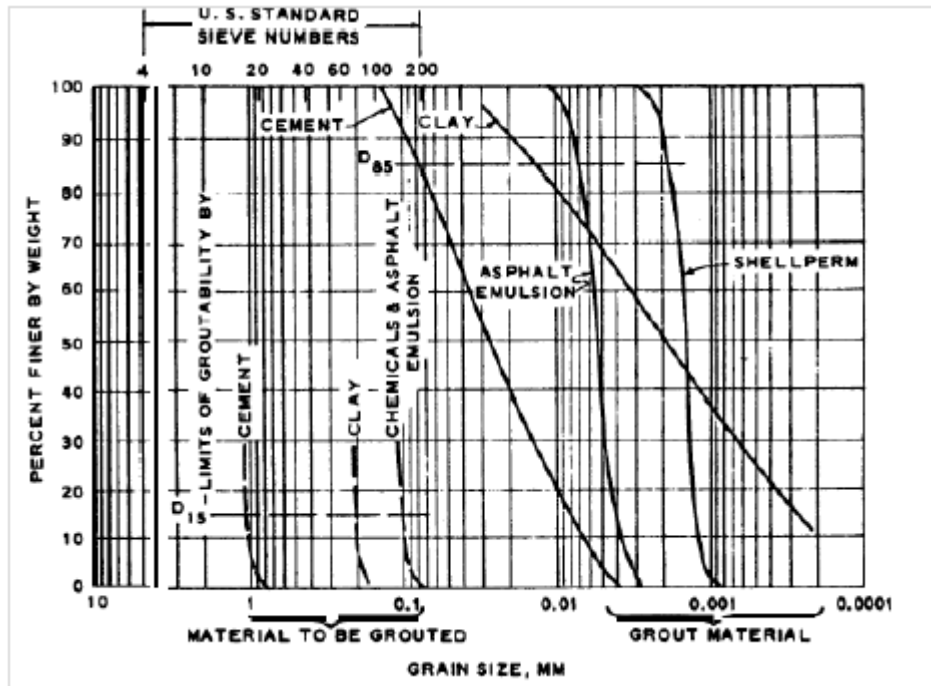
انواع پایه و ابتدایی دوغاب‌های هم‌اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرد که ویژگی‌های هر یک به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. همچنین انواع افزودنی‌ها و پرکننده‌ها و تاثیرات آن بر دوغاب تزریقی مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است. هیچ‌کدام از مصالح تشکیل‌دهنده سوسپانسیون‌های تزریق به تنهایی برای تمامی شرایط مناسب نیستند. هریک از مصالح مورد استفاده در ترکیب دوغاب به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود باعث کارایی دوغاب تحت شرایط خاص می‌گردد. از آنجایی که لازم است دوغاب قابلیت عبور از درزه‌های توده سنگ را داشته، مهم‌ترین مسئله در انتخاب نوع دوغاب اندازه ذرات تشکیل‌دهنده آن است.

شکل زیر محدوده اندازه ذراتی را نشان می‌دهد که در ترکیب انواع مختلف دوغاب استفاده شده و نتایج حاصل از تزریق آن‌ها موفقیت آمیز بوده است. لازم به ذکر است که این اطلاعات پایه تجربی دارند.

¹ cement
² Bentonite

³ clay
⁴ sand

⁵ Filler
⁶ Additvies



شکل ۹-۲ منحنی دانه‌بندی مواد دوغاب و خاک [Houlsby, 1990]

۲-۷-۱ سیمان پرتلند

در پروژه‌های تزریق، اغلب از سیمان پرتلند تیپ ۱، ۲ و ۳ استفاده می‌شود.

سیمان پرتلند نوع ۱: این سیمان متداول‌ترین سیمانی است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیمان برای کارهای عمومی و همچنین در مواقعی که سیمان با آب زیرزمینی سولفات‌ها یا تشکیلات سنگی و خاکی دارای سولفات مواجه نخواهد شد، مناسب است.

سیمان پرتلند نوع ۲: برای اهداف تزریق ۱ و ۲ شبیه به هم عمل می‌کنند. هرچند تیپ ۲ تا حدودی مقاومت بیشتری در مقابل حمله سولفات‌ها دارد.

سیمان پرتلند نوع ۳: این سیمان خیلی گران‌تر از سیمان معمولی نیست به علت ریزتر بودن دامنه‌های آن نسبت به سیمان‌های پرتلند دیگر، اغلب برای تزریق در خاک و سنگی استفاده می‌شود که ضروری است ذرات ریزتر سیمان نفوذ بیشتر دوغاب را در شکستگی‌ها و ترک‌های ریز مهیا کند.

۲-۷-۲ نسبت آب به سیمان ($\frac{W}{C}$)

عامل مهمی که روی خصوصیات دوغاب تأثیر می‌گذارد، نسبت آب به سیمان آن است. کاهش نسبت آب به سیمان به طور نمایی سبب افزایش چسبندگی و ویسکوزیته می‌شود. فوق روان کننده‌ها در طول سال‌های اخیر برای بهبود ویسکوزیته دوغاب‌های غلیظ استفاده می‌شود؛ از طرفی افزایش نسبت ($\frac{W}{C}$) باعث افزایش قابلیت تحرک و کاهش پایداری می‌گردد. بنابراین مهندس طراح باید مواد تشکیل دهنده یک دوغاب را چنان انتخاب کند که بین مقاومت و قابلیت تحرک آن تعادل ایجاد شود. تعدادی از طراحان ترجیح می‌دهند که یک دوغاب رقیق ایجاد کنند. چون بر این باورند که نفوذ در حفرات و بازشدگی کوچک‌تر آسان‌گشته و آب اضافی دوغاب از طریق فضاهای خالی تزریق شده رانده خواهد شد. به عقیده‌ی این دسته از محققین، ذرات جامد در دوغاب‌های سوسپانسیونی به وسیله‌ی حفرات کوچک‌تر فیلتر خواهند شد در حالی که آب می‌تواند در حفرات نفوذ کرده و درزه را روان کند. سپس مقدار آب اضافی با فشار تزریق و در طول زمان خارج می‌شود [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰].

عده‌ای دیگر با تجربه‌های مشابه در پروژه‌های تزریق، معتقدند دوغاب باید فقط آب کافی را جهت حمل ذرات جامد و ایجاد سیالیت مناسب برای پر کردن فضاهای خالی و ترک‌ها داشته باشد. به نظر این دسته، آب آزاد در بالای یک نمونه دوغاب بعد از عمل‌آوری و بدون به کار بردن فشار باید ترجیحاً صفر و حداثر کمتر از ۵ درصد حجم ترکیب دوغاب باشد. به عقیده‌ی این عده دستیابی به این الزام به سادگی امکان‌پذیر است. در حالی که هر دو نظریه، حاصل تجربیات علمی بسیار زیادی در تزریق است اما امروزه تمایل به سمت استفاده از دوغاب‌ها با حداقل محتوای آب است. ISRM به‌وضوح نظریه‌ی دوم را تایید کرده و پیشنهاد می‌کند که: "هرچند دوغاب‌های ناپایدار به تناوب استفاده شده‌اند، ولی درک صحیح عملیات تزریق به بهترین شکل توسط مطالعه دوغاب‌های پایدار به دست می‌آید. مدل‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که ذرات دوغاب‌های با نسبت آب به سیمان ۴ و بیشتر در درزها ته‌نشین

می‌شوند، بدون اینکه قدرت بستن درزها را داشته باشند. دوغاب‌های پایدار یا تقریباً پایدار حاوی آب کمتری نسبت به دوغاب‌های ناپایدار هستند.

استفاده از دوغابی با محتوای آب کمتر در زمان عملیات تزریق از مزایای زیر برخوردار است [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰]:

۱- افزایش چگالی که باعث پس زدن بهتر آب درزها شده و در مقابل آب کمتر از هم پاشیده می‌شود.

۲- پر کردن تقریباً تمام درزها

۳- حجم تزریق می‌تواند با دقت معین شود.

۴- زمان تزریق کاهش می‌یابد، زیرا آب اندازی کمتری دارد.

۵- ریسک تزریق کمتر می‌شود زیرا آب خارج شده بر گیرش دوغاب به مقدار جزئی اثر منفی می‌گذارد.

بعد از سخت شدن و عمل‌آوری دوغاب نیز مقاومت و دوام بیشتر، همچنین نفوذپذیری کمتری

می‌توان از این نوع دوغاب‌ها انتظار داشت."

شواهد عینی از این موضوع نیز وجود دارد به عنوان مثال در سد بورینجاک^۱ برای پرکردن ترک‌های

موجود در بدنه سد بتنی و بستر آن، دوغاب با نسبت آب به سیمان بین ۵/۵ تا ۳۰ و متوسط ۱۲ استفاده

شده است که دوغاب بسیار رقیقی است. پس از پایان تزریق یک گالری کنترل با روش غیرانفجاری در

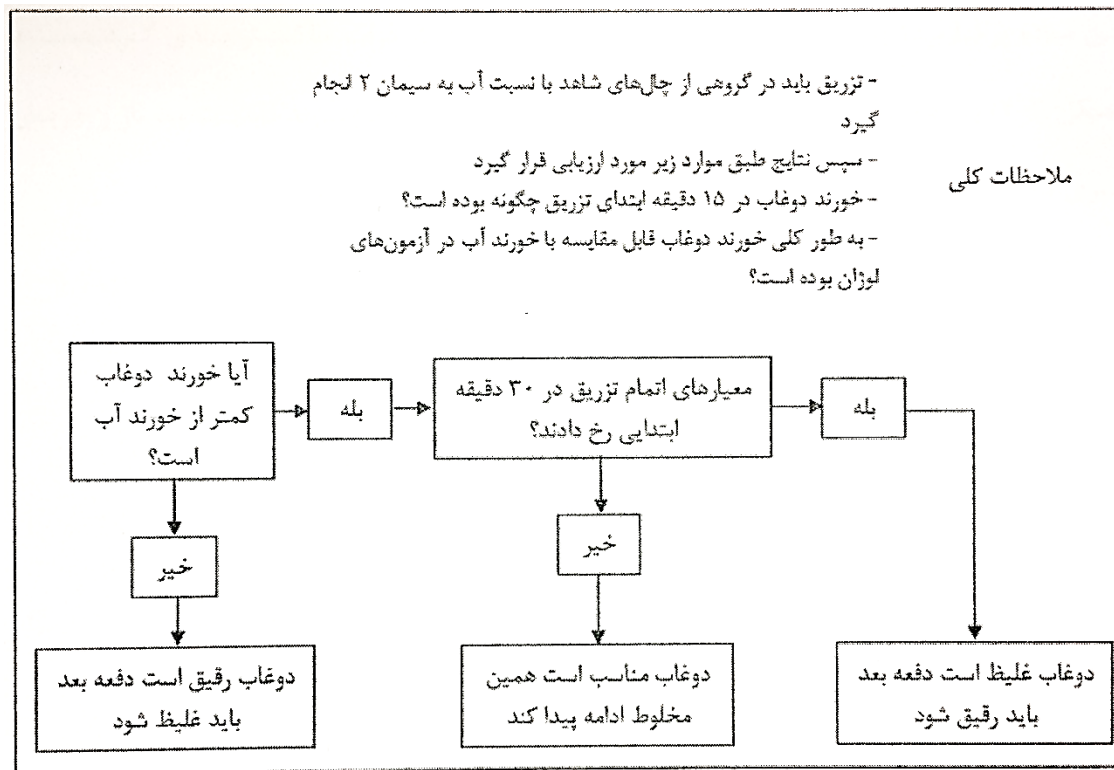
مجاورت پرده آب‌بند (به فاصله‌ی یک متر) احداث شد و مشاهده گردید که جریان آب، کلیه‌ی دوغاب-

های تزریق شده را با حل کردن کلسیم در خود شسته و از سقف گالری به صورت استالاکتیت‌هایی به

بیرون رانده است [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰].

¹ Borinjak

فلوچارت‌های مختلفی نیز جهت تعیین نسبت آب به سیمان ارائه شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها مطابق شکل ۲-۱۰ است.



شکل ۲-۱۰ نمودار ارائه شده توسط کمیته آب استرالیا برای تعیین آب به سیمان در دوغاب‌های سیمانی [Houlsby,1990]

۲-۷-۳ مخلوط کردن دوغاب

تفرق و پراکندگی اجزا دوغاب، که اثر قابل توجهی روی ویژگی‌های آن دارد، وابسته به نوع مخلوط کن و کارایی آن است. پایداری و قابلیت نفوذ دوغاب با افزایش سرعت و زمان مخلوط شدن دوغاب افزایش میابد. مخلوط کردن دوغاب باید با دور حداقل ۱۵۰۰ rpm صورت گیرد [Widmann,1996].

۲-۷-۴ پوزولان‌ها

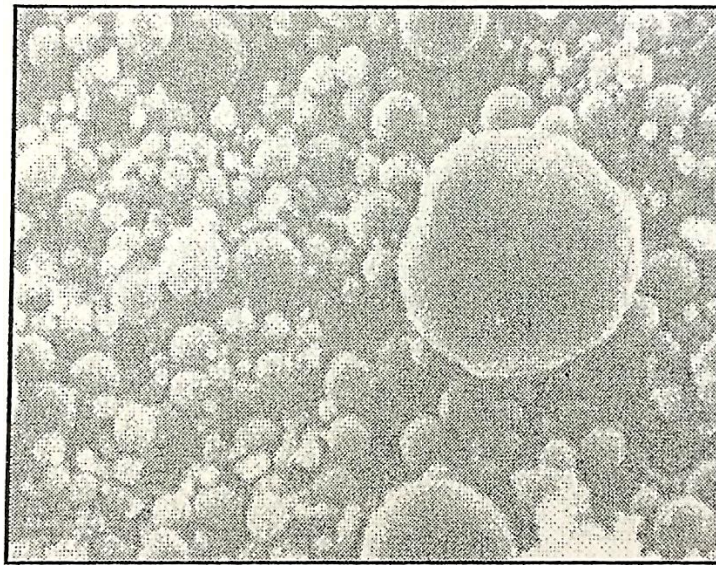
پوزولان‌ها مواد مکمل سیمان‌ها هستند. استاندارد ASTM C618 پوزولان را این‌گونه تعریف می‌کند: "ماده‌ی سیلیسی یا سیلیس آلومیناتی که به خودی خود چسبندگی نداشته باشد اما به صورت ذرات

بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند.^۱

همراهی مقدار کمی پوزولان با سیمان سبب کاهش گرمای هیدراسیون، کاهش نرخ سخت شدن و افزایش زمان گیرش خصوصاً در درجه‌ی حرارت پایین می‌گردد و اما مقاومت نهایی و دوام سیمان بیشتر خواهد شد. از مهم‌ترین انواع پوزولان مورد استفاده در تزریق می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

الف) خاکستر بادی^۱

این ماده پر کاربردترین ماده پوزولانی در بتن و دوغاب است. ذرات خاکستر بادی گرد هستند (شکل ۱۱-۲) به همین دلیل وقتی با ترکیبات سیمان ادغام می‌شوند قابلیت پمپاژ و جریان پذیری بالایی دارند. معمولاً ۷۰ تا ۹۰ درصد ذرات آن کمتر از ۴۵ میکرون قطر دارند.



شکل ۱۱-۲: دانه‌های کاملاً کروی خاکستر بادی در یک عکس میکروسکوپی [Warner,2004]

¹ Fly ash

ب) دوده سیلیسی^۱ (میکرو سیلیسی)

این محصول فرعی تولید آلیاژهای سیلیسیم و فروسیلیسم، بسیار ریزدانه است. اضافه کردن آن به دوغاب به شدت سبب افزایش چسبندگی، کاهش قابلیت آب شستگی، کاهش نفوذپذیری دوغاب و افزایش مقاومت توده سخت شده می‌گردد. همچنین به علت ذرات کاملاً گرد آن، قابلیت تحرک دوغاب را افزایش خواهد داد. این محصول به عنوان یک پایدار کننده به دوغاب افزوده می‌شود.

۲-۷-۵ سیمان‌های ریزدانه

سیمان‌های ریزدانه از سیمان‌های پرتلند ریزتر هستند و به راحتی در کشورهای اروپایی و امریکایی در دسترس هستند. هزینه‌ی این سیمان‌ها ۳ الی ۴ برابر سیمان‌های معمولی است اما کاربرد آن‌ها از دوغاب شیمیایی با کیفیت که حدود ۱۰ برابر سیمان‌های معمولی هزینه بر هستند به مراتب به صرفه تر است. به علت کوچک‌تر بودن ذرات، سوسپانسیون‌هایی که این نوع سیمان‌ها تولید می‌کنند قابلیت نفوذ بیشتری نسبت به سیمان‌های معمولی دارند. از این رو تمایل به استفاده این دوغاب‌ها به جای دوغاب‌های شیمیایی بیشتر شده است. وجود ذرات ریزتر و در نتیجه سبک‌تر در این سیمان‌ها سبب می‌شود دوغاب تولید شده کمتر استعداد آب اندازی داشته باشد. معمولاً برای این سیمان‌ها از مواد کاهش دهنده آب یا فوق روان کننده‌ها استفاده می‌شود، چون چسبندگی دوغاب تولید شده با این مواد بیشتر است [کربلا، ۱۳۸۸].

۲-۷-۶ افزودنی‌های^۲ دوغاب

افزودنی‌ها، موادی غیر از آب، سیمان و سنگ‌دانه‌های ریز یا پر کننده هستند که به عنوان جزئی از دوغاب به شمار می‌آید و سبب بهبود خصوصیات دوغاب‌های سیمانی هم در لحظه‌ی اختلاط و هم در زمان کسب مقاومت و گیرش می‌گردند. مهم‌ترین خصوصیات دوغاب جهت کاربرد در تزریق آب‌بند عبارت‌اند از:

¹ Silica fume

² Admixture

۱- کاهش آب اختلاط بدون نیاز به تغییر در استحکام آن

۲- شتاب دادن به زمان گیرش

۳- افزایش چسبندگی و ویسکوزیته (مقاومت در برابر شسته شدن)

۴- پایدار کردن دوغاب

الف) تسریع کننده‌ها^۱

در دمای کمتر از چهار درجه‌ی سانتی‌گراد زمان گیرش سیمان‌های معمولی مقدار قابل توجهی به تاخیر می‌افتد. حتی وقتی که دما کم نیست موقعیت‌هایی پیش می‌آید (خصوصاً در کارهای کنترل آب) که نیاز به گیرش سریع وجود دارد. بنابراین باید از تسریع کننده‌ها استفاده کرد. کلسیم کلراید یک ماده‌ی بسیار ارزان و قابل دسترس برای تسریع گیرش دوغاب است. هرچند حضور یون‌های کلرید اطراف میلگردها، یا سایر فولادهای مدفون، سریعاً موجب خوردگی می‌شود اما در تزریق به‌ندرت اتفاق می‌افتد که در محدوده‌ی تأثیر دوغاب، فلزی وجود داشته باشد. بنابراین این مواد معمولاً مشکل‌ساز نیستند و کلسیم کلراید یک ماده‌ی قابل قبول و بسیار اقتصادی به شمار می‌آید، زیرا تسریع کننده‌های دیگر بسیار گران‌تر بوده و کارایی کمتری نیز دارند. معمولاً حداکثر ۲ درصدی وزنی، سیمان کلسیم کلراید به دوغاب اضافه می‌گردد هرچند مقادیر بیشتر نیز به کار می‌رود. سدیم سیلیکات ماده‌ی دیگری است که برای تسریع در گیرش به طور معمول (خصوصاً در بتن) استفاده می‌گردد. جدول ۲-۳ اثر سدیم سیلیکات و کلسیم کلراید را روی خصوصیات فیزیکی دوغاب با هم مقایسه می‌کند [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰].

¹ Accelerator

جدول ۲-۳: مقایسه اثر سدیم سیلیکات و کلسیم کلراید بر خصوصیات فیزیکی دوغاب [Warner,2004]

اثر ماده افزودنی تسریع کننده			نوع ماده
کاهش زمان گیرش	افزایش ویسکوزیته	افزایش چسبندگی	
کم	کم	زیاد	سدیم سیلیکات
زیاد	کم	کم	کلسیم کلراید

ب) مواد افزودنی کاهش دهنده ی آب

کاهش مقدار آب مخلوط دوغاب، اثر قابل توجه و مثبتی بر روی مقاومت و نیز میزان دوام دوغاب سخت شده و آب اندازی آن خواهد داشت. افزودنی های کاهش دهنده آب یا به صورت نرمال (متوسط) در دسترس هستند که قادر خواهند بود ۵ الی ۱۲ درصد آب مخلوط را کاهش دهند و یا به عنوان فوق روان کننده^۱ به فروش می رسند که تا ۳۰ درصد سبب کاهش آب مخلوط می شوند. جزء فعال اصلی این مواد افزودنی، عوامل اثر کننده بر سطح است. این مواد در سطح مشترک بین دوفاز آمیخته نشدنی متمرکز می شوند و نیروهای فیزیکی شیمیایی مؤثر بر این سطح مشترک را تغییر می دهند. این مواد جذب سطح سیمان می گردند و به آنها بار منفی می دهند که منجر به نیروی دافعه بین ذرات و پراکندگی آنها شده و در نهایت سبب تثبیت میزان پراکندگی آنها می شود. حباب های هوا نیز دفع شده و نمی توانند به ذرات سیمان بچسبند. مواد افزودنی کاهش دهنده آب، مساحت سطح سیمان را که می توانند پذیرای هیدراتاسیون اولیه باشد، افزایش می دهند. به علاوه بار الکتریسیته ی ساکن سبب می شود که در اطراف هر ذره سیمان قشری از موکول های جهت یافته آب تشکیل گردد که از نزدیک شدن ذرات به یکدیگر جلوگیری می نماید. بنابراین ذرات، قابلیت تحرک بیشتری پیدا می کنند و آب آزاد شده تحت اثر مجموعه لخته شده، صرف روان سازی مخلوط شده و لذا کارایی آن افزایش می یابد.

¹ Superplastiser

فوق روان کننده‌ها نیز آب را کاهش می‌دهند، اما این اثر کاهش‌ی به طور قابل ملاحظه و روشنی نسبت به کاهش دهندگی مواد افزودنی مطرح شده قبلی بیشتر است. اثر عمده این مواد نیز توزیع بهتر ذرات سیمان و در نتیجه هیدراتاسیون بیشتر است. هرچند فوق روان کننده‌ها موثرتر هستند ولی ترکیب پیچیده‌تر و گران‌تری دارند.

ج) مقاومت در برابر شسته شدن^۱ یا اصلاح کننده ویسکوزیته^۲

در صورتی که ویسکوزیته دوغاب بزرگ‌تر از ویسکوزیته آب زیرزمینی باشد، مرز دوغاب پیش رونده پایدار خواهد بود. همچنین با فرض ثابت بودن ویسکوزیته، سیال چگال‌تر در مقابل سیال سبک‌تر مرز پایداری خواهد داشت. اما اثر ویسکوزیته مهم‌تر است و حرکت سیال سنگین وقتی که سیال با ویسکوزیته کم ولی چگال‌تر جایگزین سیال ویسکوزتر می‌شود، ناپایدار است و سیال سنگین‌تر درون سیال سبک‌تر کشیده می‌شود. مگر اینکه نرخ پمپ کردن به طور مناسب تنظیم شده باشد. بر این اساس مواد اصلاح کننده ویسکوزیته تولید شده اند که معمولاً به نام افزودنی‌های ضد شستگی شناخته می‌شوند و از ترقیق و جدا شدن دوغاب یا بتن در برخورد با آب در حال حرکت جلوگیری می‌کنند. البته این مواد کمتر در دسترس قرار دارند.

د) مواد افزودنی پایدار کننده

کاربرد مقادیر کم بنتونیت (معمولاً ۱ تا ۲٪ وزن سیمان) برای افزایش پایداری متداول است. افزودن بنتونیت سبب افزایش چسبندگی، ویسکوزیته و همچنین موجب کاهش دوام و مقاومت دوغاب پس از سخت شدن می‌شود. با توجه به روند رو به رشد استفاده از سیمان‌های ریزدانه کاربرد بنتونیت خودبه‌خود کم شده است چون سیمان‌های ریزدانه نسبت به سیمان‌های دیگر بسیار پایدارتر هستند. در سال‌های اخیر، بعضی محققین پیشنهاد نموده اند در مواردی که از سیمان ریزدانه استفاده می‌شود بنتونیت، با فوق روان کننده‌ها جایگزین شود. زیرا با توجه به تأثیر بالای چسبندگی بر شعاع نفوذ دوغاب در یک

¹ Anti wash out

² Viscosity modifier

فشار تزریق ثابت، افزایش پایداری دوغاب در اثر اضافه کردن بنتونیت، با کاهش نفوذ آن در اثر بالا رفتن چسبندگی خنثی خواهد شد. به همین دلیل استفاده از بنتونیت برای تزریق در درزهای ریز توصیه نمی‌شود. لذا به جای استفاده از بنتونیت برای رسیدن به دوغاب پایدار بهتر است از فوق روان کننده‌ها استفاده گردد. زیرا چسبندگی دوغاب‌های پایدار دارای فوق روان کننده، نسبت به دوغاب دارای بنتونیت بسیار پایین تر است [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰].

۲-۷-۷ دوغاب‌های رسی

در گذشته مواد رسی برای تزریق خصوصاً برای کنترل آب استفاده می‌شدند. دوغاب‌هایی که مقادیر قابل توجهی رس دارند هم برای کنترل آب و هم برای افزایش مقاومت خاک‌های دانه‌ای بکار می‌روند. در این باره انجمن تونل فرانسه (AFTES) (1991) گزارش می‌دهد که: "نسبت اجزاء دوغاب بر اساس نتایج مورد انتظار از تزریق بسیار متغیر است. دوغاب‌هایی که برای آب‌بندی استفاده می‌شوند باید حاوی مقدار زیادی رس و مقدار کمی سیمان باشند. درحالی‌که جهت افزایش مقاومت باید مقدار رس کم و مقدار سیمان زیاد باشد."

در اثر جذب آب، رس‌ها به طور کلی و بنتونیت به طور خاص ۸ الی ۱۲ برابر حجم خشک خود افزایش حجم می‌دهند. این مواد در حالت خشک خود کاملاً ارزان هستند و از لحاظ اقتصادی وقتی هیدراته می‌گردند به صرفه‌تر خواهند شد. بنابراین می‌توانند جهت جلوگیری از نفوذ آب عمل کنند.

۲-۷-۸ دوغاب‌های شیمیایی

هرچند به علت مسائل اقتصادی دوغاب‌های سیمانی نسبت به دوغاب‌های شیمیایی ارجحیت دارند ولی مزایایی همچون قابلیت نفوذ دوغاب‌های شیمیایی به ترک‌ها و حفرات بسیار ریزی که دوغاب‌های پایه سیمانی قادر به نفوذ در آن‌ها نیستند و همچنین توانایی کنترل دقیق زمان گیرش، سبب می‌شود در مواردی چون مقابله با آب‌های روان در ترک‌های ریز، استفاده از آن‌ها نسبت به دوغاب‌های سیمانی برتری داشته و در نتیجه این نوع دوغاب‌ها بکار روند [مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۰].

اما در صورت استفاده از این نوع دوغاب‌ها همواره باید به پتانسیل سمی بودن اولیه و نهایی که سبب آلوده شدن محیط کاری و محیط زیست می‌گردد، توجه کرد. از میان دوغاب‌های شیمیایی سه گروه اصلی جهت کنترل آب استفاده می‌شوند. این سه گروه عبارتند از:

۱- پلی اورتان‌ها

۲- پلیمرهای اکریلامید

۳- سدیم سیلیکات همراه با سیمان

دوغاب‌های پلی اورتان بسیار متنوع بوده و به دو نوع آب‌گریز^۱ و آب دوست^۲ تقسیم می‌شوند. توانایی پلی اورتان‌های آب‌گریز جهت بستن سطوح خیس زیاد نیست. اما فرمول‌های آب دوست تمایل دارند به فضاهایی که توسط آب پر شده نفوذ کنند. پلی اورتان‌ها در جای خود از پایداری و مقاومت بالایی برخوردار هستند ولی نوعا ویسکوزیته بالایی دارند و شاید هزینه به نسبت زیاد آن‌ها سبب شده است به طور گسترده در پروژه‌های آب‌بندی استفاده نگردند.

هر چند پلیمرهای اکریلیک بسیار نفوذپذیر، قابل انعطاف و به نسبت ارزان هستند اما استفاده از این نوع دوغاب‌ها در اکثر کشور های جهان به علت سمی بودن مواد اولیه آن‌ها ممنوع است. سیلیکات‌ها ایمن و ارزان هستند اما به طور دائم جهت تزریق در سنگ‌ها و خصوصا در ترک‌ها و درز های نسبتا بزرگ، به دلیل انقباض زیادی که دارند، استفاده نمی‌گردند. در صورتی که سدیم سیلیکات با سیمان پرتلند مخلوط شود به عنوان یک تسریع کننده قوی سیمان عمل کرده و معمولا برای کنترل جریان آب یا آب تحت فشار استفاده می‌گردد. این سیستم جهت تزریق در زیر سطح ایستایی قابل استفاده بوده و یک دوغاب دائم با مقاومت بالا ایجاد می‌کند. اما به علت وجود ذرات سیمان، توانایی

¹ Hydrophobic

² Hydrophilic

نفوذ در ترک‌های ریز را نخواهد داشت. در جدول ۲-۴ می‌تواند جهت راهنمایی برای استفاده از این ماده در سیمان مورد توجه قرار گیرد. نسبت آب به سیمان در این جدول ۱ به ۱ است.

جدول ۲-۴: زمان گیرش مخلوط‌های سدییم سیلیکات- سیمان [Warner,2004]

استفاده معمول	زمان گیرش	نسبت حجمی سیمان - سیلیکات
کنترل آب در حال جریان	۱ تا ۱۰ ثانیه	۱:۱
کنترل آب / محدود کردن قابلیت تحرک دوغاب	۱ تا ۱۰ دقیقه	۱۰:۱
کنترل آب / محدود کردن قابلیت تحرک دوغاب	۱۰ تا ۲۰ دقیقه	۳۰:۱
زودگیر کردن دوغاب سیمانی	۳۰ تا ۶۰ دقیقه	۵۰:۱

۲-۸ فشار تزریق

به منظور نفوذ مناسب دوغاب، فشار تزریق باید مناسب باشد. اگر فشار تزریق زیاد باشد منجر به ایجاد شکست هیدرولیکی می‌گردد. در اثر این پدیده، نفوذپذیری و خوردند دوغاب افزایش یافته، بدون اینکه آب‌بندی مناسبی ایجاد شود و تنها هزینه‌ها افزایش پیدا کرده است. اگر فشار تزریق کم باشد، دوغاب نمی‌تواند به فواصل زیادتر رفته و در دهانه شکستگی‌ها باقی می‌ماند، بنابراین در این حالت نیز آب‌بندی به طور مناسبی انجام نمی‌گیرد. به طور کلی فشار تزریق به نوع سنگ، درجه خردشدگی، سیستم درز و ترک موجود در سنگ، لایه‌بندی، عمق منطقه مورد تزریق، محل گمانه تزریق و وزن مصالح فوقانی در زمان تزریق بستگی دارد [Widmann,1996].

حداکثر فشار تزریق باید به نحوی تنظیم شود که اولاً موجب شکستگی و خردشدن سنگ‌ها نشود. ثانیاً سبب بالازدن آن‌ها نگردد. جهت جلوگیری از بالازگی توده سنگ، فشار بالازدگی باید کمتر از فشار مقاوم سربار در توده سنگ باشد. فشار تزریق باید به حدی باشد که بیشترین شعاع تأثیر بدست آید و از نظر اقتصادی بتوان گمانه‌ها را در فواصل دورتری نسبت به یکدیگر قرار داد. هنگام تزریق باید به مقاومت ساختارهای قرار گرفته نیز توجه شود. همچنین با افزایش غلظت سیمان، فشار نیز افزایش می‌یابد. مقاومت ساختارهای قرار گرفته در زیر سطح می‌تواند یک عامل محدود کننده فشار تزریق باشد، مثلاً در مناطق خردشده، فشار تزریق بیشتر تحت تأثیر نیروهای وارده از اطراف است تا عمق، و در این

مناطق فشار تزریق با افزایش عمق، مانند مناطق با ساختارهای یک پارچه افزایش نمی‌یابد. معمولاً

فشاری که در عملیات تزریق ثبت می‌گردد، فشار بالای گمانه است. [Ewert,1985]

لومباردی^۱ ارتباط ما بین شعاع نفوذ آمیزه^۲ و فشار تزریق را به صورت رابطه ۱۹-۲ ارائه کرده

است [Lombardi,1985].

$$R_{max} = \frac{P_{max} \times t}{C} \quad 19-2$$

که در آن:

R_{max} = حداکثر برد تزریق

p_{max} = ماکزیمم فشار

t = نصف ضخامت ترک

C = چسبندگی دوغاب

ویتکه^۳ رابطه ۲۰-۲ و جانسون^۴ رابطه ۲۱-۲ را برای تعیین شعاع تأثیر دوغاب در عملیات تزریق پیشنهاد

کردند [Lombardi,1985].

$$R = (2a \times p) / \tau \quad 20-2$$

$$R = (pT \times bc) / \tau \quad 21-2$$

که در آن‌ها:

R = شعاع تأثیر (m)

$2a$ = عرض درزه (m)

P, pt = فشار مؤثر تزریق (kpa)

bc = میزان باز شدگی درزه‌ها (m)

¹ Lombardi

² mixture

³ Wittke

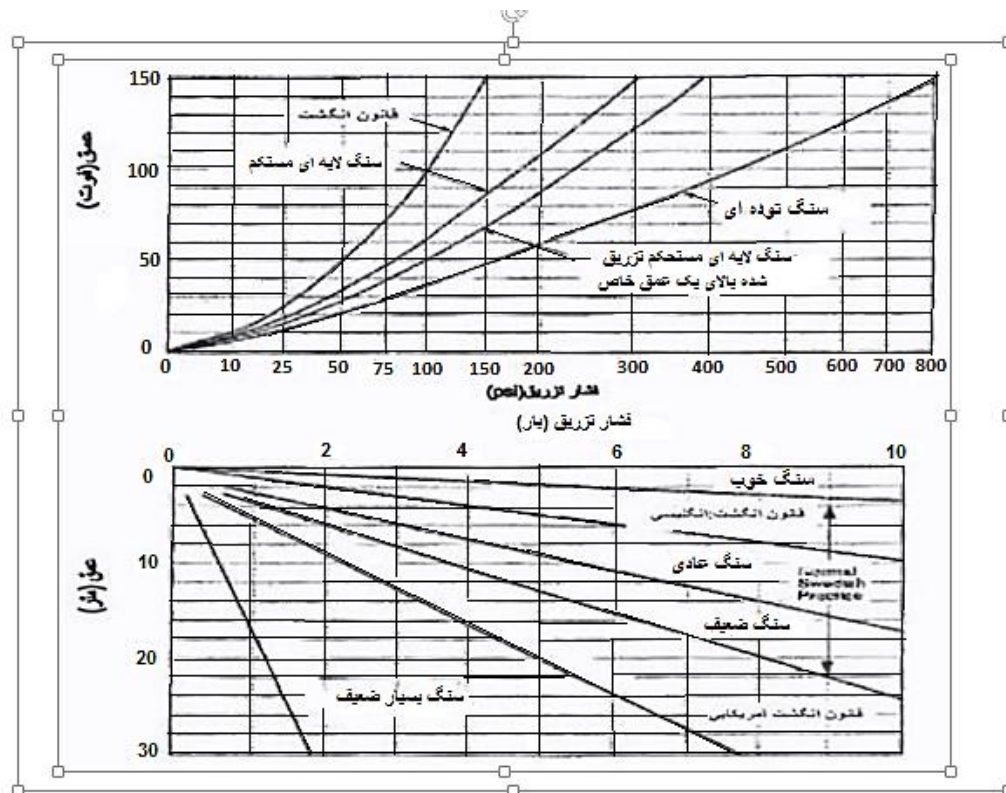
⁴ Janson

$$\tau = \text{حد جریان دوغاب} \left(\frac{N}{m^2} \right) (60-120)$$

فشار تزریق باید زیر فشار شکست نگه داشته شود. در شرایطی که لایه بندی تقریباً افقی است، فشار برابر با وزن روباره به اضافه یک فشار اضافی به خاطر نیروهای جانبی است [Weaver,1991].

$$P = U \cdot h + dp \quad 22-2$$

در این مورد p و dp نسبت به عمق افزایش می یابد. در شرایط نزدیک به سطح dp باید صفر در نظر گرفته شود. روابط تجربی که در آمریکا برای تخمین فشار تزریق مناسب به کار می رود مقدار 0.22 بار را به ازای هر متر افزایش عمق پکر در نظر می گیرند (قاعده سر انگشت). این مقدار در کشورهای اروپایی ۱ بار به ازای هر متر عمق پکر است [Houlsby,1982] (شکل ۳-۵).



شکل ۲-۱۲ نمودارهای افزایش فشار با عمق [Weaver,1991]

برای سنگ های ضعیف و متوسط حداکثر فشار ۱۰ بار توصیه شده است، هر چند که عقاید مختلفی در این زمینه وجود دارد. ولی تجربیات اخیر نشان داده است که نیازی به اعمال فشارهای بیشتر از این

مقدار برای به دست آوردن یک نتیجه خوب از تزریق وجود ندارند. تنها استثنا موجود مربوط به رس‌های موجود در حفرات کارستی است که نیاز به فشار بیشتر برای شکست هیدرولیکی است. زمانی که افزایش فشار تدریجی باشد و فرصت کافی برای نهشته شدن باشد اثر مخرب فشار کاهش می‌یابد. عمدتاً سنگ‌های رسوبی لایه‌ای افقی یا کم شیب نسبت به سنگ‌های آذرین و دگرگونی یا رسوبی پر شیب بیشتر در معرض خطر ناشی از زیاد بودن فشار تزریق هستند، بهتر است که شروع تزریق با فشارهای پایین مثلاً از کمترین مقدار با افزایش‌های $\frac{kg}{cm^2}$ ۰/۲۵ به ازای هر متر روباره باشد [Weaver, 1991].

۲-۹ جمع بندی

قابلیت تزریق، یا به عبارتی ساده‌تر و غیر دقیق، درجه آسانی و موفقیت تزریق در محیط سنگی، به نفوذپذیری توده سنگ وابسته است. شناخت این دسته از ویژگی‌های محیط همواره هدف اصلی در عملیات تزریق، به‌ویژه به منظور آب‌بندی است. هرچند برای تعیین چنین خصوصیات آزمایش‌های پمپاژ بهترین دقت را دارند، اما بسیار وقت‌گیر و اغلب هزینه‌بر هستند و حداقل در بررسی‌های عمیق زمین‌شناسی و به‌ویژه در تزریق کاربرد ندارند. در حالی که آزمون لوژان با توجه به سادگی در اجرا، اندازه‌گیری آسان پارامترها، عدم وجود محاسبات پیچیده و سادگی تفسیر نتایج آن، تا کنون به عنوان پرکاربردترین آزمون برجا در ارزیابی وضعیت هیدرولیکی توده سنگ در مطالعات ژئوتکنیکی، به‌خصوص مطالعات تزریق‌پذیری شناخته شده است. معمولاً این آزمایش‌ها حین عملیات تزریق نیز به شکلی ساده‌تر با اهداف مختلف از جمله انتخاب مخلوط اولیه مناسب، انجام می‌شود.

از دیگر خصوصیات تأثیر گذار بر فرایند تزریق نوع دوغاب است که پر کاربردترین دوغاب‌های مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی دوغاب‌های پایه سیمانی هستند، این دوغاب‌ها ارزان، ایمن و قابل اعتمادند. اما بیشتر اوقات قابلیت تزریق این دوغاب‌ها متناسب با نفوذپذیری محیط نیست. این مساله ناشی از تفاوت ماهیت و رفتار آب و دوغاب‌های پایه سیمانی است. تحقیقات نشان می‌دهند دانه‌های سیمان توانایی نفوذ به بازشدگی‌های کوچک‌تر از سه برابر اندازه ی خود را ندارند. به همین دلیل امروزه کاربرد

سیمان‌های ریز دانه مورد استقبال مهندسين طراح قرار گرفته است. چسبندگی یک دوغاب را به وسیله-
ی افزایش نسبت آب به سیمان با استفاده از روان کننده ها می توان کاهش داد. دوغاب‌های با محتوی
حداقل آب دارای مزیت های زیادی، در حین تزریق (به ویژه پایداری دوغاب) و پس از سخت شدن
می‌باشند. از این‌رو امروزه تمایل به استفاده از این دوغاب‌ها بسیار بیشتر است. در ارتباط با تزریق آب‌بند
کاهش زمان گیرش دوغاب یک اصل است. افزودن ماده شیمیایی سیلیکات در این زمینه کاربرد فراوانی
دارد. اما نکته بسیار حائز اهمیت، توانایی پیش بینی کنترل خصوصیات دوغاب است.

فصل سوم

مروری بر مطالعات گذشته

فناوری تزریق به عنوان یک راه حل مهندسی کهن در مسائل مقاوم سازی زمین است که بیش از دو قرن قدمت دارد. ایده تزریق دوغاب سیمانی در زمین برای نخستین بار توسط شخصی به نام Berigny در سال ۱۸۰۲ به منظور بهبود ظرفیت باربری بستر سد ارایه شد و در سال ۱۸۶۴ میلادی، پیتر بارلو سپری تک‌بخشی را ارائه کرد که قادر بود بخش حلقوی که بوسیله انتهای سپر و دیواره تونل ایجاد می‌شد را به وسیله دوغاب پر نماید. در سال ۱۹۶۰، روش تزریق با جت گسترش پیدا کرده است و در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار از تزریق تراکمی به منظور کنترل جابجایی زمین در حین احداث تونل بولتون هیل استفاده شده است. در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار ایده صنعتی تزریق جبرانی در احداث سایت پروژه توسعه خطوط جو بیلی در لندن مورد استفاده قرار گرفته است [Chan Man, 2005]. در سال ۲۰۰۰، اریکسون به منظور تعیین روشی مناسب جهت پیش‌بینی تأثیر تزریق در آب‌بندی تونل‌ها از مدل‌سازی عددی استفاده کرده و از مقایسه نتایج حاصل از مطالعات خود و مطالعات آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی مشاهده کرده است [Eriksson, 2000]. مسعودی در سال ۱۳۸۷ با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار دو بعدی UDEC شعاع تأثیر و حجم خوردن مواد تزریق را در ساختگاه سد سیمره بررسی کرده و با مقایسه نتایج مطالعه خود و نتایج واقعی، مدل‌سازی عددی را جهت پیش‌بینی نتایج معتبرتر از روش‌های تحلیلی دانسته است [مسعودی، ۱۳۸۷]. در سال ۲۰۰۸، معادی‌خواه و مرتضوی مجدداً با استفاده از نرم‌افزار UDEC تأثیر عوامل توده سنگ در پرده آب‌بند سد را بررسی کردند [Maadikhah, 2008]. همچنین سعیدی در سال ۲۰۱۳ با استفاده از یک مدل دوبعدی جریان سیال تزریق و عمق نفوذ آن را در توده سنگ درزه‌دار مدل‌سازی کرده و بعد از مقایسه نتایج آن با روش‌های تحلیلی و مقادیر اندازه‌گیری شده در یک مورد واقعی، مطابقت خوبی را بین نتایج مشاهده کرده‌اند [Saedi, 2013].

از آنجا که ترواش در محل پی و تکیه‌گاه‌های یک سد امکان هدر رفتن آب ذخیره شده در مخزن را فراهم می‌سازد و از طرف دیگر انباشت رسوب را در مخزن افزایش می‌دهد، در نتیجه پایداری دراز مدت سد به مخاطره می‌افتد، ضرورت اجرای عملیات تزریق به عنوان یک راه حل عملی جهت کاهش نشت و مقاوم سازی پی، اهمیت زیادی دارد. براین اساس تزریق به دو منظور انجام می‌شود: اول تحکیم پی توسط تزریق جابجایی و دوم احداث پرده آب‌بند توسط تزریق نفوذی. در احداث پرده آب‌بند حتی الامکان از ایجاد شکست هیدرولیکی ممانعت به عمل می‌آید و با فشارهای کنترل شده آمیزه تزریق را در داخل مسیرهای هیدرولیکی جایگزین می‌سازد [Fransson,2001]. در این بخش به بیان نظریه‌ها و روابط طراحی پارامترهای تزریق پرداخته خواهد شد.

۳-۲ عملیات تزریق^۱

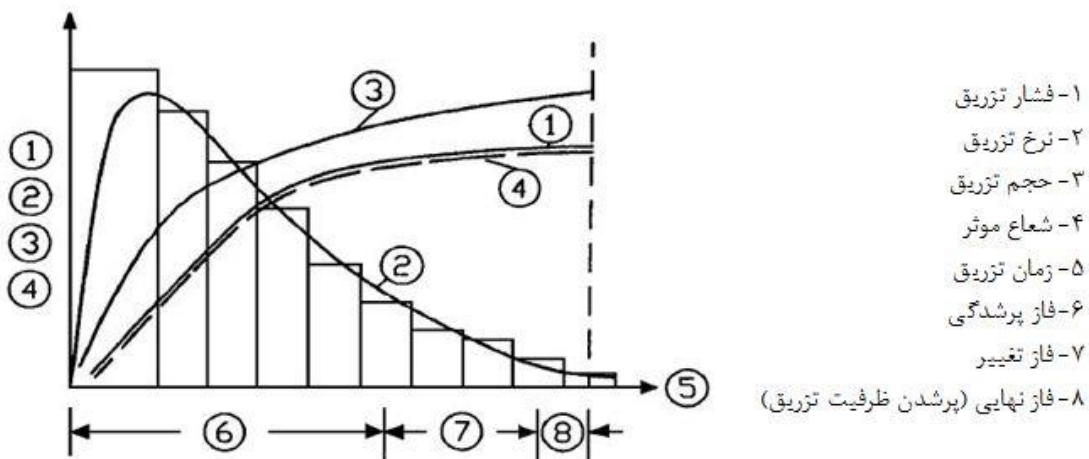
تزریق روشی است که به علت طبیعت نامنظم لایه‌ها و تغییرپذیری آن‌ها نمی‌توان آن را به راحتی استاندارد نمود [Foyo,2002]. در طی عملیات تزریق، ملاتی از سیمان یا سایر مواد مناسب به داخل توده سنگ تزریق می‌گردد و شکستگی‌ها با آن پر شده و توده سنگ به یک واحد یک دست تبدیل می‌شود. بدین منظور در سال ۱۹۹۶، Kutner عواملی همچون رفتار مواد مورد استفاده در مصالح دوغاب، فشار تزریق دوغاب^۲، زمان تزریق^۳ و شعاع مؤثر^۴ را مورد بررسی قرار داد.

¹ Grouting

² Injection perssure

³ Injection time

⁴ Effective radius



شکل ۱-۳ نمای شماتیک فرایند تزریق (Kutner, 1996)

در سال ۱۹۹۳، هاکانسون^۱ رفتار رئولوژیکی سوسپانسیون‌های سیمانی را مورد بررسی قرار داد. به دنبال این تحقیق تعدادی مدل رئولوژیکی که ویژگی‌های جریان یک سیال را توجیه می‌کردند، توسعه داده شده‌اند و بیشترین تطابق رفتار سوسپانسیون‌های سیمانی با سیال Bingham به دست آمد که براساس آن:

$$\tau = \mu_B \frac{du}{dy} + \tau_0 \quad ۱-۳$$

که در آن:

$$\tau = \text{تنش برشی}$$

$$\mu_B = \text{لزجت دینامیکی آسیال بینگهام}$$

$$\frac{du}{dy} = \text{نرخ برش}^۳$$

$$\tau_0 = \text{تنش تسلیم}^۴ \text{ دوغاب سیمانی}$$

بر این اساس سوسپانسیون تنها تحت شرایطی جریان پیدا می‌کند که تنش برشی اعمالی به آن بیشتر از تنش تسلیم سیال باشد. [Hakansson, 1993].

¹ Hakansson

² Dynamic viscosity

³ Shear rate

⁴ Yielding point (Cohesion)

از آنجا که تعریف یک مدل رئولوژیکی مستقل برای سوسپانسیون‌های سیمانی مشکل است، کتزنر^۱ در سال ۱۹۹۶ این رفتار را با یک مثال توجیه کرد. در این مثال یک مقایسه بین یک دوغاب پایه سیمانی با نسبت $W/C < 2$ که یک سیال بینگهام است صورت گرفته است. براساس آزمایش انجام شده زمانی که سایز دانه‌های سیمان کاهش پیدا کند، سطح تماس ذرات افزایش پیدا کرده و در نتیجه زمان واکنش سوسپانسیون دوغاب کاهش پیدا می‌کند. برای تنظیم زمان مذکور می‌توان از افزودنی‌هایی استفاده کرد که هم قابلیت سرعت بخشیدن به واکنش و هم قابلیت کاستن از سرعت آن را دارند [Kutzner, 1996].

گاستافسون^۲ و استیل در سال ۱۹۹۶ پارامترهای مؤثر بر میزان گسترش دوغاب را از لحاظ هیدرولیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. در بررسی نفوذ دوغاب به صورت هیدرولیکی فرض بر این است که دیواره‌های درزه کاملاً صلب بوده و تنش‌های اعمالی به درزه از جانب دوغاب و سنگ‌های در برگیرنده تاثیری بر بازشدگی درزه ندارند. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط این دو شخص، ویژگی‌های سیستم درزه موجود در توده‌سنگ عامل تعیین کننده در گسترش دوغاب است و بر اساس این نظریه رابطه زیر برای بیشترین عمق نفوذ دوغاب ارائه شد [Gustafson and Stille, 1996]:

$$I_{max} = \frac{\Delta P \cdot a_0}{2\tau_0} = \frac{P_g - P_w}{2\tau_0} \quad ۲-۳$$

که در آن:

$$I_{max} = \text{بیشترین عمق نفوذ دوغاب}$$

$$P_g = \text{فشار تزریق دوغاب}$$

$$P_w = \text{فشار آب زیرزمینی موجود در درزه‌های توده‌سنگ}$$

مشابه مطالعه صورت گرفته روی تأثیر پارامترهای مؤثر توده سنگ بر روی گسترش دوغاب، جانسون در سال ۱۹۹۶ این بررسی را با در نظر گرفتن حالت هیدرو مکانیکی درزه‌های توده‌سنگ تکرار نمود. در حالت هیدرو مکانیکی بازشدگی درزه متأثر از تنش‌های اعمال شده به آن است. این تنش‌ها می‌تواند

¹ Kutzner

² Gustafson

برجا^۱ باشند یا توسط دوغاب با درزه اعمال شوند. این تغییر در بازشدگی درزه موجب تغییر در نفوذ-پذیری نیز می‌شود بنابراین در این حالت عمق نفوذ نهایی متفاوت خواهد بود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [Janson, 1996]:

$$I = \left(a_0 - \frac{a_n}{k_n} \right) \frac{P_g - P_w}{2\tau_0} + \frac{1}{4k_n\tau_0} (P_g^2 - P_w^2) \quad 3-3$$

که در آن:

a_0 = بازشدگی اولیه^۲ درزه

$\frac{a_n}{k_n}$ = نسبت تنش نرمال به سفتی^۳ دیواره درزه

در صورتی که سفتی نرمال دیواره درزه به سمت بی‌نهایت تمایل داشته باشد معادله فوق به معادله (۳)-۲ خلاصه خواهد شد. به منظور رسیدن به شعاع مؤثر پرشدگی درزه‌ها در عملیات تزریق فشار تزریق سیال به درون توده سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورتی که فشار تزریق پایین باشد دوغاب تنها قابلیت پرکردن شکستگی‌های نسبتاً بزرگی را دارد که در نزدیکی گمانه تزریق می‌باشند و در نتیجه گسترش دوغاب کیفیت مورد انتظار را نخواهد داشت. براساس مطالعات صورت گرفته توسط اریکسون^۴ در سال ۲۰۰۲ بهتر است فشار تزریق در ابتدای عملیات به منظور عدم تشکیل filter cake در گمانه‌ها و شکستگی‌ها کم باشد و سپس به تدریج افزایش داده شود تا نفوذپذیری بهینه حاصل شود.

۳-۴ مدل‌سازی تحلیلی عملیات تزریق

در سال ۱۹۹۳، Janson طبق شکل ۳-۲ مدلی را بر این فرضیه در نظر گرفت که توده سنگ مورد نظر دارای یک درزه بوده و این تک درز به شکل دیسک دایره‌ای تحت بازشدگی ثابت b باشد با شروع عملیات تزریق، دوغاب از گمانه‌ای که در مرکز این دیسک قرار دارد به صورت شعاعی و یکسان تمام

¹ Insitu stress

² Aperture

³ Stiffness

⁴ Eriksson

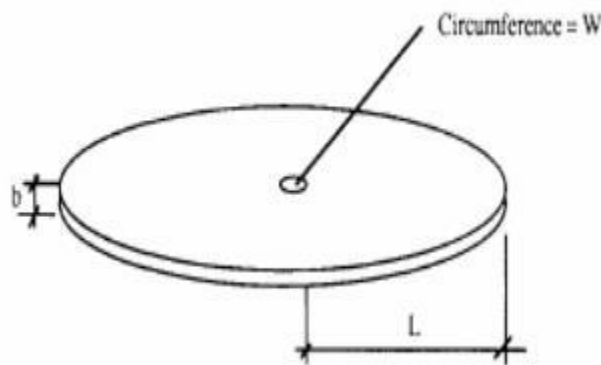
دیسک مورد نظر را تحت پوشش قرار می‌دهد. طبق رابطه ۳-۴ شعاعی از دیسک که توسط دوغاب تزریق می‌یابد، شعاع نفوذ یا I نامیده شده است.

$$I = \frac{\Delta P \cdot b}{2\tau_0} \quad 4-3$$

که در آن:

ΔP = اختلاف فشار بین فشار آب زیرزمینی با فشار تزریق

τ_0 = چسبندگی دوغاب (تنش تسلیم دوغاب)



شکل ۳-۲ درزه دیسک مانند با گمانه‌ای در مرکز آن [Janson, 1993]

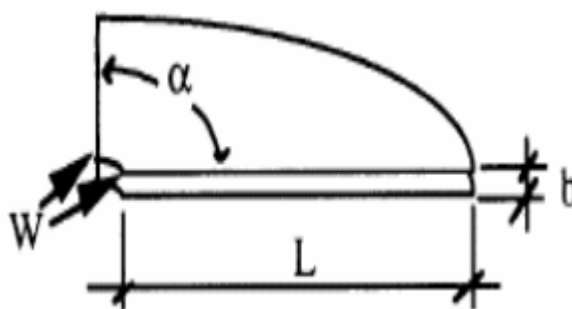
مدل دیگری که توسط هاسلر^۱ در سال ۱۹۹۲ و برانتبورگر^۲ در سال ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد که فرض بر این بود که دوغاب از گمانه به درون مجموعه‌ای از درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در سنگ، با زاویه گسترش α تزریق می‌شود. بخش‌های نفوذپذیر توده سنگ، با درزه‌هایی دایره‌ای و دیسک مانند شبیه-سازی شده که گمانه تزریق در مرکز دیسک قرار دارد. زاویه گسترش دوغاب در یک درزه ایده‌آل $\alpha = 2\pi$ است. با کاهش کیفیت مکانیکی توده سنگ و در نتیجه با افزایش تعداد درزه‌های موجود، مقدار α کاهش می‌یابد (شکل ۳-۳).

شعاع تأثیر دوغاب در سال ۱۹۸۵ توسط Lombardi براساس رابطه زیر تخمین زده شده است:

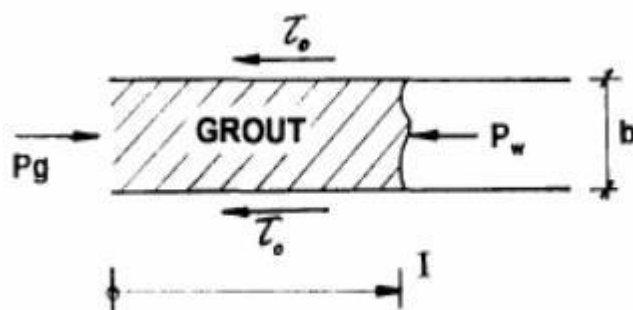
$$I = \frac{p_w g (h_w - h)}{2\tau_0} b \quad 5-3$$

¹ Hassler

² Brantburger



شکل ۳-۳ نفوذ دوغاب با زاویه گسترش α (Brantburger,2000- Hassler,1992)



شکل ۳-۴ نفوذ دوغاب درون درزهای با بازشدگی b (Lombardi,1985)

جانسون در سال ۱۹۹۳ مدلی تحلیل کرد که حالت توسعه یافته مدل اولش بود که نفوذ دوغاب را در توده سنگ، مفصل تر از مدل پیشین توصیف می کرد. در این مدل دوغاب از گمانه به درون مجموعه ای از دیسک های دایره ای جریان یافته است. به صورتیکه دیسک دارای بازشدگی b^{-1} و شعاع نفوذ I برای دوغاب است. دیسک اصلی که از گمانه عبور کرده است، با دیسک دیگر (ثانویه) برخورد دارد. تغییرات در بازشدگی با پارامترهای زمین شناسی θ ، β و K توصیف می شود. در این پارامترها، تفاوت های میان نفوذ دوغاب در توده سنگ و اثر دیسک های ثانویه در نظر گرفته می شوند. بازشدگی میانگین درزه را می توان با پارامتر β که با استفاده از بازشدگی هیدرولیکی میانگین b که از آزمایش لوژان به دست می آید، بدست آورد:

$$\bar{b} = \beta \cdot b$$

۶-۳

ضریب β نسبت مساحت کلی مجموعه‌ی درزه‌ها به مساحت دیسک اولیه است. تعداد دیسک‌های تزریق-پذیر N_g که با گمانه برخورد دارند، از حاصل ضرب پارامتر تبدیل K_1 در تعداد دیسک‌های آب‌بر N_w تعیین می‌شود:

$$N_g = K_1 \cdot N_w \quad ۷-۳$$

شعاع نفوذ I به کمک پارامترهای b_g و K_3 محاسبه می‌شود که K_3 نسبت طول مسیر خمیده به طول مسیر شعاعی نفوذ دوغاب است. پارامتر K_3 نسبت بازشدگی درزه تزریق‌پذیر b_g به بازشدگی هیدرولیکی درزه است:

$$K_3 = \frac{b_g}{b} \quad ۸-۳$$

شعاع نفوذ دوغاب از رابطه زیر حاصل می‌شود:

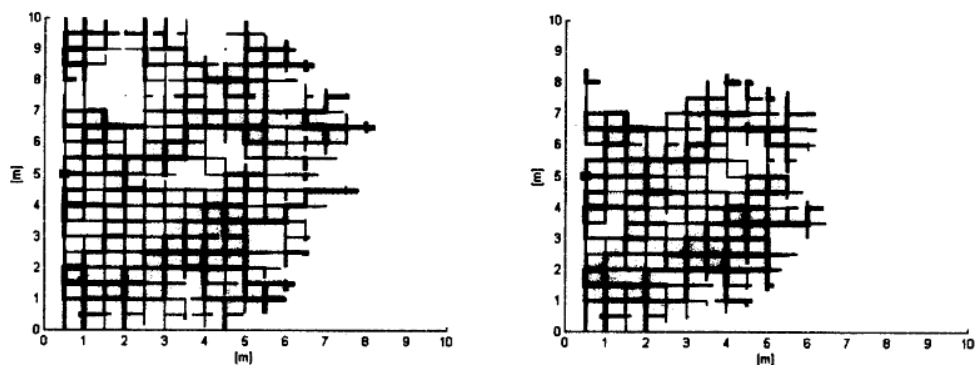
$$I = \frac{\Delta P \cdot b_g}{2\tau_0 K_3} \quad ۹-۳$$

پارامتر K_1 با توجه به وضعیت زمین‌شناسی سنگ از $۰/۳-۰/۵$ متغیر است، پارامتر مربوط به بازشدگی مسیر K حدود ۴، پارامتر مربوط به نوع مسیر تزریق یافته K_3 برابر $۱/۵$ ، θ با فرض درزه‌های بزرگ‌تر از $۰/۳$ میلی‌متر و اینکه درزه‌ها دچار دگرشکلی نمی‌شوند، برابر ۱ و β معادل نصف تعداد دسته‌درزه‌ها است (Jansson, 1993).

در سال ۲۰۰۰، Lee و همکارانش با بررسی اثر تزریق نفوذی بر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ به‌وسیله تست‌های برجای لرزه‌ای و آنالیزهای معکوس دریافتند که سفتی یا صلبیت درزه‌هایی که دوغاب درون آن‌ها نفوذ کرده است، به میزان ۶ برابر بیشتر از صلبیت درزه‌ها در حالت تزریق نشده افزایش پیدا کرده است [Lee et.al, 2000].

۳-۵ مدل سازی عددی عملیات تزریق

مطالعات متعددی در زمینه شبیه سازی عددی عملیات تزریق صورت گرفته است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰، اریکسون به منظور تعیین روشی مناسب جهت پیش بینی تأثیر تزریق در آب بندی تونل ها از مدل سازی عددی استفاده نمود و در مدل خود تأثیر فیلتر کیک^۱ و بازشدگی را بر روی میزان گسترش دوغاب با وزن مخصوص های متفاوت بررسی نمود. مدل ساخته شده در این مطالعه شامل یک بلاک است که از یک طرف آن دوغاب تزریق شده است (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵ نمایی از تأثیر فیلتر کیک بر محدود شدن میزان تزریق دوغاب در زمان تزریق یکسان. در شکل سمت چپ میزان فیلتر کیک ۱۰ mm و در سمت راست ۱۰۰ mm است [Eriksson,2000].

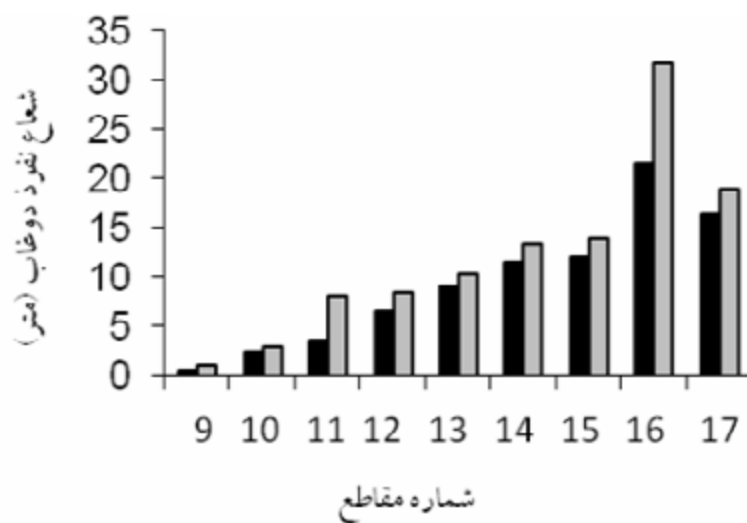
نتایج حاصل از این مطالعات نشان دادند که برای جریان پیدا کردن دوغاب درون توده سنگ لازم است بازشدگی درزه ها از یک حد کمینه بیشتر باشد و فیلتراسیون در درزه هایی اتفاق می افتد که بازشدگی آنها بین حد کمینه و حد بحرانی باشد. همین طور مطالعات نشان دادند که دوغاب فیلتر شده چگالی کمتر نسبت آب-سیمان بیشتری دارد بنابراین دوغابی که در این شرایط تزریق می شود آب اندازی بیشتری خواهد داشت (Eriksson,2000). همچنین در سال ۲۰۰۰، Lee و همکارانش با بررسی اثر تزریق نفوذی^۲ بر پارامترهای مقاومتی توده سنگ به وسیله تست های برجای لرزه ای و آنالیز معکوس^۳

¹ Filter cake

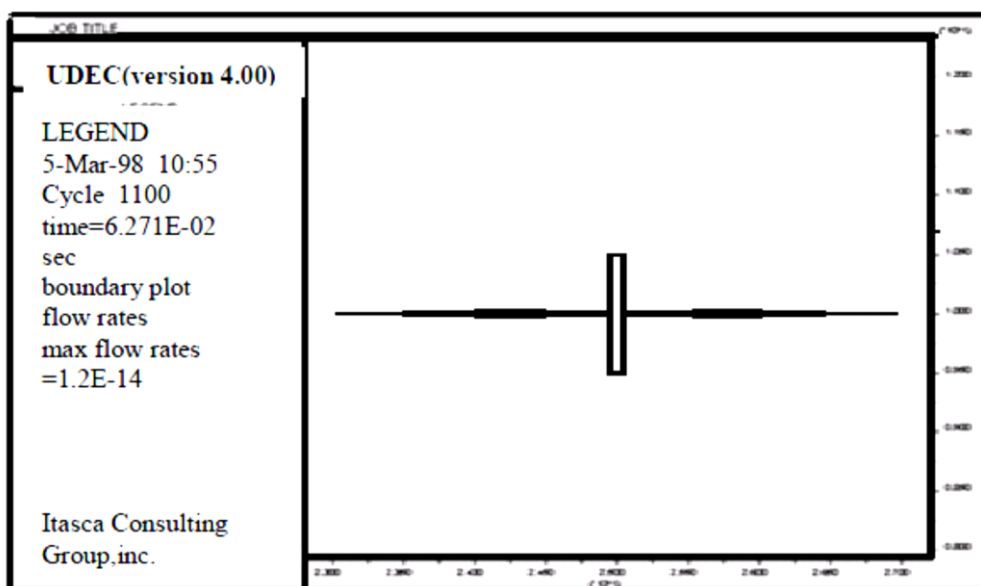
² Permeation Grouting

³ Back Analysis

دریافتند که سفتی یا صلبیت درزه‌هایی که دوغاب درون آن‌ها نفوذ کرده است، به میزان ۶ برابر نسبت به صلبیت درزه‌ها در حالت تزریق نشده افزایش پیدا کرده است (Lee et.al, 2000). مسعودی در سال ۲۰۰۷ با استفاده از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار UDEC شعاع تأثیر و حجم خورند مواد تزریق را در ساختگاه سد سیمره بررسی کرده و با مقایسه نتایج مطالعه خود و نتایج واقعی، مدل‌سازی عددی را جهت پیش‌بینی نتایج، معتبرتر از روش‌های تحلیلی دانسته است.

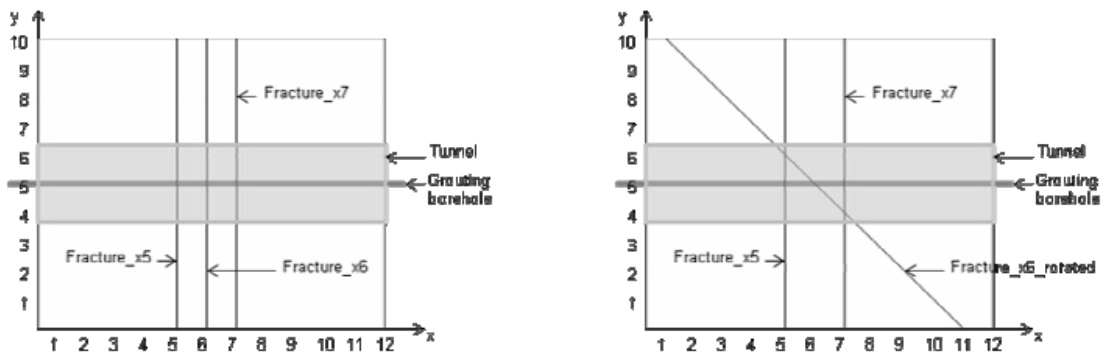


شکل ۳-۶ مقایسه شعاع نفوذ دوغاب محاسبه شده با استفاده از مدل عددی (نمودار خاکستری رنگ) و مدل‌های تحلیلی (نمودار مشکی رنگ) (مسعودی، ۱۳۷۸)



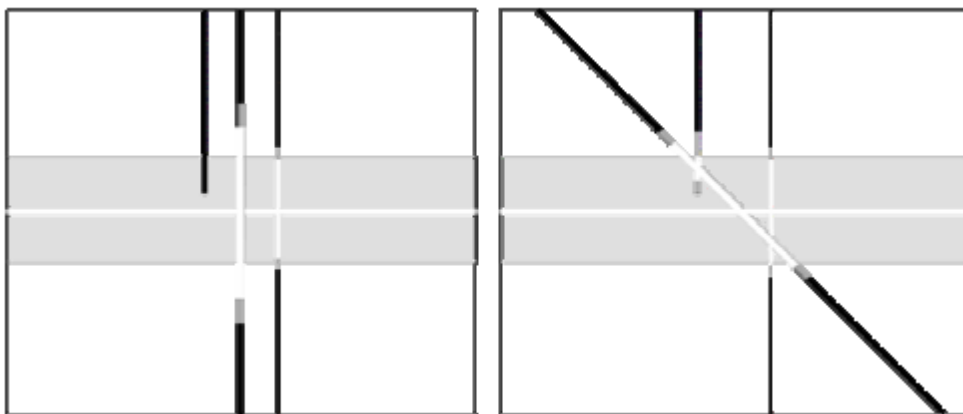
شکل ۳-۷ نمایش دوغاب درون توده سنگ برای بررسی عملیات تزریق در ساختگاه سد سیمره (مسعودی، ۱۳۸۷)

در سال ۲۰۰۸ مدلی عددی در نرم‌افزار DarcyTools جهت شبیه‌سازی عملیات تزریق توسط Hernqvist ساخته شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی توده‌سنگ با سیستم درزه‌داری ساده استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل‌سازی نشان داده شد که عمق گسترش دوغاب در یک شبکه شکستگی کمتر از گسترش آن در یک شکستگی بزرگ است. پس از مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های برداشت شده از چند مطالعه موردی، اهمیت مطالعات اکتشافی جهت تامین داده‌های ورودی دقیق‌تر به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نمایان‌تر شده است (Hernqvist,2008).



شکل ۳-۸ مدل‌های اولیه بررسی عملیات تزریق زمانی که شکستگی‌ها موازی و غیر موازی

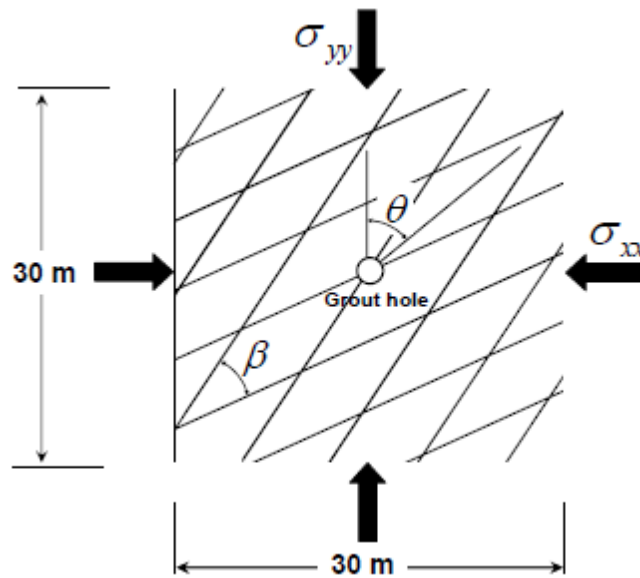
می‌باشند. [Hernqvist,2008]



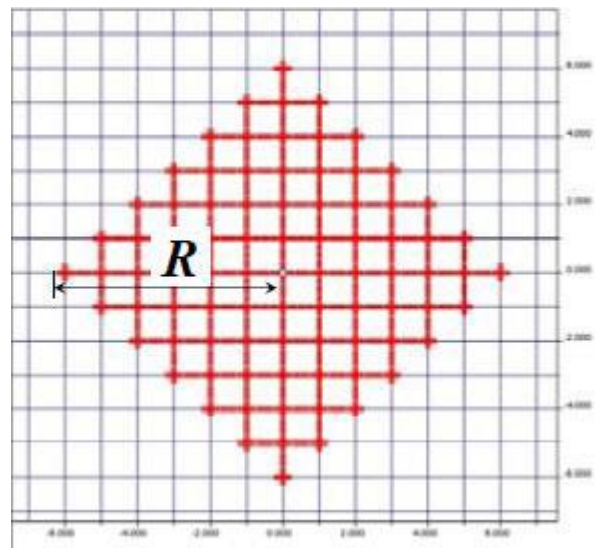
شکل ۳-۹ میزان نفوذ دوغاب در مقاطع مدل شده [Hernqvist,2008]

تأثیر عوامل هندسی بر عملیات تزریق در پرده‌آبند سد در سال ۲۰۰۸ توسط معادی‌خواه و مرتضوی از نرم‌افزار UDEC به صورت هیدرو مکانیکی بررسی شده است (شکل ۳-۱۰). بر اساس مدل‌سازی انجام شده توسط این محققین، با افزایش بازشدگی درزه‌ها و سفتی نرمال درزه‌ها عمق نفوذ دوغاب و حجم

دوغاب تزریق شده افزایش پیدا می‌کند (شکل ۳-۱۱). افزایش فاصله‌داری درزه‌ها تاثیری بر عمق نفوذ ندارد و تنها میزان دوغاب را کاهش می‌دهد و تأثیر جهت‌داری درزه‌ها بر روی گسترش دوغاب شدیداً به جهت تنش‌های برجا بستگی دارد.

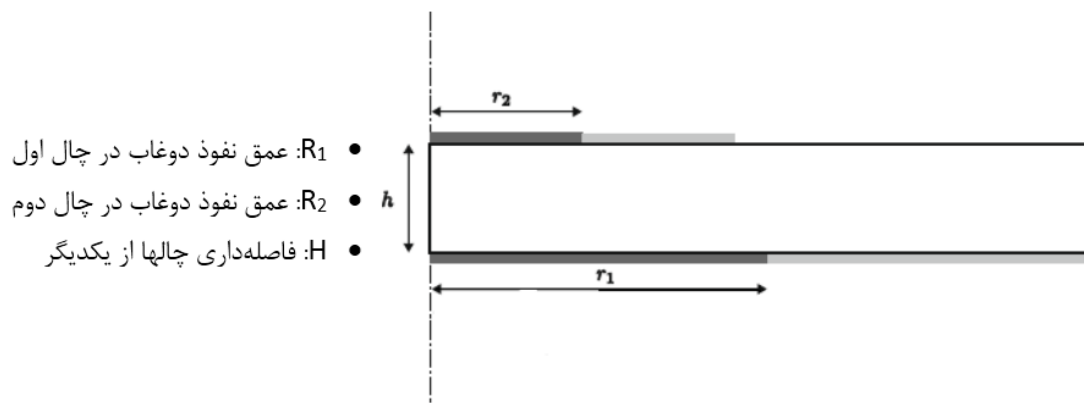


شکل ۳-۱۰ هندسه مدل ساخته شده جهت بررسی عملیات تزریق [Maadikhah et al., 2008]



شکل ۳-۱۱ عمق نفوذ محاسبه شده برای دوغاب زمانی که بازشدگی درزه‌ها $1/6 \text{ mm}$ و فاصله‌داری آن‌ها 1 m است و مدل تحت تنش برجای $3/4 \text{ MPa}$ قرار دارد [Maadikhah, 2008]

Gothal و Stille در سال ۲۰۱۰ با ساخت مدل اجزا محدود که شامل دو درزه تزریق شده با عمق تزریق متفاوت بودند، تعامل^۱ یا برهم کنش درزه‌ها را با تغییر فشار اعمالی به محیط به عنوان فشار تزریق، بررسی نمود. مدل ساخته شده در این تحقیق در شکل ۳-۱۲ نشان داده است.



شکل ۳-۱۲ مدل ساخته شده جهت بررسی برهم کنش درزه‌ها در عملیات تزریق [Gothal, 2010]

نتیجه حاصل از این مدل‌سازی نشان داد، تا اتمام طول فاصله‌ای که هر دو درزه مورد تزریق قرار گرفته بودند، سفتی درزه‌ها در نتیجه تزریق دوغاب، افزایش پیدا کرده است بنابراین درزه‌ها تأثیر منفی روی یکدیگر ندارند. این در حالی است که درزه‌ای که دوغاب به درون آن بیشتر نفوذ کرده است، با افزایش فشار تزریق، دچار اتساع^۲ شده و سبب می‌شود فاصله‌داری^۳ درزه‌ها کم شود [Gothal, 2010].

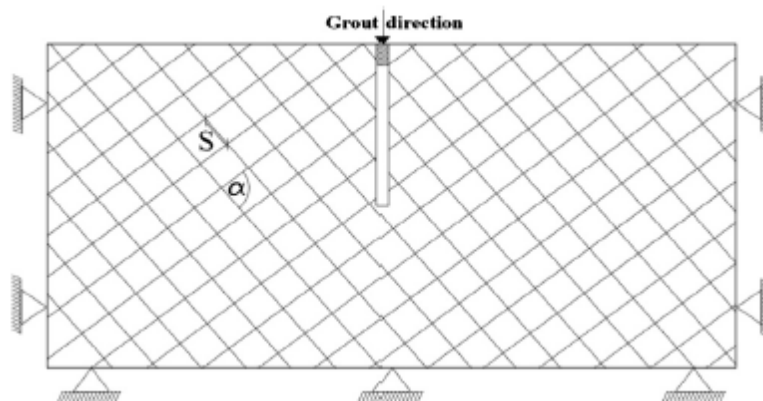
به همین صورت سعیدی در سال ۲۰۱۳ با استفاده از داده‌های مربوط به سد بختیاری در یک مدل دو بعدی، جریان سیال تزریق و عمق نفوذ آن را در توده‌سنگ درزه‌دار را مدل‌سازی کرده و نتایج قابل قبولی از مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با روش‌های تحلیلی و مقادیر واقعی به دست آورده است. در نتیجه مطالعه صورت گرفته مشاهده شد که با افزایش تنش تسلیم دوغاب، میزان نرخ نفوذ دوغاب و میزان گسترش آن در توده سنگ کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه برای به دست آوردن عمق نفوذ مورد نظر لازم است فشار تزریق افزایش پیدا کند. همچنین افزایش بازشدگی هیدرولیکی تأثیر بسزایی در

¹ Interaction

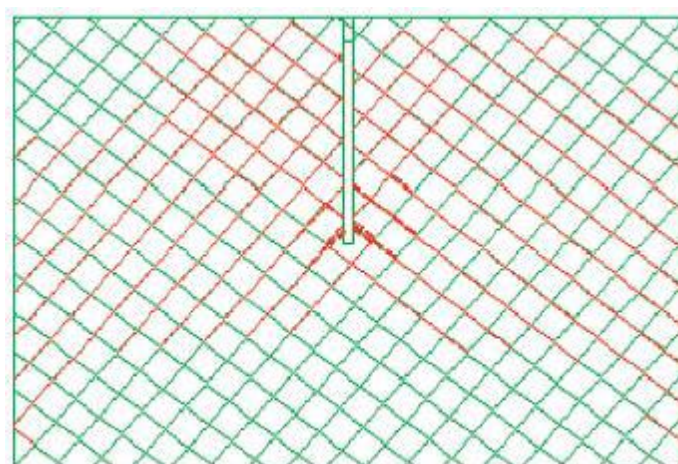
² Dilation

³ Spacing

افزایش نرخ نفوذ دوغاب دارد. بر خلاف پارامتر مذکور، افزایش فاصله‌داری بین درزه‌ها سبب کاهش نرخ نفوذ دوغاب درون توده سنگ شده است [Saeidi et al., 2013].



شکل ۳-۱۳ مدل ساخته شده برای بررسی عملیات تزریق در ساختگاه سد بختیاری (Saeidi et al., 2013)



$a = 0.5\text{mm}$

شکل ۳-۱۴ میزان نفوذ دوغاب زمانی که بازشدگی درزه‌های توده‌سنگ 0.05mm ، فشار تزریق 1MPa و تنش تسلیم دوغاب 7Pa باشد. (Saeidi et al., 2013)

۳-۶ جمع بندی

در فصلی که گذشت، در بخش اول به تاریخچه تزریق پرداخته شد و سپس عملیات تزریق و روش‌های آن مورد بررسی قرار گرفت که نقاط ضعف و محاسن هریک از روش‌ها بحث شد. پس از آن مطالعات انجام شده روی عملیات تزریق بیان شد، که حالت تحلیلی و عددی عملیات تزریق را هریک از افراد

مورد مطالعه قرار داده بودند در حالت عددی در مقایسه با حالت تحلیلی نتایج نزدیک به واقعیت و معتبرتر از حالت تحلیلی بودند.

فصل چهارم

معرفی ساختگاه سد تنگاب و

تعیین مدل DFN

در تمامی مسائل مهندسی سنگ به‌ویژه مطالعه جریان سیال از درون توده سنگ درزه‌دار، توصیف هندسی و شبیه‌سازی هندسی توده‌سنگ از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مراحل مطالعه است. برای شبیه‌سازی هندسی شکستگی‌ها در توده سنگ درزه‌دار، دو رویکرد وجود دارد. در رویکرد اول خصوصیات هندسی شکستگی‌ها قطعی و مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای مثال طول خط اثر یا اندازه‌ی شکستگی‌ها نامحدود و درزه‌های یک دسته درزه موازی هم فرض می‌گردد. بدیهی است این رویکرد با واقعیت توده سنگ طبیعی همخوانی ندارد. در رویکرد دوم، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده سنگ نظیر جهت‌داری، طول خط اثر و... در نظر گرفته می‌شود و در واقع هر خصوصیت هندسی با تابع توزیع احتمال خاصی در شبیه‌سازی هندسه‌ی توده سنگ معرفی می‌شود. روش شکستگی مجزا بر پایه‌ی رویکرد دوم بنا نهاده شده است و شبیه‌سازی تصادفی هندسه‌ی توده سنگ درزه دار را توصیف می‌کند.

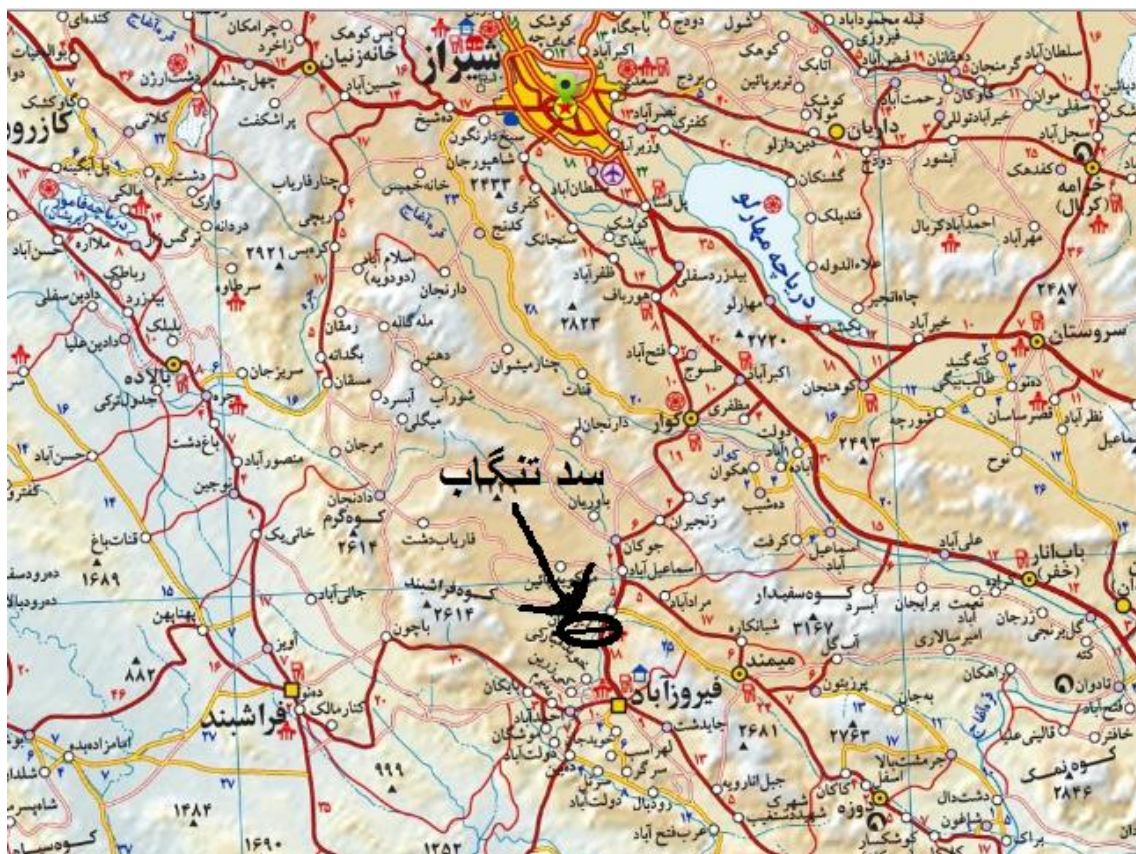
در این فصل با تمرکز بر ساختگاه سد تنگاب، به بررسی توابع توزیع به کار گرفته شده در تولید شبکه شکستگی مجزا و چگونگی تولید مدل‌های شبکه شکستگی با استفاده از مدل DFN پرداخته شده است.

۴-۲ ویژگی‌های پروژه سد تنگاب

به منظور استفاده بهینه از منابع آب کشور برای تامین آب مورد نیاز کشاورزی دشت فیروزآباد، کنترل و ذخیره‌سازی آب‌های سیلابی سد تنگاب بر روی رودخانه فیروزآباد در نزدیکی شهرستان فیروزآباد در استان فارس احداث گردیده.

۴-۲-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

سد تنگاب در استان فارس با توجه به شکل ۴-۱ در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز و در ۱۲ کیلومتری شمال شهر فیروزآباد (مسیر فیروزآباد-کوار)، محل تنگاب بر روی رودخانه فیروزآباد واقع شده است که مختصات جغرافیایی محل سد در طول $12^{\circ} 19' 52^{\circ}$ شرقی و عرض $28^{\circ} 34' 12^{\circ}$ شمالی است [مهندسين مشاور آب نیرو].



شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی سد تنگاب [مهندسين مشاور آب نیرو]

۴-۲-۲ واحد سنگ چینه‌شناسی محل پروژه سد تنگاب

بدنه سد بر روی سنگ‌های آهکی و آهک مارنی و مارن آهکی و مارن تشکیلات سازند آسماری به سن (الیگوسن-میوسن) قرار دارد این سازند بر روی سازند شیل و مارنی پابده گورپی (پالئوسن-الیگوسن) و زیر زون انتقالی قرار دارد زون انتقالی نیز به هم شیب زیر سازند رازک (میوسن پایینی) که از مارن و گچ تشکیل یافته است قرار گرفته است. این سازند را سازند مارنی میشان بطور هم‌شیب و به سن (میوسن میانی) پوشانده است بر روی سازند مزبور سازند آقاجاری به سن (میوسن بالایی) قرار دارد.

سازندهای رازک میشان و آقاجاری و زون انتقالی به دلیل اینکه از مارن و تبخیرها تشکیل یافته‌اند از قابلیت نفوذ و آبگذری قابل توجهی برخوردار نمی‌باشند. لذا تنها محدوده سازند آسماری قابلیت آبگذری را داراست [مهندسین مشاور آب نیرو]

۳-۴ توزیع آماری و تولید تصادفی پارامترهای هندسی درزه‌ها

برای شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی درزه‌ها لازم است. برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها محققان مختلف توابع توزیعی احتمالی که با انطباق واقعی پراکندگی پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده سنگ را توصیف می‌کنند، تعیین کرده‌اند توزیع آماری این پارامترهای هندسی در جدول ۴-۱ درج شده است [اصفهانی، ۱۳۹۳].

جدول ۴-۱ توابع توزیع آماری مرسوم در تولید شبکه شکستگی مجزا [اصفهانی، ۱۳۹۳].

پارامتر هندسی	تابع توزیع
مقدار شیب	توزیع فیشر
جهت شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
طول رخنمون	گاما، لاگ نرمال، نمایی منفی و قانون توان
موقعیت مرکز شکستگی	توزیع پواسون

۱-۳-۴ توزیع جهت‌داری

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

¹ Fisher Constant

میانگین داده‌های جهت‌داری نزدیک می‌شود و بالعکس با کم شدن این ضریب سبب ایجاد پراکندگی بیشتری در جهت‌داری ناپیوستگی‌ها می‌شود. با کاهش ضریب فیشر پراکندگی جهت‌دار افزایش می‌یابد و ناپیوستگی‌های یک دسته از حالت موازی بودن فاصله می‌گیرند در نتیجه احتمال اینکه وضعیت‌هایی در ناپیوستگی‌ها ایجاد شود که به موجب آن برخوردی بین آن‌ها رخ دهد افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش ضریب فیشر ناپیوستگی‌ها به سمت موازی شدن با یکدیگر پیش می‌روند و این امر سبب کاهش اتصال بین آن‌ها می‌شود [Priest, 1993].

اگر θ مقدار زاویه انحراف از میانگین جهت‌داری باشد، با استفاده از تابع چگالی احتمال جمع‌ی با ضریب فیشر K ، رابطه ۴-۱ را خواهیم داشت [Priest, 1993].

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\ln[e^{k-F}(e^k - e^{-k})]}{K}\right) \quad ۱-۴$$

۴-۳-۲ توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر شکستگی‌ها

در زمینه‌ی توابع توزیع آماری طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌های توده سنگ مطالعات مختلف انجام گرفته است. مک ماهن^۱ ۱۹۷۵، بارتن^۲ ۱۹۷۷، انیشتین و همکاران^۳ ۱۹۷۹، دریافتند که طول خط اثر و فاصله‌داری درزه‌ها از تابع توزیع احتمال لاگ نرمال پیروی می‌کنند [Vermily, Schols., 1995]. رابرتسون^۴ ۱۹۷۱، پریست و هادسون^۵ ۱۹۸۱ و لافونته^۶ در سال ۱۹۹۹، اعلام کردند که طول خط اثر درزه‌های توده سنگ از تابع توزیع نمایی منفی پیروی می‌کند [Baghbanan, 2008]. پریست در سال ۱۹۹۳ دریافت که طول خط اثر درزه‌ها از تابع توزیع گاما نیز پیروی می‌کند [دلقدی، ۱۳۹۵]. باغبانان در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر تنش روی خواص هیدرو مکانیکی توده سنگ پرداخت وی در ارائه نتایج خود اعلام کرد که طول خط اثر و فاصله‌داری شکستگی‌های منطقه سلافیلد^۷ انگلستان از تابع توزیع توان پیروی می‌کند در با توجه مواردی که مطرح شد مهم‌ترین توابع توزیع آماری که عموماً طول خط اثر درزه‌ها از آن‌ها پیروی می‌کند توابع توزیع لاگ نرمال، نمایی منفی، توان و گاما است به‌منظور تحلیل

¹ Mc mahen

² Einstein and et al

³Robertson

⁴ Lphonte

⁵ Sellafield

هرچه آسان‌تر برآزش توابع مذکور در این پایان‌نامه از نرم‌افزار *Easy-fit* استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت برآزش توابع توزیع انتخابی به کاربر این امکان را می‌دهد که بر اساس سه سلسله روش محاسباتی توزیع‌های مدنظر کاربر را از لحاظ کاربردی رتبه‌بندی کرده و بهترین توزیع را پیشنهاد می‌دهد.

۴-۳-۳ توابع توزیع حاکم بر بازشدگی شکستگی‌ها

با بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تعیین توابع توزیع احتمال بازشدگی تا به حال مشخص شده است که این پارامتر از دو تابع توزیع احتمال لاگ نرمال و توان پیروی می‌کند. این توابع توزیع در مطالعات گیل^۱ ۱۹۷۹، بارتن و حکمی ۱۹۹۰، پیراک و نولته^۲ ۱۹۹۷، مورد توجه قرار گرفته است [Teimori Sangarami, 2005]. علاوه بر مواردی که اشاره شده در مطالعات حکمی و لارسون^۳ ۱۹۹۶، اورون و برکویتز^۴ ۲۰۰۱ و شریف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۰۴ اثر تابع توزیع نرمال بروی بازشدگی درزه‌ها را مورد توجه قرار داده‌اند. همچنین برآزش تابع توزیع احتمال توان روی بازشدگی درزه‌ها نیز در مطالعات انجام شده توسط دروزی و همکاران ۲۰۰۱، مورزنکو و همکاران ۲۰۰۴ دیده شده است [Baghbanan, 2008].

۴-۳-۴ شبیه‌سازی تصادفی شکستگی‌های توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو

در مطالعات مختلف مهندسی سنگ برای توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده سنگ از شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو بر پایه‌ی شبکه شکستگی‌های مجزا استفاده می‌گردد. شبیه‌سازی مونت کارلو یک فرایند تصادفی است که تصادفی بودن هندسه شبکه شکستگی‌ها را با نمایش خواص شکستگی نظیر موقعیت، اندازه، جهت‌داری و بازشدگی به صورت تصادفی که از توابع چگالی احتمال مخصوص به خود تبعیت می‌کنند، بیان می‌کند. شبیه‌سازی مونت کارلو برای کاهش عدم قطعیتی که به واسطه ناشناخته بودن هندسه سیستم شکستگی‌ها به وجود می‌آید، یک ابزار کارآمد است و کمی‌سازی

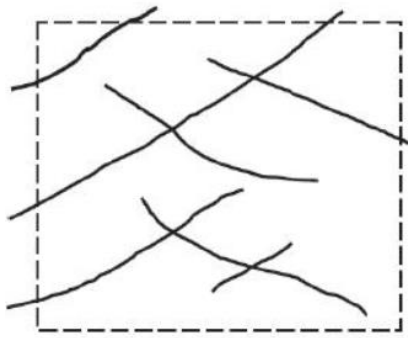
¹ Gale
² Pirak

³ Larsson
⁴ Berkoyitz

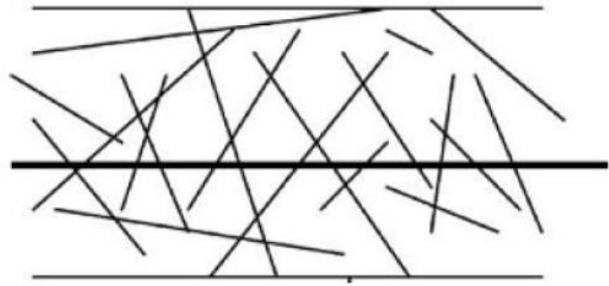
تغییرات پارامترها را توسعه می‌دهد. این ابزار مخصوصاً برای مهندسی فضاهای زیرزمینی در توده سنگ درزه‌دار مفید است [اصفهانی، ۱۳۹۳].

۴-۴ مطالعات میدانی

به طور معمول جمع‌آوری داده‌ها به روش‌های برداشت خطی، پنجره‌ای و بررسی گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی انجام می‌شود که در این پژوهش عملیات سطحی درزه‌ها به روش خطی و گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی حفر شده توسط شرکت مهندسی مشاور آب‌نیرو استفاده شده است. در روش خطی (شکل ۴-۲) اصولاً از یک اسکن لاین (متر یا نوار) استفاده می‌شود که بروی یک رخنمون صاف از سنگ قرار داده می‌شود. درزه‌های متقاطع با خط برداشت ثبت شده و خصوصیات این درزه‌ها من جمله شیب، جهت شیب، بازشدگی، پایایی (طول خط اثر) و پرشدگی یادداشت می‌گردد. به منظور استخراج پارامترهای هندسی مورد نیاز جهت تهیه مدل شبکه شکستگی بر اساس برداشت‌های صحرائی از ساختگاه سد تنگاب، دو برداشت خطی عمود برهم صورت گرفته است. خط برداشت با طول کلی ۵۲۰ متر که تعداد ۴۵۵ درزه درون ۳ دسته درزه‌ی اصلی قرار گرفته است. خصوصیات مورد نیاز برای هر دسته درزه شامل: تعداد دسته درزه‌های اصلی، تعداد هر دسته درزه، تابع توزیع طول خط اثر، تابع توزیع بازشدگی، جهت‌داری، ثابت‌های فیشر، فروانی طولی و شدت حجمی است. پس از تحلیل داده‌های برداشت شده در نرم‌افزار Dips نتایج به دست آمده در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. همچنین مشخصات دسته درزه‌های برداشت شده در جدول ۴-۲ آمده است.

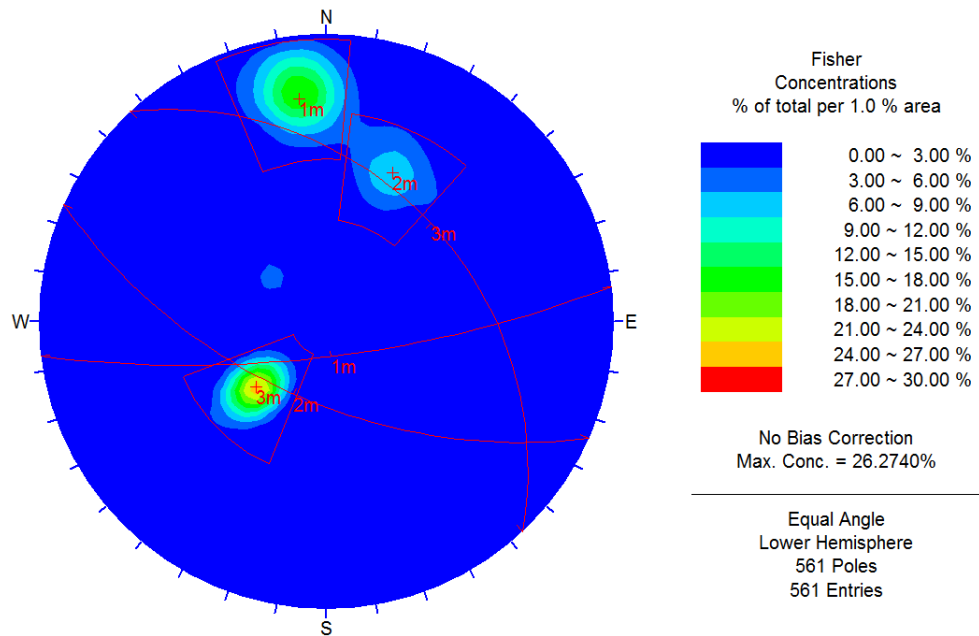


ب) روش برداشت پنجره



الف) روش خط برداشت

شکل ۲-۴ روش‌های برداشت ناپیوستگی‌های توده سنگ در رخنمون [میرزایی نصیرآباد، ۱۳۹۱]



شکل ۳-۴ استریونت دسته درزه‌های غالب و جهت‌داری هر دسته درزه در ساختگاه سد تنگاب

جدول ۲-۴ مشخصات هندسی درزه‌های ساختگاه سد تنگاب

متوسط طول خط اثر (cm)	ثابت فیشر K	متوسط بازشدگی درزه (mm)	تعداد درزه‌ها	جهت شیب (درجه)	شیب (درجه)	دسته درزه
۳۳۱	۱۱۱/۶	۶/۷	۱۵۵	۱۷۳	۷۶	۱
۳۳۶	۷۷/۳۶	۷/۱	۹۴	۲۰۳	۵۹	۲
۳۹۴	۱۲۱/۳۱	۶/۳	۲۰۶	۴۶	۳۷	۳

پس از تفکیک دسته درزه‌ها و تعیین درزه‌های غالب و با توجه به داده‌های حاصله از برداشت‌های خطی، نوع و اولویت توابع آماری حاکم بر طول خط اثر و بازشدگی درزه‌ها برای هر دسته درزه به طور مجزا با استفاده از نرم‌افزار Easy-Fit بدست آمده که نتایج آن در زیر آورده شده است.

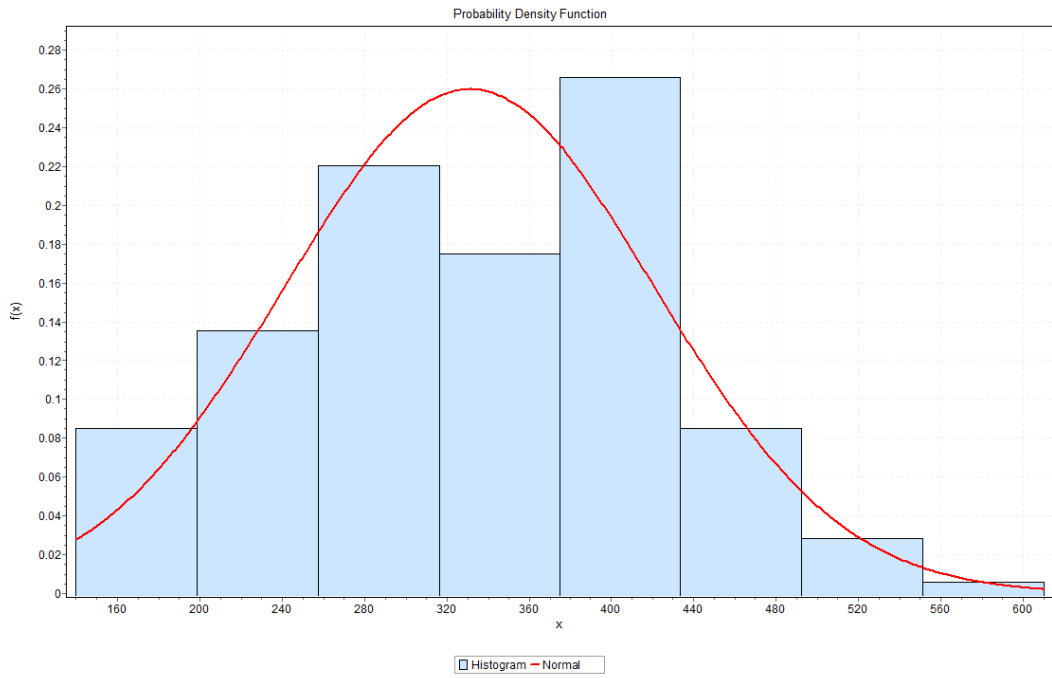
۴-۱-۴ تعیین توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها

بعد از تحلیل آماری داده‌های مربوط به طول خط اثر درزه‌ها که از برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه به دست آمد، اولویت‌بندی و تعیین نوع و برازش توابع آماری حاکم بر طول خط اثر درزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Easy-Fit انجام شد و در جدول ۴-۳ آورده شده است.

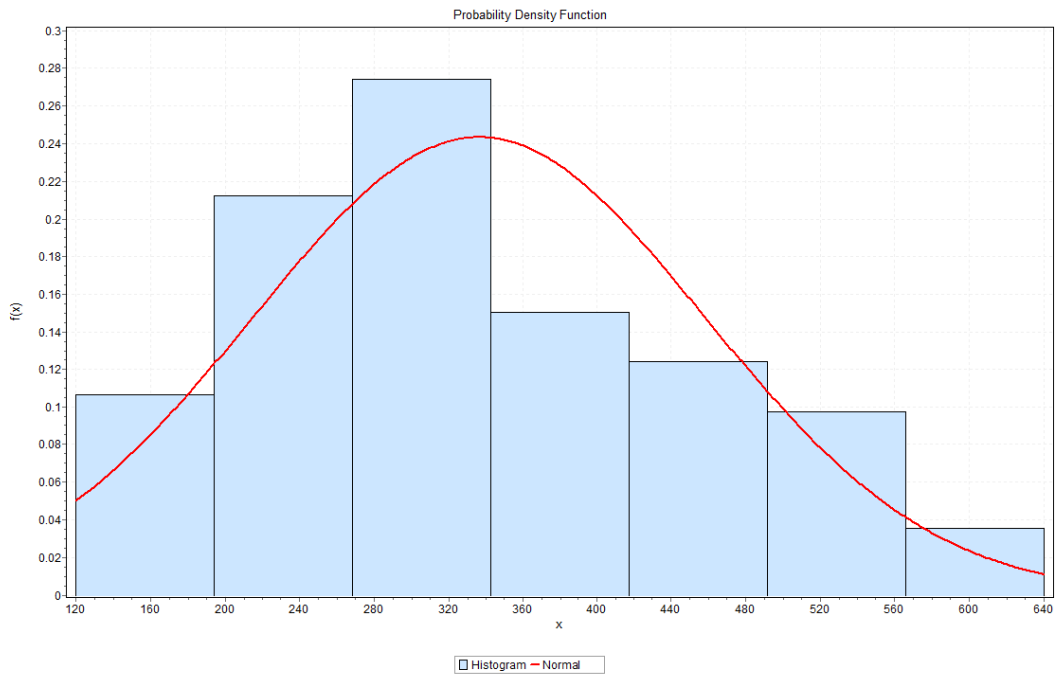
جدول ۴-۳ اولویت توابع توزیع آماری طول خط اثر دسته درزه‌ها

اولویت‌بندی توابع توزیع آماري		۱	۲	۳	۴	۵	۶
دسته درزه	۱	نرمال	لاگ نرمال (3p)	لاگ نرمال	توانی	نمایی (2p)	نمایی
	۲	نرمال	لاگ نرمال (3p)	لاگ نرمال	توانی	نمایی (2p)	نمایی
	۳	نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال (3p)	توانی	نمایی (2p)	نمایی

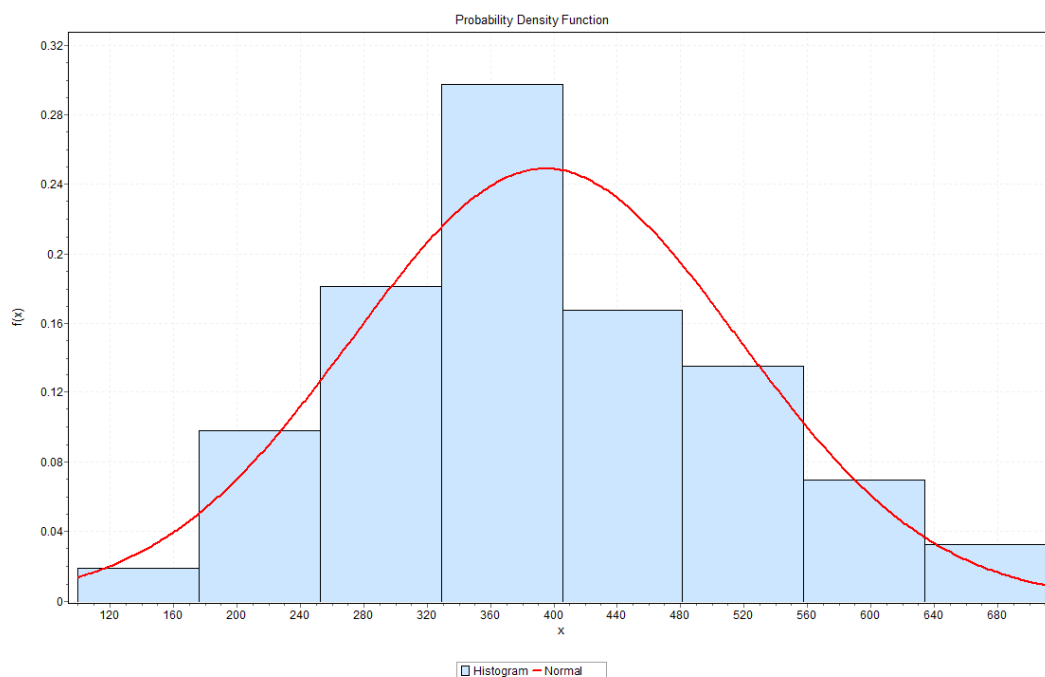
با توجه به نتایج جدول ۴-۳ مناسب‌ترین تابع توزیع آماری منطبق بر طول خط اثر درزه‌ها، تابع توزیع نرمال است. در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ و ۴-۶ منحنی برازش تابع توزیع طول خط اثر برای هر سه دسته درزه نشان داده شده است.



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



شکل ۴-۵ برازش تابع توزیع نرمال روی خط اثر دسته درزه ۲



شکل ۴-۶ برآزش تابع توزیع نرمال روی خط اثر درزه ۳

مقادیر آماری مربوط به طول خط اثر هر یک از دسته درزه‌ها در جدول ۴-۴ آورده شده است.

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

دسته درزه	میانگین (m)	انحراف معیار (m)
۱	۳/۳۲	۰/۹
۲	۳/۳۶	۱/۲۱
۳	۳/۹۴	۱/۲۲

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

در خصوص مورد مطالعاتی این تحقیق، هم مقادیر عددی باز شدگی مربوط به برداشت خطی و همچنین بازشدگی‌های مربوط به مغزه‌های گمانه‌ها در دسترس است (جدول ۴-۵). از طرفی بازشدگی شکستگی‌ها با توجه به تأثیر بسزایی در هدایت جریان در مدل دارد باید به طور دقیق اندازه‌گیری و در مدل لحاظ

شود. بنابراین در این تحقیق، داده‌های مربوط به بازشدگی مغزه‌های گمانه‌های حفاری شده در ساختگاه سد که آزمایش‌های لوژان نیز در آن‌ها انجام شده است انتخاب شده است.

جدول ۴-۵ مقادیر بازشدگی برداشت خطی و گمانه‌ها

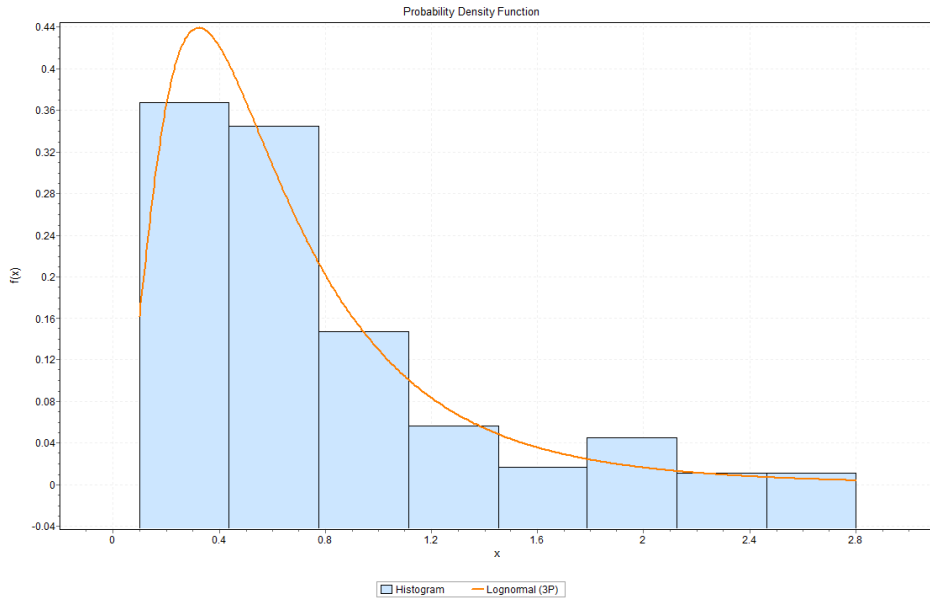
متوسط بازشدگی (mm)		دسته درزه‌ها
گمانه‌ها	برداشت خطی	
۶/۵	۶/۷	۱
۶/۵	۷/۱	۲
۶/۵	۶/۳	۳

با استفاده از نرم‌افزار Easy-Fit به اولویت‌بندی و تحلیل داده‌های مرتبط با مقدار بازشدگی درزه‌ها پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۴-۶ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۴-۶ نمایان است، مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر بازشدگی درزه‌ها، تابع توزیع لاگ نرمال است.

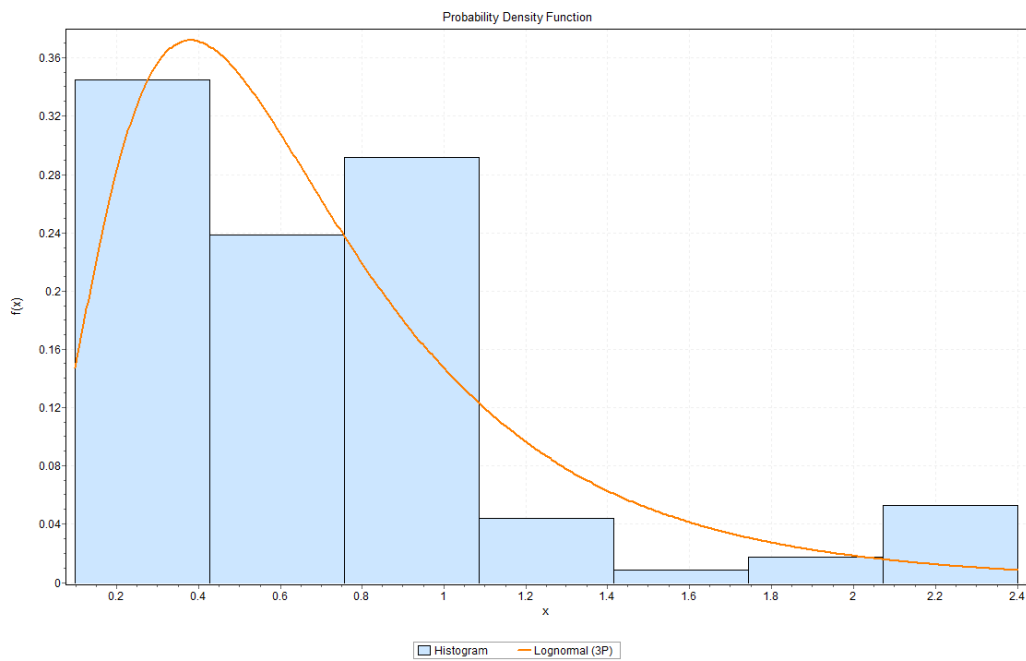
جدول ۴-۶ اولویت‌بندی توابع توزیع آماری حاکم بر بازشدگی درزه‌ها

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

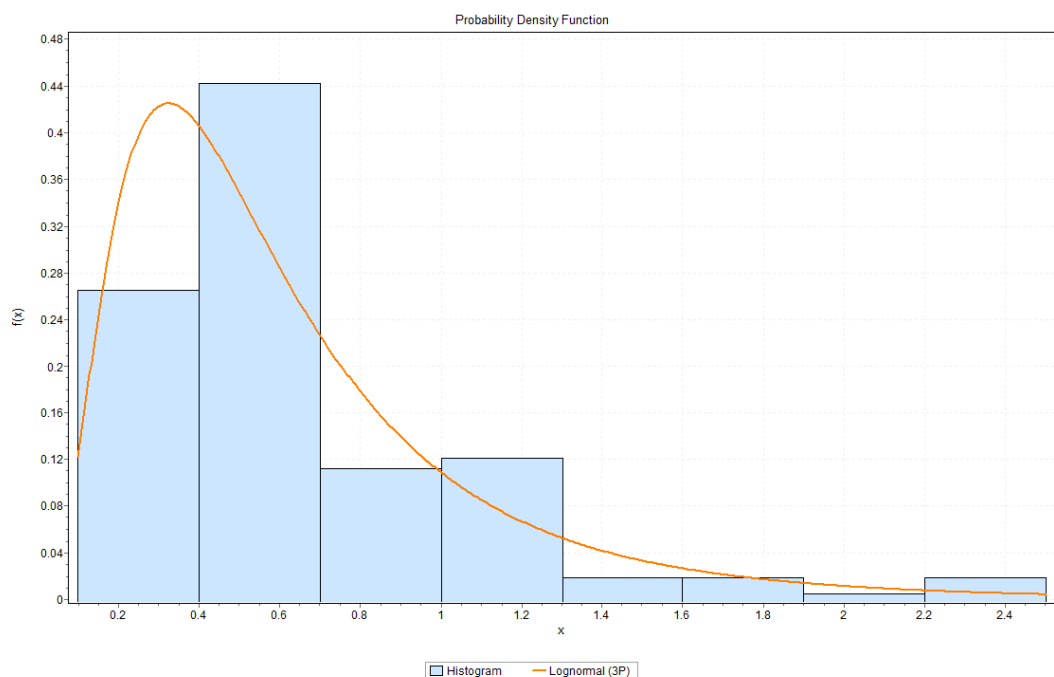
در شکل‌های ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ منحنی برازش تابع توزیع بازشدگی برای هر سه دسته درزه نشان داده شده است.



شکل ۴-۷ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۱



شکل ۴-۸ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۲



شکل ۴-۹ برازش تابع توزیع لاگ نرمال روی بازشدگی دسته درزه ۳

۴-۴-۳ فراوانی و فاصله‌داری شکستگی‌های توده سنگ

برای اینکه شبکه شکستگی مجزا توده سنگ را بخواهیم به‌وسیله شبیه‌سازی مونت کارلو تولید کنیم باید تعداد شکستگی‌های هر دسته درزه مشخص باشد. تعداد درزه‌ها به شدت حجمی و حجم مدل مورد نظر بستگی دارد. برای محاسبه فراوانی درزه‌های توده‌سنگ با توجه به موجود بودن اطلاعات برداشت‌های زمین‌شناسی، بایستی ابتدا فراوانی درزه‌ها (رابطه‌ی ۴-۲) در واحد طول پیمایش برداشت خطی تعیین شده و بعد با استفاده از ضرایب و روابط موجود (رابطه ۴-۳) بین شدت حجمی و فراوانی طولی شکستگی‌ها که توسط جینگ و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده، می‌توان شدت حجمی شکستگی‌ها را در شرایط همسانگرد محاسبه نمود [Jing et al, 2007].

$$P_{10} = \frac{\text{Number of Joint } (N)}{L(m)} (m^{-1}) \quad 2-4$$

$$P_{10} = \frac{P_{32}}{2}, P_{21} = \frac{\pi}{2} P_{32} \quad 3-4$$

که در آن:

$N =$ تعداد درزه‌های هر دسته درزه

$$L = \text{طول کل خط برداشت بر حسب متر}$$

$$P_{10} = \text{شدت یک بعدی (فراوانی طولی) درزه‌ها}$$

$$P_{21} = \text{شدت دو بعدی (فراوانی سطحی) درزه‌ها}$$

$$P_{32} = \text{شدت حجمی درزه‌ها}$$

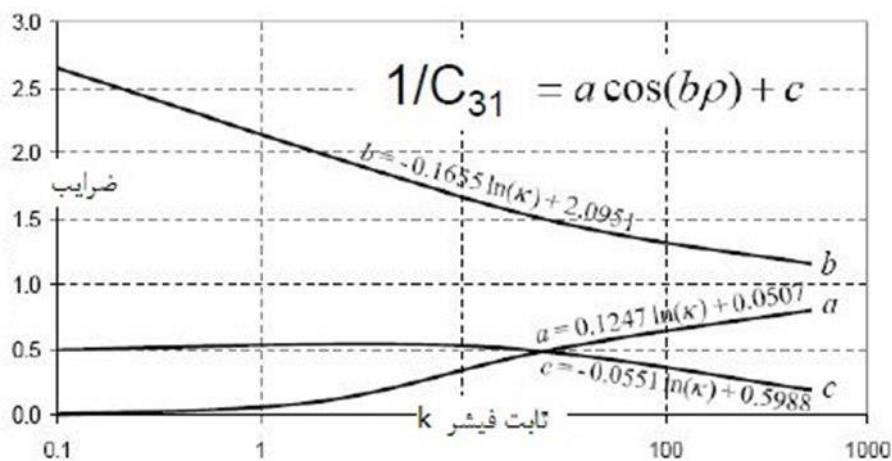
با توجه به رابطه (۴-۴) در شرایط ناهمسانگرد، با در دست داشتن ثوابت فیشر (K) هر دسته درزه و زاویه‌ی بین بردار نرمال قطب میانگین هر دسته درزه و بردار نرمال خط برداشت (ρ)، می‌توان ضریب تبدیل فراوانی طولی به شدت حجمی را بدست آورد. با بدست آوردن C_{13} از طریق ثوابت a, b, c با استفاده از شکل ۴-۱۰ و روابط مربوط در شکل ۴-۱۱، می‌توان شدت حجمی (P_{32}) را محاسبه نمود [Wang,2005].

$$P_{32} = P_{10} \cdot C_{13} \quad ۴-۴$$

$$\frac{1}{C_{13}} = a \cos(bp) + c$$

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

شکل ۴-۱۰ ضریب $\frac{1}{C_{13}}$ در مقابل ثابت فیشر K و زاویه ρ [Wang,2005]



شکل ۴-۱۱ ثوابت a, b, c جهت محاسبه ضریب C_{13} [Wang,2005]

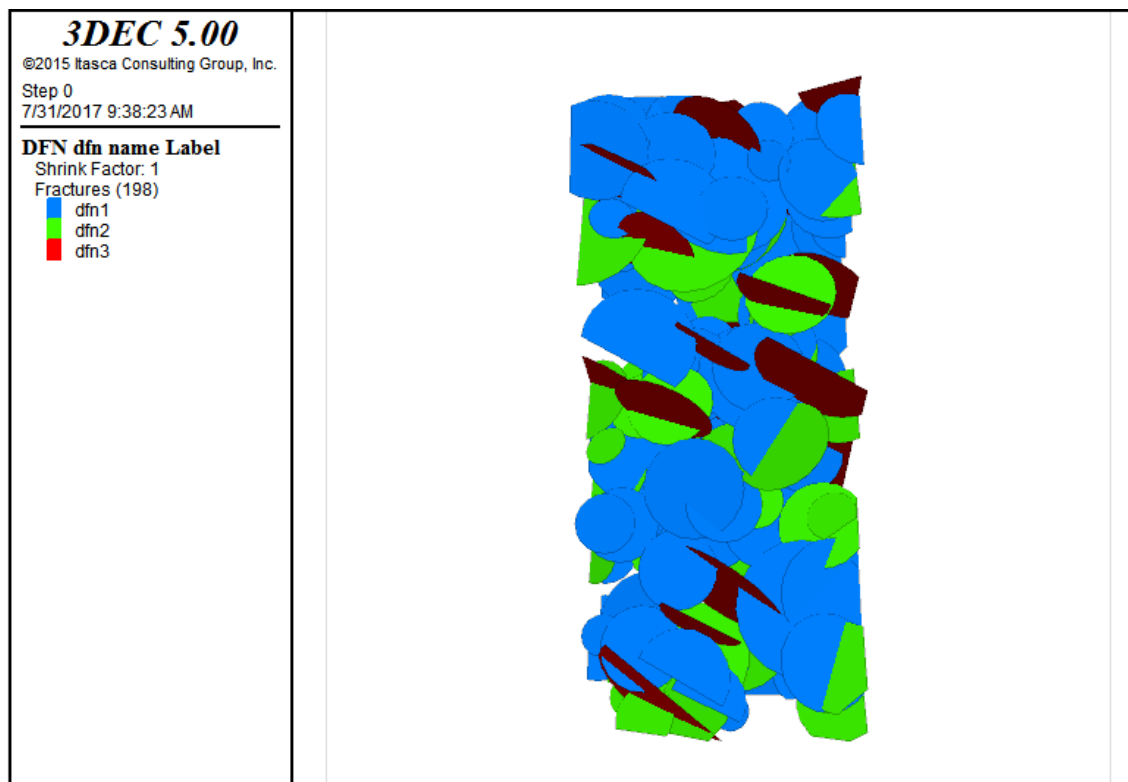
نتایج فراوانی و شدت حجمی هر یک از دسته درزه‌ها در جدول ۴-۷ آورده شده است:

جدول ۴-۷ نتایج فراوانی طولی و شدت حجمی دسته درزه‌ها

شدت حجمی $\left(\frac{m^2}{m^3}\right)$	فراوانی (m^{-1})	دسته درزه
۰/۹۳	۰/۳	۱
۰/۳۱	۰/۱۸	۲
۰/۵۳	۰/۳۹	۳

۴-۵ تولید شبکه شکستگی‌های مجزا ساختگاه سد تنگاب با استفاده از کد 3DEC

هندسه‌ی شبکه‌ی شکستگی توده سنگ در محل ساختگاه با توجه به پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده و مقادیر توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر، باز شدگی و جهت‌داری ساختگاه مورد نظر به عنوان ورودی مدل عددی با استفاده از نسخه‌ی ۵ نرم‌افزار 3DEC که قابلیت ساخت شبکه شکستگی مجزای (DFN) توده سنگ را دارد، تولید شده است. شکل ۴-۱۲ شبکه شکستگی مجزای تولید شده را به تفکیک دسته درزه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ شبکه شکستگی مجزا به تفکیک دسته درزه‌ها

۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به بررسی اجمالی ساختگاه سد تنگاب و شرایط زمین شناسی پرداخته شد. روش شبیه‌سازی شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) به صورت تئوری مورد بحث قرار گرفت. سپس به اطلاعات حاصل از برداشت‌های سطحی به منظور تهیه داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها شامل تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌داری، بازشدگی و طول خط اثر در محل ساختگاه پرداخته شد و توسط نرم‌افزارهای DIPS و EASY-FIT تحلیل گردید. سپس در مرحله بعد توابع توزیع آماری حاکم بر ناپیوستگی‌های برداشته شده اعم از بازشدگی و طول خط اثر و همچنین فراوانی خطی و شدت حجمی محاسبه شد و در نهایت با استفاده از داده‌های بدست آمده شبکه شکستگی مجزای ساختگاه سد تنگاب ساخته شد.

فصل پنجم

مدل سازی عددی

۵-۱ مقدمه

امروزه روش‌های عددی به عنوان ابزار قدرتمندی برای حل مسائل مختلف نظیر مسائل مکانیک جامدات، جریان و نظایر آن استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزایای روش‌های عددی ارائه‌ی پاسخ دقیق و قابل اطمینان در مدت زمان نسبتاً کم و نیز در برداشتن هزینه‌های کم نسبت به روش‌های آزمایشگاهی است. با استفاده از روش‌های عددی مختلفی که به منظور مدل‌سازی رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ گسترش یافته‌اند، می‌توان بسیاری از فرضیات ساده‌کننده‌ای که در روش‌های تحلیلی به کار برده شده است را تعدیل نمود و نتایج به دست آمده را تا حد زیادی به واقعیت نزدیک کرد. در این فصل ابتدا نحوه مدل‌سازی جریان سیال در شبکه شکستگی مجزا با استفاده از نرم‌افزار 3DEC مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس تخمین ماتریس تانسور نفوذپذیری بحث می‌شود و در نهایت به مدل‌سازی عملیات تزریق پرداخته می‌شود.

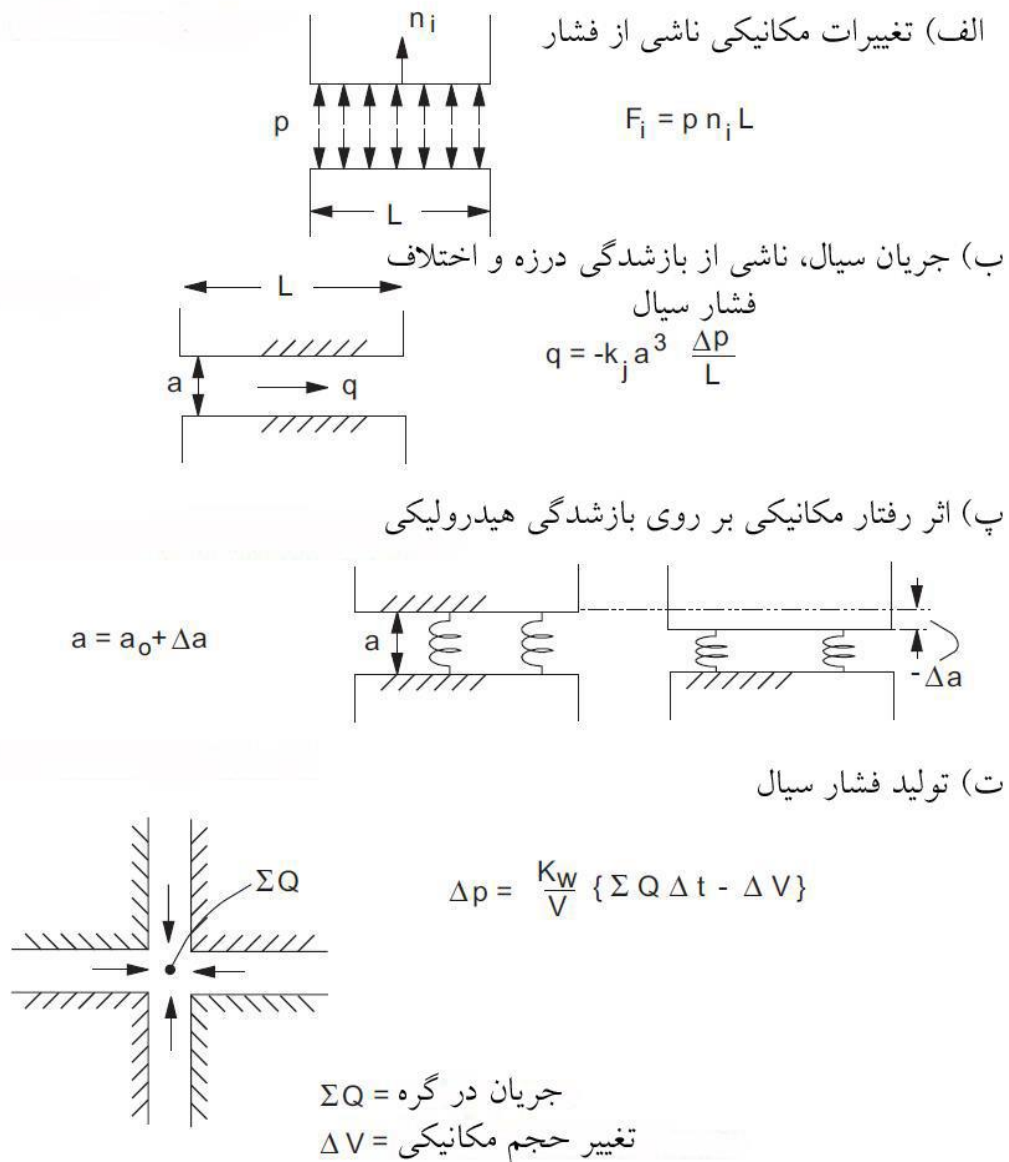
۵-۲ کد 3DEC

نرم‌افزار 3DEC یک برنامه تحلیل عددی سه بعدی بر مبنای روش المان مجزا است که برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته سنگی تهیه شده است. در روش المان مجزا یک توده سنگ به صورت مجموعه‌هایی از بلوک‌های مجزا و درزه‌ها به عنوان فصل مشترک بین دو جسم جدا تعریف می‌شوند. روش المان مجزا اولین بار توسط کندال^۱ در سال ۱۹۷۱ فرمول‌بندی و گسترش یافت و در سال‌های بعد از آن توسط این محقق و توسط افراد دیگر مورد پیشرفت و تکامل بیشتری قرار گرفت. در سال ۱۹۸۰ برنامه‌ی کامپیوتری تحت عنوان 3DEC به منظور حل معادلات سه‌بعدی بکار رفته برای بررسی رفتار بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر و صلب و ناپیوستگی‌های بین آن‌ها، توسط کندل و لیموس ابداع گردید که به این ترتیب گام بسیار مهمی در زمینه‌ی استفاده از امکانات کامپیوتری در بررسی محیط‌های پیوسته برداشته شد.

¹ Cundall

۵-۲-۱ جریان سیال در درزه‌ها در نرم‌افزار 3DEC

3DEC توانایی انجام تحلیل جریان سیال در شکاف‌های سیستمی از بلوک‌های نفوذپذیر را دارد. تحلیل کاملاً توأمان هیدرو مکانیکی انجام می‌پذیرد که در آن، قابلیت هدایت هیدرولیکی شکاف به تغییر شکل مکانیکی وابسته است و در نقطه مقابل آن، فشار آب درزه‌ها بر محاسبات مکانیکی تأثیر می‌گذارد. این تأثیرات در شکل ۵-۱ جمع‌آوری شده است [Itasca, 2013].



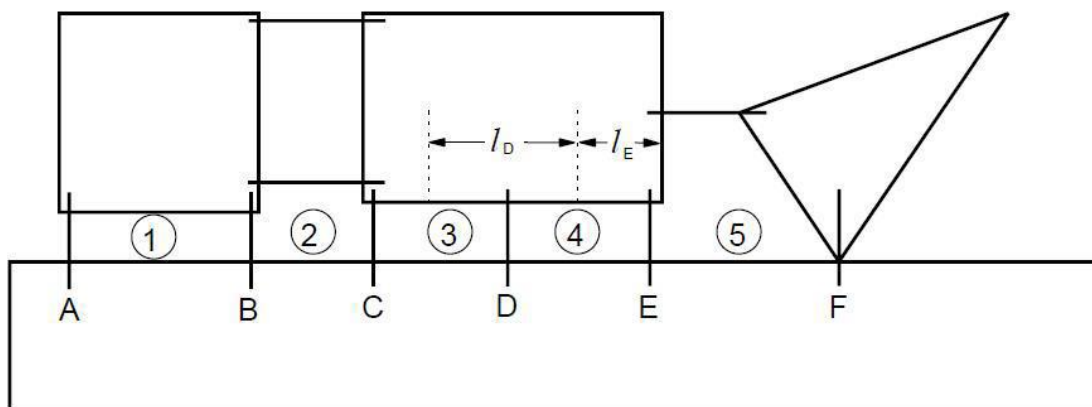
شکل ۵-۱ فعل انفعالات بین سیال و سنگ در ناپیوستگی [Itasca, 2013]

جریان در محیط بسته و جریان با سطح آزاد می‌توانند در 3DEC مدل‌سازی شوند. الگوریتم پایه برای تحلیل جریان ناپایدار نوشته شد، اما برنامه‌ی راه‌حل بهینه برای مسائل با جریان پایدار توسعه داده شد. الگوریتم آزمایشی نیز برای جریان ناپایدار در دسترس است که در آن سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. این فرمول نویسی سرعت محاسبات را برای تحلیل ناپایدار بسیار بالا برده است، اما شرایط سیال را محدود می‌کند. سه روش محاسباتی جریان در این قسمت توضیح داده می‌شوند [Itasca, 2013].

۵-۲-۲ الگوریتم پایه برای جریان سیال در نرم‌افزار 3DEC

حل عددی جریان برای سیال مستلزم استفاده از ساختارهای دامنه‌ای است (شکل ۵-۲). برای یک سیستم تقریباً بسته که در آن شبکه‌ای از دامنه‌ها وجود دارد، فرض گرفته می‌شود که هر یک از آن‌ها با سیالی در فشار ثابت پر شده‌اند و در محل تماس، با دامنه‌های مجاور ارتباط دارند. طبق شکل ۵-۳، دامنه‌ها از ۱ تا ۵ شماری گذاری شده‌اند. دامنه‌های ۳، ۴ و ۱ نشان‌دهنده‌ی درزه‌ها هستند، دامنه ۲ در تقاطع دو درزه واقع شده است و دامنه ۵ فضای خالی است. دامنه‌ها با نقاط تماس جدا می‌شوند که با حروف A تا F در شکل مشخص شده‌اند که نیروهای کنش و واکنش مکانیکی بین بلوک‌ها در آن‌ها اعمال می‌شود. به جهت اینکه بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر با المان‌های مثلثی مش‌بندی می‌شوند، نه تنها رئوس بلوک، نقاط تقاطع شبکه هستند بلکه در طول اضلاع هم وجود دارند. به هر محلی که نقطه‌ی تقاطع شبکه با ضلع یا نقطه‌ی تقاطع شبکه بلوک دیگر تماس پیدا کند، نقطه‌ی تقاطع می‌گویند. به‌عنوان مثال در همین شکل، نقطه تماس D نشان‌دهنده‌ی وجود نقطه تقاطع شبکه در طول یکی از اضلاع در تماس است. به عنوان نتیجه می‌توان گفت که درزه‌ی بین دو بلوک با دو دامنه‌ی نشان داده شده است: در نتیجه، درجه خلوص شبیه‌سازی عددی شبکه سیال به گسستگی مکانیکی بکار رفته

مربوط است و می‌تواند توسط فرد تعریف شود. [Itasca, 2013]



A ... F ... نقاط تماس

① ... ⑤ ... دامنه ها

شکل ۲-۵ جریان در درزه‌ها همانند بین دامنه‌ها مدل می‌شود [Itasca, 2013]

در نبود نیروی جاذبه، فشار سیال در هر یک از دامنه‌ها یکنواخت فرض می‌شود. برای مسائلی که همراه با نیروی جاذبه هستند، فشار بر اساس گرادیان هیدرو استاتیک، به صورت متغیر خطی فرض گرفته می‌شود و فشار دامنه‌ایی به صورت مقدار آن در مرکز دامنه تعریف می‌شود [Itasca, 2013].

جریان با دیفرانسیل فشار بین دامنه‌های همجوار کنترل می‌شود. نرخ جریان بسته به نوع نقطه‌ی تماس به دو صورت متفاوت محاسبه می‌شود. برای تماس نقطه‌ای (به‌عنوان مثال، گوشه - ضلع همانند تماس F در شکل ۲-۵ یا گوشه - گوشه)، نرخ جریان از دامنه با فشار P_1 به دامنه با فشار P_2 به این صورت به دست می‌آید [Itasca, 2013].

$$q = -k_c \Delta p \quad ۱-۵$$

که در آن:

$k_c = a$ که فاکتور نفوذپذیری نقطه‌ای است و

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad ۲-۵$$

که در آن:

ρ_w = چگالی سیال

g = شتاب ثقل (فرض گرفته شده است که در جهت منفی y اعمال می‌شود)

y_1 و y_2 = مختصات y مراکز دامنه‌ها هستند

در حالت تماس ضلع-ضلع، طول تماس می‌تواند تعریف شود (به عنوان مثال، در شکل ۲-۵، L_E و L_D به ترتیب نشان‌دهنده‌ی طول تماس‌های E و D می‌باشند). این طول به صورت نصف فاصله از سمت چپ تا نزدیک‌ترین نقطه تماس به اضافه‌ی نصف فاصله از سمت راست تا نزدیک‌ترین نقطه تماس تعریف می‌شود. در این حالت، از قانون توان سوم برای جریان در شکاف صفحه‌ای (به عنوان مثال ویترسپون و همکاران)، می‌توان استفاده کرد. سپس نرخ جریان به صورت رابطه‌ی (۳-۵) محاسبه می‌شود:

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad 3-5$$

که در آن:

k_j = ضریب نفوذپذیری درزه (که مقدار تئوریک آن $1/12 \mu$ است)

μ = ویسکوزیته دینامیک سیال

a = بازشدگی هیدرولیکی تماس

l = طول اختصاص داده شده به تماس بین دامنه‌ها

در 3DEC کاربر می‌تواند ضریب نفوذپذیری و توان در رابطه‌ی ۳-۵ را تغییر دهد عبارت بالا می‌تواند برای تماس نقطه‌ای استفاده شود به شرطی کمترین طول به این تماس‌ها اختصاص یابد [Itasca, 2013]. در هر یک از پله‌های زمانی محاسبه‌ی مکانیکی در 3DEC، محاسبات هندسه‌ی بروز شده‌ی سیستم را تعیین می‌کند، در نتیجه مقادیر جدید بازشدگی برای تمامی تماس‌ها و حجم تمامی دامنه‌ها به دست می‌آیند. نرخ جریان در تماس‌ها می‌تواند با فرمول‌های بالا محاسبه شود. سپس فشار دامنه‌ها با توجه به جریان خالص ورودی به دامنه و تغییرات امکان‌پذیر حجم دامنه در اثر افزایش تدریجی حرکت بلوک‌های فراگیر، بروز می‌شوند. فشار جدید به دست آمده‌ی دامنه عبارت است از [Itasca, 2013]:

$$p = p_0 + k_w Q \frac{\Delta t}{V} - k_w \frac{\Delta V}{V_m} \quad 4-5$$

که در آن:

p_0 = فشار دامنه در پله زمانی قبلی

Q = مجموع نرخهای جریان ورودی از تمامی تماسهای اطراف به دامنه

k_w = مدول بالک سیال

$$\Delta V = V - V_0 \text{ و}$$

$$V_m = (V + V_0) / 2$$

که در آن V و V_0 به ترتیب، مساحت‌های جدید و قدیم دامنه هستند.

در مدل‌سازی به هر تماس یک بازشدگی هیدرولیکی اختصاص داده می‌شود که با جابجایی عمودی تغییر کرده و به صورت رابطه ۵-۵ تعریف می‌شود:

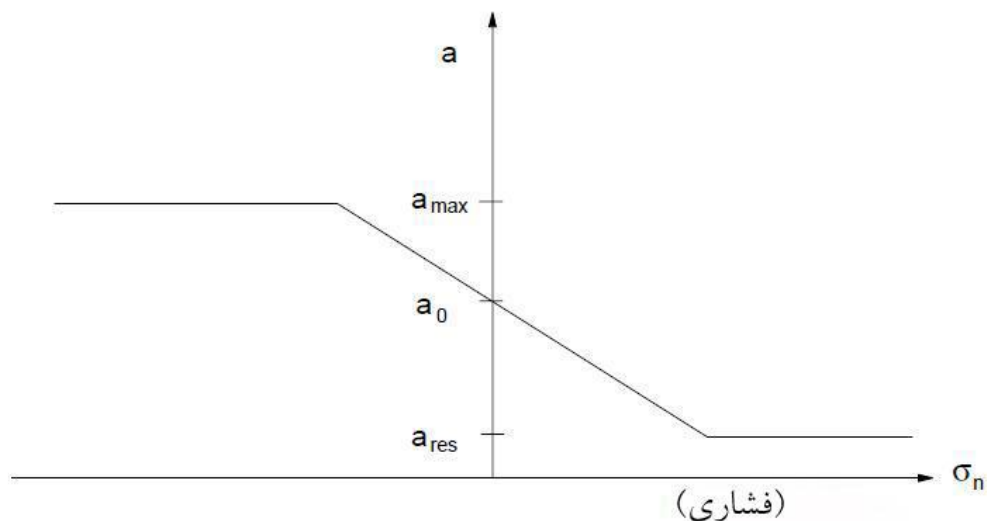
$$a = a_0 + u_n \quad \text{۵-۵}$$

که در آن :

$a_0 =$ بازشدگی درزه در تنش عمودی صفر

$u_n =$ جابجایی عمودی درزه (مقدار مثبت نشان‌دهنده‌ی بازشدگی است)

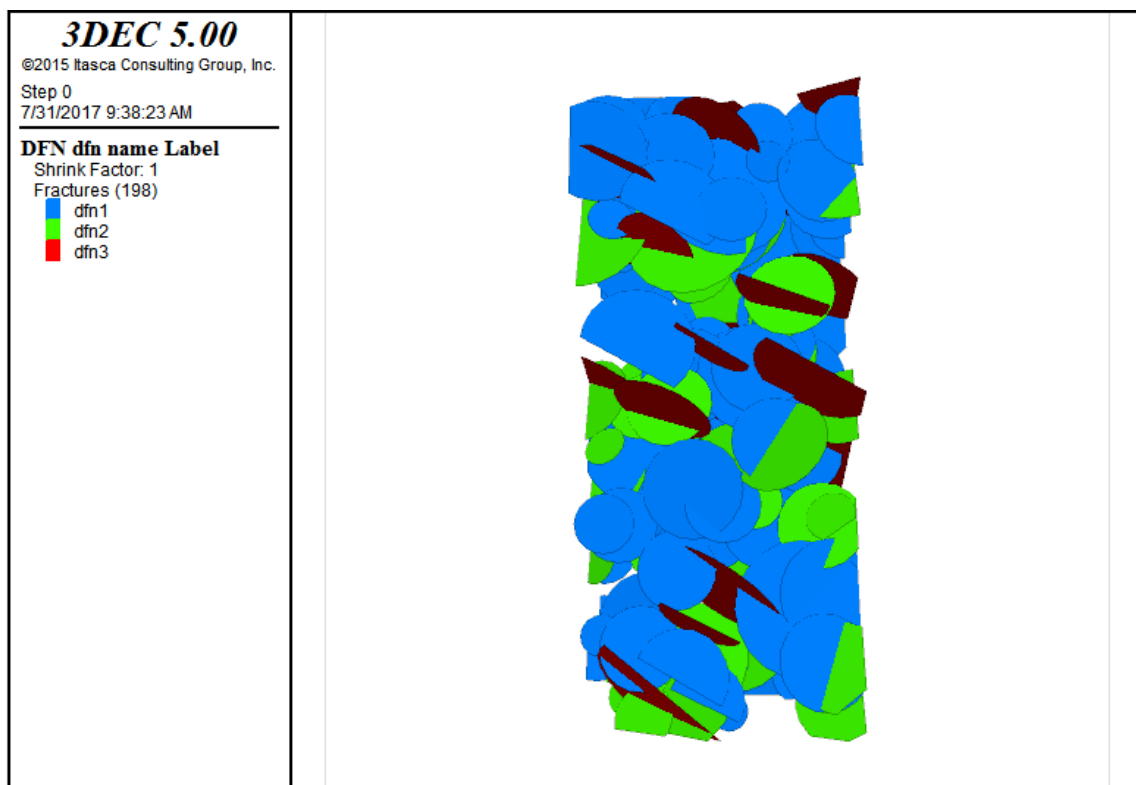
کمترین مقدار a_{res} ، برای بازشدگی در نظر گرفته می‌شود، که کمتر از آن بسته‌شدگی مکانیکی بر نفوذپذیری نقطه‌ی تماس تأثیر نمی‌گذارد. بیشترین مقدار a_{max} ، نیز برای راندمان در محاسبات مستقیم، فرض گرفته می‌شود (به طور قراردادی ۵ برابر a_{res} در نظر گرفته می‌شود، اما می‌تواند توسط کاربر تغییر کند). تغییر بازشدگی با اعمال تنش عمودی روی درزه در شکل ۵-۳ آمده است [Itasca,2013].



شکل ۵-۳ ارتباط بین بازشدگی هیدرولیکی، a و تنش نرمال درزه، σ_n در *3DEC* [Itasca,2013].

۳-۵ هندسه مدل عددی توده سنگ درزه دار

همان طور که در فصل قبل به تفصیل بحث شد، هندسه‌ی شبکه شکستگی توده سنگ در محل ساختگاه با توجه به پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده و پارامترهای توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر، بازشدگی و جهت‌داری به عنوان ورودی مدل عددی با استفاده از نسخه‌ی آخر نرم‌افزار 3DEC که قابلیت ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزای توده سنگ را دارد، تولید شد و نمایی از مدل DFN ساخته شده در ابعاد $11 \times 11 \times 25$ متر مکعب در شکل ۴-۵ ارائه شده است.



شکل ۴-۵ شبکه شکستگی مجزای مدل عددی تولید شده

۱-۳-۵ تخصیص پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی درزه‌ها و سیال به مدل عددی

سختی نرمال، سختی برشی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سطح درزه‌ها به عنوان خواص مکانیکی درزه‌های توده سنگ در مدل‌ها لحاظ می‌شوند. اگر زاویه اتساع درزه صفر قرار داده شود یعنی سطح درزه‌ها صاف در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر عددی مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک

داخلی، چسبندگی سطح درزه‌ها و مدول الاستیسیته‌ی ماده سنگ در آزمایشگاه و توسط مهندسین مشاور آب نیرو تعیین شده‌اند. مقادیر سختی برشی و سختی نرمال توسط روابط ۶-۵ و ۷-۵ محاسبه شده‌اند.

$$k_n = \frac{E_m E_r}{S(E_r - E_m)} \quad 6-5$$

$$k_s = \frac{G_m G_r}{S(G_r - G_m)} \quad 7-5$$

که در آن:

E_r = مدول الاستیسیته سنگ بکر

S = فاصله‌داری ناپیوستگی‌های توده سنگ

E_m = تغییر شکل‌پذیری توده سنگ

G_r = مدول برشی سنگ بکر

G_m = مدول برشی توده سنگ

جدول ۱-۵ خواص مکانیکی درزه‌ها در مدل عددی [مهندسین مشاور آب نیرو]

چسبندگی (Mpa)	زاویه اصطکاک (درجه)	زاویه اتساع (درجه)	سختی برشی (Gpa/m)	سختی نرمال (Gpa/m)	دسته درزه
۰/۰۷۱	۳۶	۲	۱/۵	۷/۱۲	۱
۰/۰۵۸	۳۶	۲	۱/۷	۷/۲	۲
۰/۰۶۹	۳۶	۲	۰/۸	۵	۳

در ادامه خصوصیات مورد نیاز سیال (آب) مانند مدول بالک، ویسکوزیته و دانسیته که مقادیر آن‌ها در جدول ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۲-۵ خصوصیات آب تخصیص یافته به مدل عددی [Itasca,2013]

مدول بالک (Gpa)	ویسکوزیته (Pa.s)	دانسیته (kg/m ²)
۲	۰/۰۰۱	۱۰۰۰

۵-۳-۲ اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل

سنگ‌ها در عمق تحت تأثیر تنش‌های ناشی از وزن طبقات بالایی قرار می‌گیرند. اطلاع از بزرگی و جهت این تنش‌های برجا در زمان طراحی حفاریات زیرزمینی بسیار حایز اهمیت است. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تأثیر تنش‌های برجای موجود در زمین در مدل لحاظ گردد.

در حالت ایده‌آل اطلاعات در مورد این گونه تنش‌ها از اندازه‌گیری سر زمین به دست می‌آید، ولی وقتی اندازه‌گیری سر زمین مقدور نیست می‌توان با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین تنش‌ها را برآورد کرد. تنش قائم از رابطه ۵-۸ تعیین می‌شود.

$$\sigma_v = \gamma z \quad ۵-۸$$

که در آن:

$$\sigma_v = \text{تنش عمودی (Pa)}$$

$$\gamma = \text{وزن مخصوص طبقات بالایی (N/m}^2\text{)}$$

$$z = \text{عمق از سطح زمین (m)}$$

روند تخمین تنش‌های افقی^۱ در سنگ بسیار بسیار مشکل‌تر از تنش عمودی است. در حالت طبیعی میانگین تنش افقی وابسته به تنش عمودی است و با ضریب k (نسبت تنش افقی به تنش عمودی) به صورت رابطه ۵-۹ بیان می‌شود. همچنین برای تعیین مقدار k روابطی پیشنهاد شده که در جدول ۵-۳ بیان شده است [Still & Palmstrom, 2008].

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \quad ۵-۹$$

در تعیین مقدار k ، با توجه به عمق مدل مورد بررسی و در نظر گرفتن اعتبار روابط، سه رابطه‌ی شئوری^۲، ۲۰۰۱، هوک و براوان^۳، ۱۹۸۰ و رومل^۴، ۲۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر به دست آمده برای k توسط هر کدام از سه رابطه‌های ذکر شده، به ترتیب برابر با ۱/۶۸، ۱/۳، ۲ به دست آمده که این مقادیر نسبت به مقادیر به دست آمده برای k توسط روابط دیگر ارائه شده در جدول ۵-۶ تطابق قابل ملاحظه‌ای باهم دارند.

¹ Horizontal Stress

² Sheory

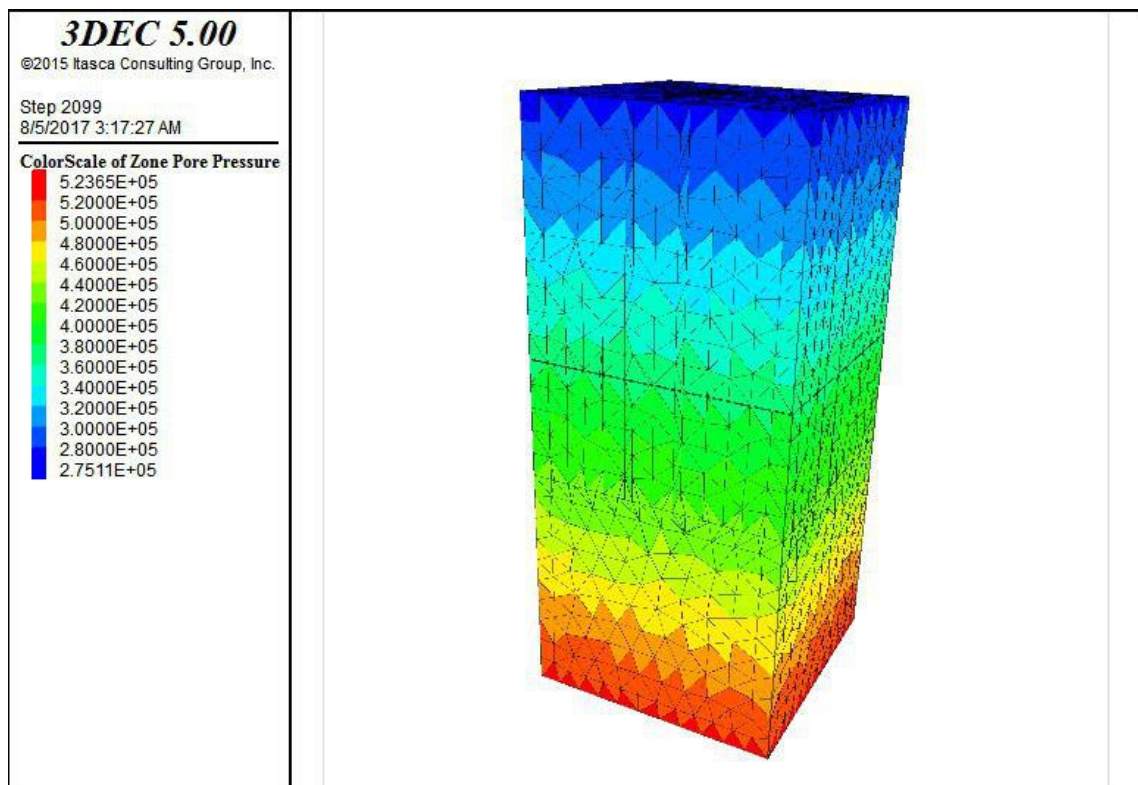
³ Hoek and Brown

⁴ Rummel

جدول ۵-۶ روابط تجربی برای تعیین مقدار k [Hudson,2005]

مرجع	محل و محدوده عمق (متر)	رابطه تجربی (K)
هوک و براون (۱۹۸۰)	گستره جهانی ۰ تا ۳۰۰۰	$0.3 + 100/z < k < 0.5 + 1500/z$
ون هیردن (۱۹۷۶)	آفریقای جنوبی ۰ تا ۲۵۰۰	$K = 0.448 + (248/z)$
لی (۱۹۸۶)	چین ۰ تا ۵۰۰	$0.3 + 100/z < K < 0.5 + 440/z$
رومل (۱۹۸۶)	گستره جهانی ۵۰۰ تا ۳۰۰۰	$0.5 + 150/z < K < 0.98 + 250/z$
هرگت (۱۹۸۷)	کانادا ۰ تا ۲۰۰	$0.66 + 72/z < K < 1.3 + 110/z$
ترزاقی و ریچارت (۱۹۵۲)		$K = v / 1-v$
شنوری (۲۰۰۱)		$K = 0.33 + 9.5Eh (0.001 + 1/z)$

در نهایت مقدار k برابر با $1/68$ که به نوعی میانگین مقادیر ذکر شده است انتخاب و در مدل وارد شد. مدل‌ها به گونه‌ای با شرایط زمین معادل می‌شوند که در تخصیص فشار ناشی از روباره به مدل، هم ارتفاع روباره‌ی خشک و هم روباره‌ی اشباع لحاظ شوند. موقعیت مدل به دلیل اینکه تزریق از درون گالری انجام می‌شود نسبت به سطح زمین ۱۰۵ متر در عمق و ۲۷ متر زیر سطح ایستابی است که در شکل ۵-۵ فشار منفذی در بلوک را بعد از به تعادل رسیدن تحت اندرکنش هیدرو مکانیکی براساس هد فشار نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵ فشار منفذی براساس هد ناشی از سطح ایستایی

۴-۵ برآورد مولفه‌های تانسور نفوذپذیری

پیش از حل عددی جریان در شکستگی‌ها، برخی از فرضیات و معادلات حاکم بر انتقال سیال بررسی می‌شوند. یکی از فرضیات اساسی در این زمینه اشباع شدن شکستگی‌ها از سیال بوده و دیگری آرام بودن جریان سیال در شکستگی‌ها است. باید این نکته نیز مد نظر قرار گیرد که هر دو فرض مطرح شده با اندکی اغماض همواره در طبیعت برقرارند که نتیجه این فرضیات برقراری معادله دارسی در این شبکه‌ها است. این رابطه اساس تمامی روش‌های محاسبه‌ی جریان و نفوذپذیری است.

$$Q = A \frac{k\Delta p}{\mu L} \quad ۱۰-۵$$

که در آن:

Q = دبی یا نرخ سیال گذری در واحد زمان

A = سطح مقطع عبور سیال

k = تانسور نفوذپذیری

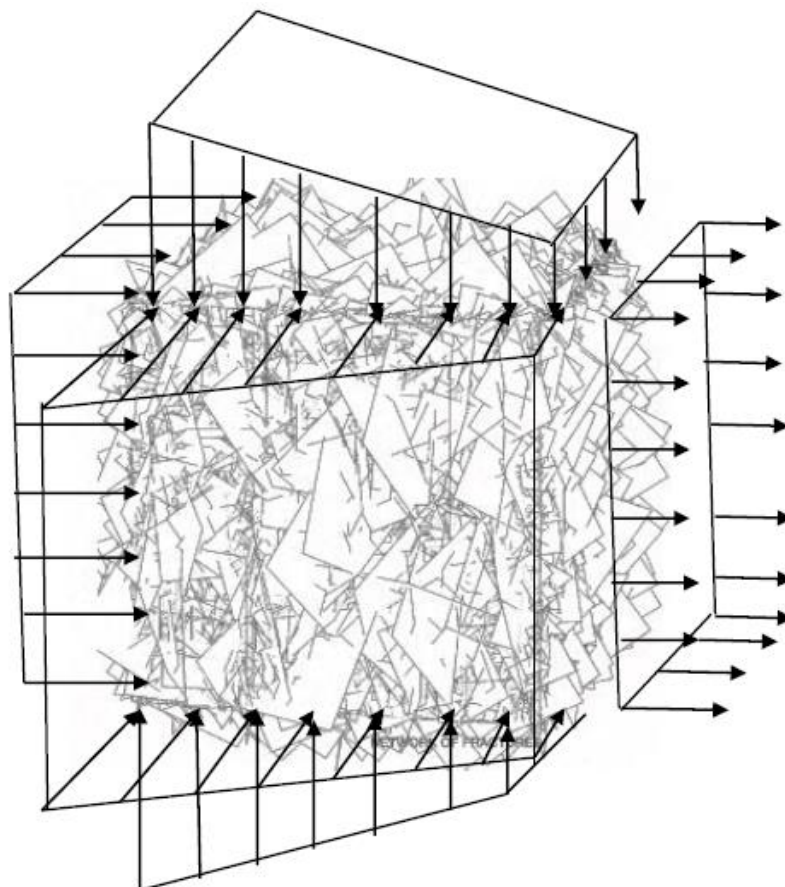
Δp = اختلاف فشار در مرزهای مدل

μ = ویسکوزیته دینامیکی سیال

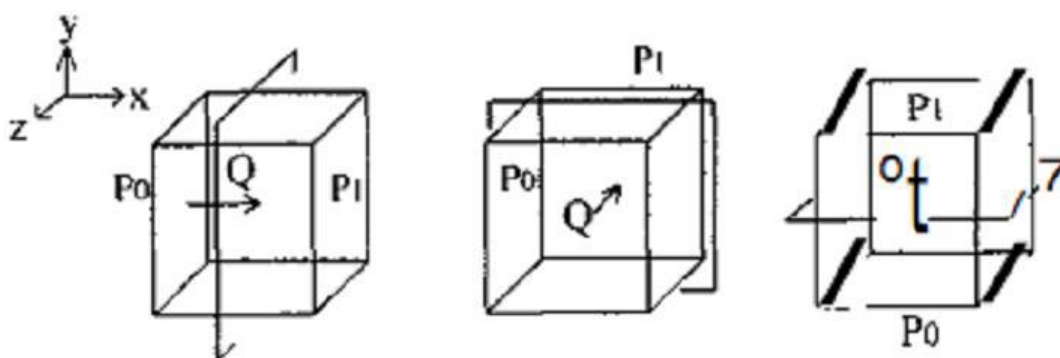
$L =$ مسافت طی شده توسط سیال

به طور کلی یک توده سنگ درزه دار پتانسیل بالایی در ایجاد ناهمسانگردی در بسیاری از خواص مکانیکی و هیدرولیکی دارد جریان در این محیط اغلب، گرایش به حرکت در جهت خاصی را از خود نشان می‌دهد که ناشی از وجود ناهمسانگردی در هدایت هیدرولیکی است. برای محاسبه نفوذپذیری ویرایش اخیر نرم‌افزار 3DEC، این قابلیت را دارد که جریان سیال عبوری از مدل یا به عبارتی نفوذپذیری و تراوایی مدل را به صورت بردارهای نرخ جریان، فشار منفذی و بازشدگی محاسبه و ارائه دهد. با توجه به این که اعتبارسنجی جریان سیال از مدل توسط داده‌های حاصل از آزمایش‌های لوژان برای اندازه‌گیری نفوذپذیری انجام می‌گیرد، در این پژوهش خروجی‌ها از نوع نرخ جریان مدنظر قرار می‌گیرد. به منظور محاسبه‌ی تانسور نفوذپذیری، در روند مدل‌سازی، جریان در جهت‌های مختلف اعمال می‌شود. در برخی پژوهش‌های انجام شده برای محاسبه‌ی نفوذپذیری، مدل‌ها با یک زاویه چرخش ثابت چرخانیده شده و تحت اعمال فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرند که این روش بیشتر در مدل‌سازی‌های دو بعدی به کار می‌رود. روش متداول در محاسبه تانسور نفوذپذیری مدل سه بعدی DFN، ثابت نگه داشتن مدل و اعمال فشار ناشی از روباره به مرزهای مدل است.

در تحلیل‌های هیدرولیکی فشار وارد بر مرزهای مدل توسط محاسبه فشار ناشی از روباره خشک و اشباع در نظر گرفته می‌شود. اعمال فشار ناشی از روباره بر مدل DFN به منظور محاسبه‌ی هر کدام از درایه‌های تانسور نفوذپذیری به ترتیب در جهت‌های xx ، xy ، xz ، yx ، yy ، yz ، zx و zy و zz صورت می‌گیرد. همان‌طور که از شکل ۵-۶ نیز مشخص شده‌است، برای برآورد نفوذپذیری معادل در هر جهت ابتدا باید فشار منفذی ثابت در دو سمت ابتدایی و انتهایی صفحه مورد نظر گرفته شود. به این ترتیب که در وجه ورودی فشار منفذی بیشتر و در وجه خروجی فشار منفذی کمتر باشد تا جریان سیال در صفحه مورد نظر به حرکت درآید. در وجوه دیگر نیز با توجه به جهت حرکت سیال گرادیان فشار منفذی متناظر اعمال می‌گردد، این کار برای سه صفحه به طور جداگانه مطابق شکل ۵-۷ در هر مرحله تحلیل برای محاسبه مولفه‌های تانسور ضروری است.



شکل ۵-۶ شرایط مرزی هیدرولیکی مدل عددی [Park.2002]

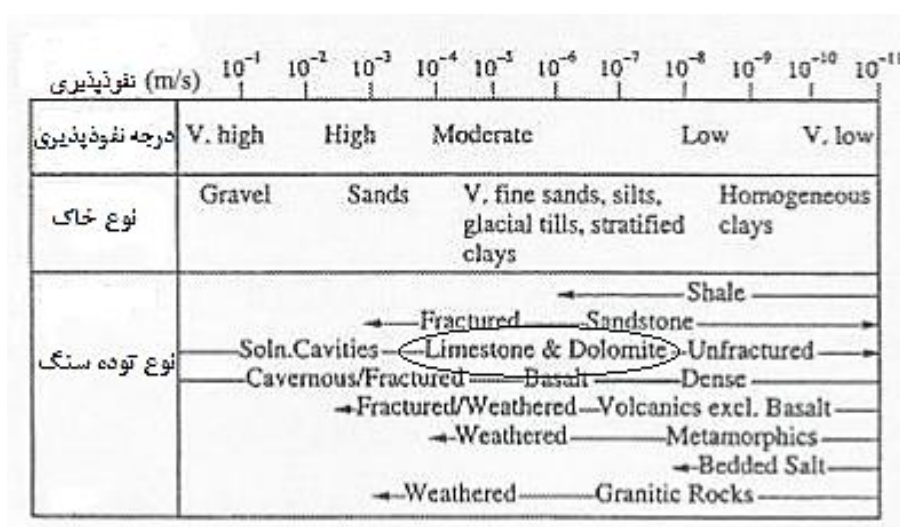


شکل ۵-۷ شرایط مرزی هیدرولیکی برای تخمین نفوذپذیری در مدل [Thoraval, 2003]

بدین ترتیب یک تانسور از نرخ جریان ارائه می‌شود که با کاربرد رابطه دارسی ماتریس تانسور نفوذپذیری نهایی به دست می‌آید. رابطه‌ی ۵-۱۱ ماتریس نفوذپذیری نهایی برای مدل را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.09e-7 & 4.09e-7 & 1.53e-6 \\ 7.64e-7 & 2.18e-6 & 3.64e-7 \\ 2.04e-6 & 7.27e-7 & 8.15e-6 \end{bmatrix} \left(\frac{m}{s}\right) \quad 11-5$$

به منظور اعتبار سنجی مقادیر تانسور نفوذپذیری به دست آمده به مقایسه مقادیر تیپیک نفوذپذیری توده سنگ های مختلف در شکل ۸-۵ پرداخته شده است. همان طور که از مقادیر شکل ۸-۵ پیداست، مقادیر محاسبه شده از تحلیل عددی در محدوده ی تغییرات نفوذپذیری توده سنگ آهک قرار می گیرد که با توده سنگ سد تنگاب همخوانی دارد.

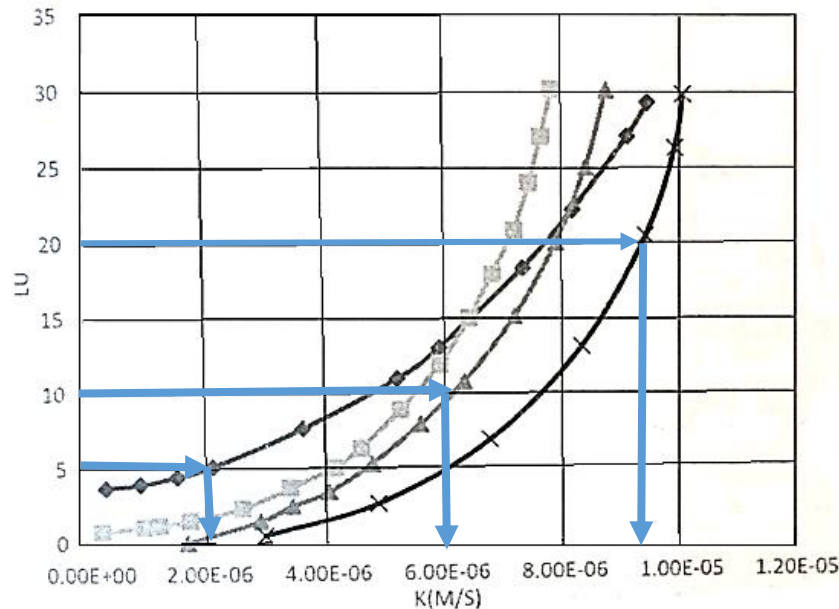


شکل ۸-۵ مقادیر تیپیک نفوذپذیری توده سنگ [Zhang, 2006]

۵-۴-۱ ارزیابی نتایج نفوذپذیری در مقایسه با نتایج مطالعات آزمایش لوژان در منطقه

تلاش های زیادی برای یافتن رابطه ای بین لوژان و نفوذپذیری (k) صورت گرفته است. نمودارهای شکل ۹-۵ به صورت خلاصه ای از روابط تجربی به دست آمده توسط محققان در پروژه های تحقیقاتی مختلف ارائه شده که همپوشانی قابل قبولی دارند و محدوده تغییرات نفوذپذیری محاسبه شده در یک عدد لوژان معین اندک است. این نمودارها در اکثر مطالعات مربوط به نفوذپذیری به عنوان مبنای معادل سازی عدد لوژان با مقادیر تانسور نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفته است. عدد لوژان مربوط به ساختگاه سد تنگاب در رده کم (۳ تا ۱۰) تا متوسط (۱۰ تا ۲۰) اندازه گیری شده است. همانطور که مشاهده می شود با معادل سازی محدوده اعداد لوژان ساختگاه سد به نفوذپذیری، تطابق قابل قبولی با مقادیر نفوذپذیری

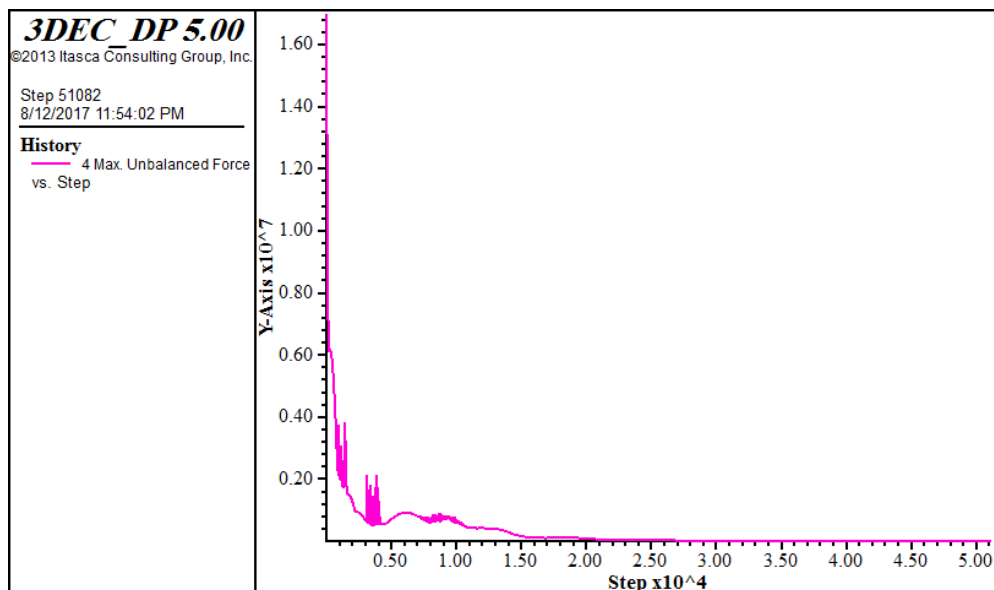
بدست آمده توسط مدل را دارد، بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است و می تواند به عنوان مبنای مطالعات بعدی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵-۹ رابطه بین لوژان و نفوذپذیری [کرد نظیری، ۱۳۹۰]

۵-۵ مراحل مدل سازی عددی عملیات تزریق

بعد از ساخت مدل، اعمال شرایط اولیه و مرزی و تعریف خصوصیات توده سنگ و ناپیوستگی ها وارد مراحل اجرای مدل شده. لازم به ذکر است که در مدل سازی با نرم افزار 3DEC تمام حفاریات باید قبل از شروع حل مساله به مدل اعمال شود. در غیر این صورت نتایج معتبر نخواهد بود [Itasca,2013]. بنابراین یک مدل به ابعاد $11 \times 11 \times 25$ ایجاد شد و قبل از حل مساله، سه عدد چال تزریق با قطر 76 mm طول 15 m و فاصله داری $1/5$ متر در سطح مدل وارد شد، که بعد از تعادل اولیه حفاری شده اند. قبل از حفاری چال های تزریق، لازم است تا تعادل اولیه مدل با محاسبات مکانیکی و با شرایط تنش برجا انجام شود در این مرحله تاریخچه نیروهای نامتعادل در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰ تاریخچه نیروهای نامتعادل بعد از رسیدن به شرایط تعادل اولیه

بعد از حفر چال‌های تزریق و وارد کردن مشخصات دوغاب که شامل چگالی، 1590 kg/m^3 ، ویسکوزیته، 0.12 Pa.s و مدول بالک سیال، 3 G Pa است [مهندسین مشاور آب نیرو]، با استفاده از زبان برنامه نویسی FISH در محیط کد نرم افزار 3DEC، تزریق به درون توده سنگ تحت اندر کنش هیدرومکانیکی به صورت اعمال فشار منفذی سیال بر اساس دانسیته سیال، ویسکوزیته و مدول بالک اجرا شده است، که در این تحقیق فرایند عملیات تزریق درون توده سنگ طبق رویه زیر اجرا شده است:

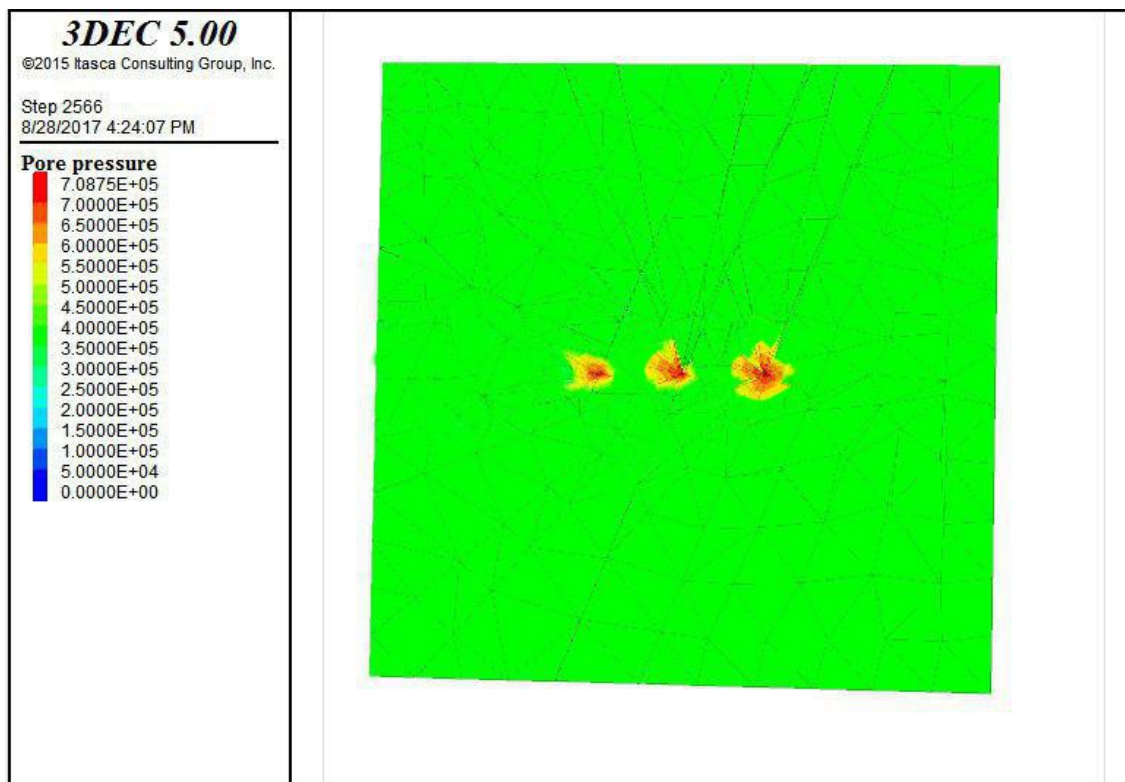
- با توجه به این که در عملیات تزریق همانطور که در بخش‌های قبل بحث شد روش‌های مختلفی وجود دارد بنابراین در این تحقیق فقط ۵ متر انتهایی چال تزریق انجام شده است.
- فشار تزریق عبارت است از میزان فشار هیدرواستاتیکی سیال دوغاب زمانی که به درون درزه‌ها و ناپیوستگی‌های توده سنگ نفوذ می‌کند. حداکثر میزان قابل قبول این فشار به عنوان فشار مجاز معرفی می‌شود بصورتیکه فشار اعمالی به دوغاب حین تزریق، همواره باید از فشار مجاز کمتر باشد. تعیین دقیق این پارامتر معمولاً به صورت تجربی است [کربلا، ۱۳۸۸]. در این تحقیق با توجه به توضیحاتی که در رابطه با فشار تزریق در بخش‌های قبل داده شد تنها روبراه را به عنوان عامل اصلی در تعیین فشار قرار داده شده است. بنابراین نظر به این که گالری تزریق در ساختگاه سد تنگاب در عمق ۱۰۵ متری است و در این تحقیق تزریق در ۵ متر انتهایی چال

تزریق انجام می‌شود فشار روباره تا عمق مورد تزریق با مقدار دانسیته $2630 \frac{kg}{m^3}$ توده سنگ ساختگاه حدود $30/2 \text{ bar}$ می‌باشد که فشار تزریق از این فشار روباره نباید بیشتر شود.

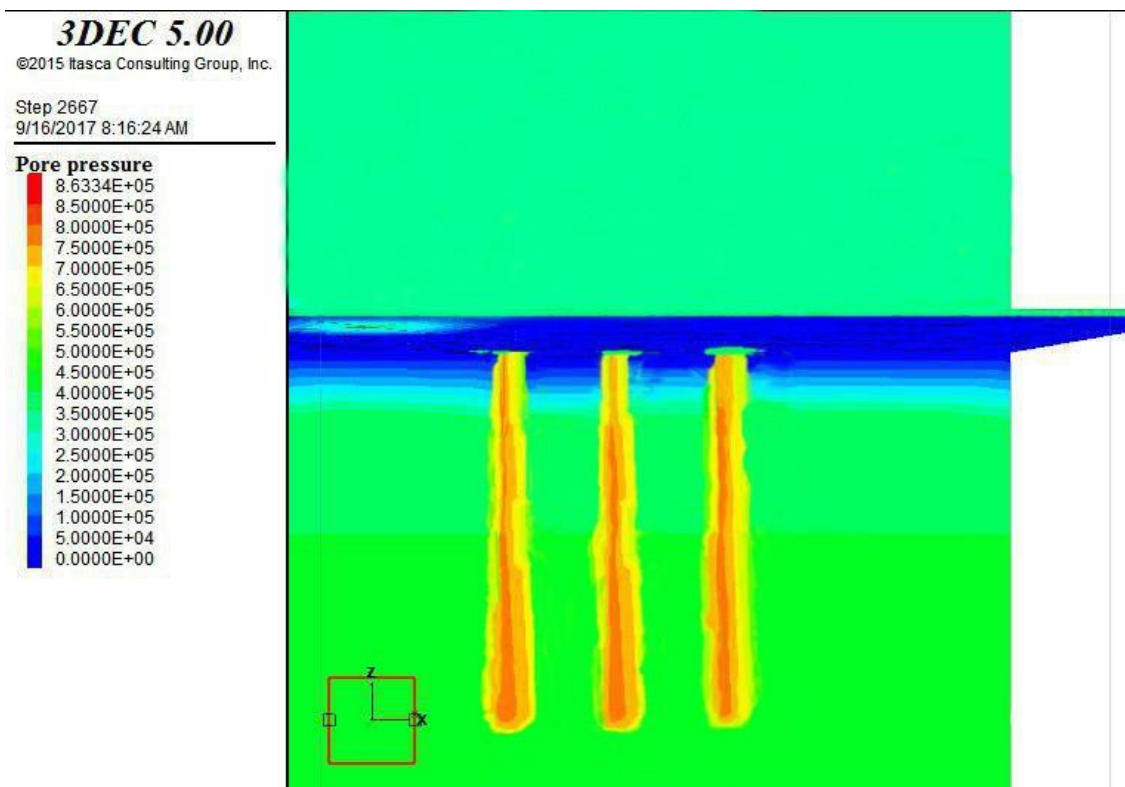
• از خصوصیات مهم دوغاب نسبت آب به سیمان است. در این تحقیق نظر به این که تزریق برای جلوگیری از فرار آب در ساختگاه سد است بنابراین با توجه به توضیحاتی که در بخش‌های قبل در مورد نسبت آب به سیمان داده شد که حاصل تجربیات عملی بسیار زیادی در تزریق است امروزه تمایل به سمت استفاده از دوغاب‌های با حداقل محتوی آب است، بنابراین در این تحقیق مقدار نسبت آب به سیمان $0/7$ است.

هدف در این مدل‌سازی بدست‌آوردن میزان انتشار مواد تزریق شده است که دو چال تزریق مجاور هم‌دیگر را هم‌پوشانی کنند تا آب‌بندی محقق شود بنابراین در این مدل سه چال با فاصله‌داری $1/5$ متر از یکدیگر حفاری شدند، فشار تزریق با استفاده از کد نویسی Fish که زبان مربوط به خود نرم‌افزار است مرحله به مرحله افزایش داده شده است که از فشار $7/5 \text{ bar}$ آغاز شده و با مدت زمان 5 دقیقه تزریق برای هر مرحله، $2/5$ بار به فشار تزریق اضافه شده است و این روند تا فشار 25 bar ادامه پیدا کرده است که میزان انتشار را در هر مرحله مورد بررسی قرار داده شده است.

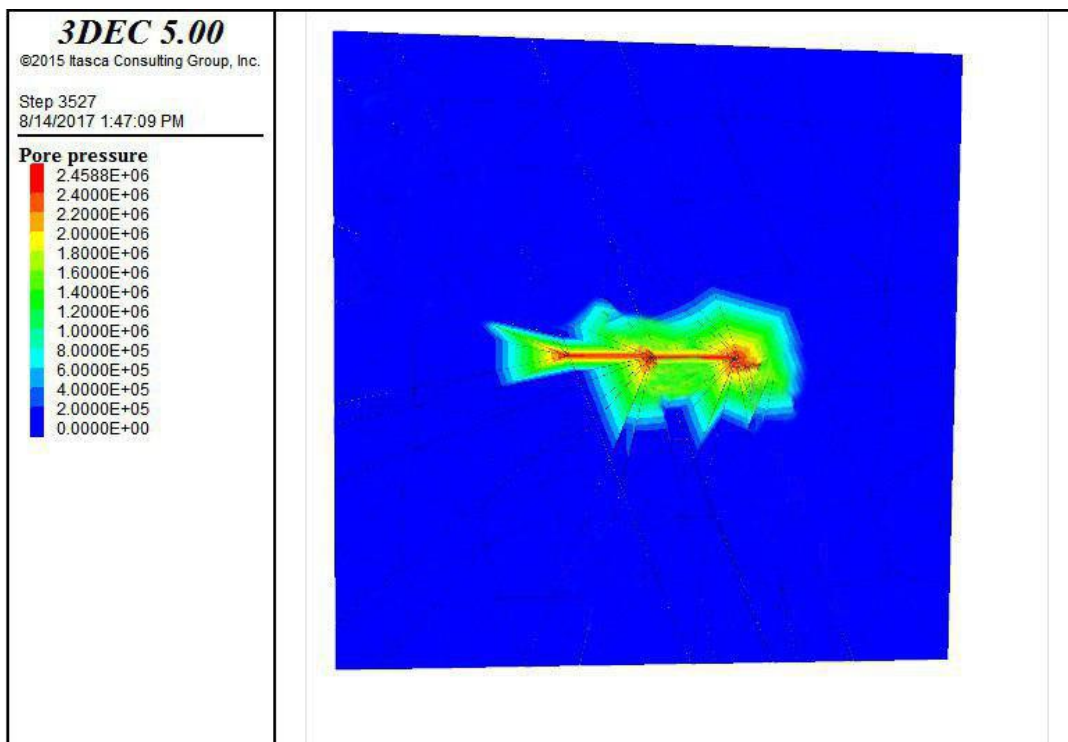
همانطور که از شکل‌های $5-11$ و $5-12$ مشخص است در فشار $7/5$ بار میزان انتشار دوغاب تزریق شده کم است و هم‌پوشانی انجام نشده است و این روند افزایش فشار ادامه پیدا کرد تا مناسب‌ترین انتشار در فشار 25 بار بدست آمده شد و به همان صورت که از شکل‌های $5-13$ و $5-14$ مشخص است در این فشار انتشار مناسبی از تزریق مشاهده می‌شود که دو چال مجاور هم‌دیگر را هم‌پوشانی کرده‌اند. این مقدار فشار در مقایسه با فشار روباره کمتر است بنابراین در این فشار تزریق مجاز است.



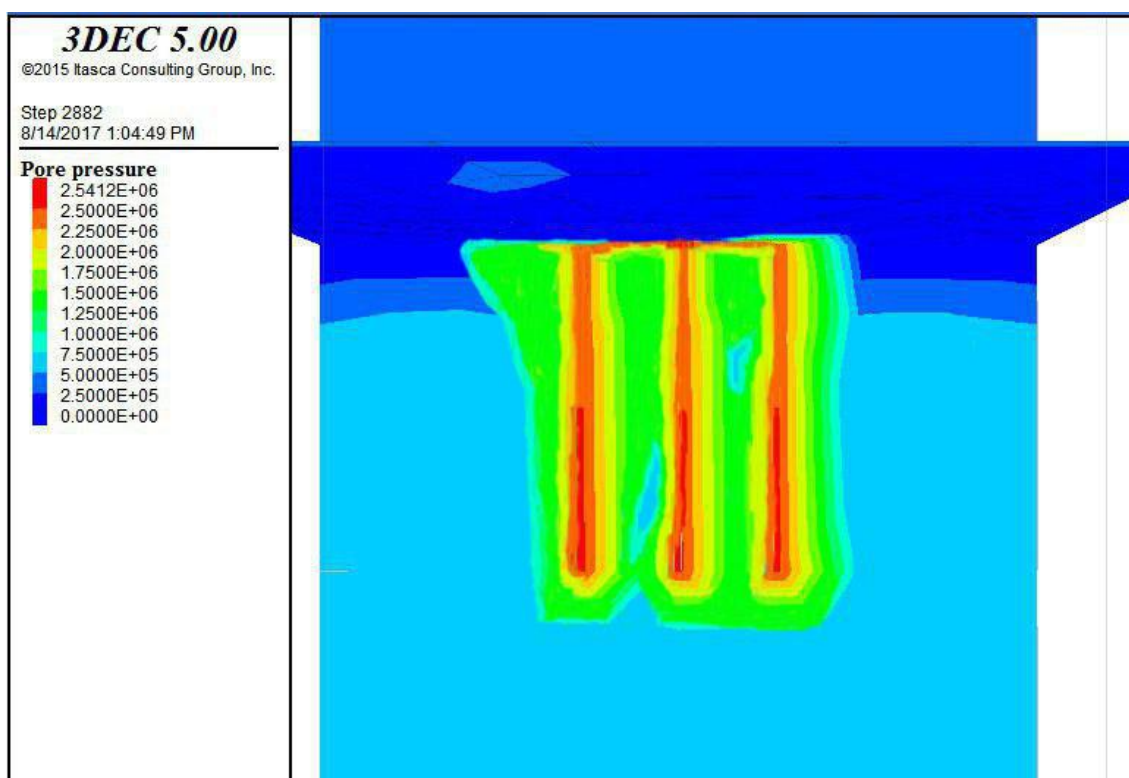
شکل ۵-۱۱ تزریق در فشار ۷/۵ بار دید از افق



شکل ۵-۱۲ تزریق در فشار ۷/۵ بار دید از قائم



شکل ۵-۱۳ تزریق در فشار ۲۵ بار دید از افق

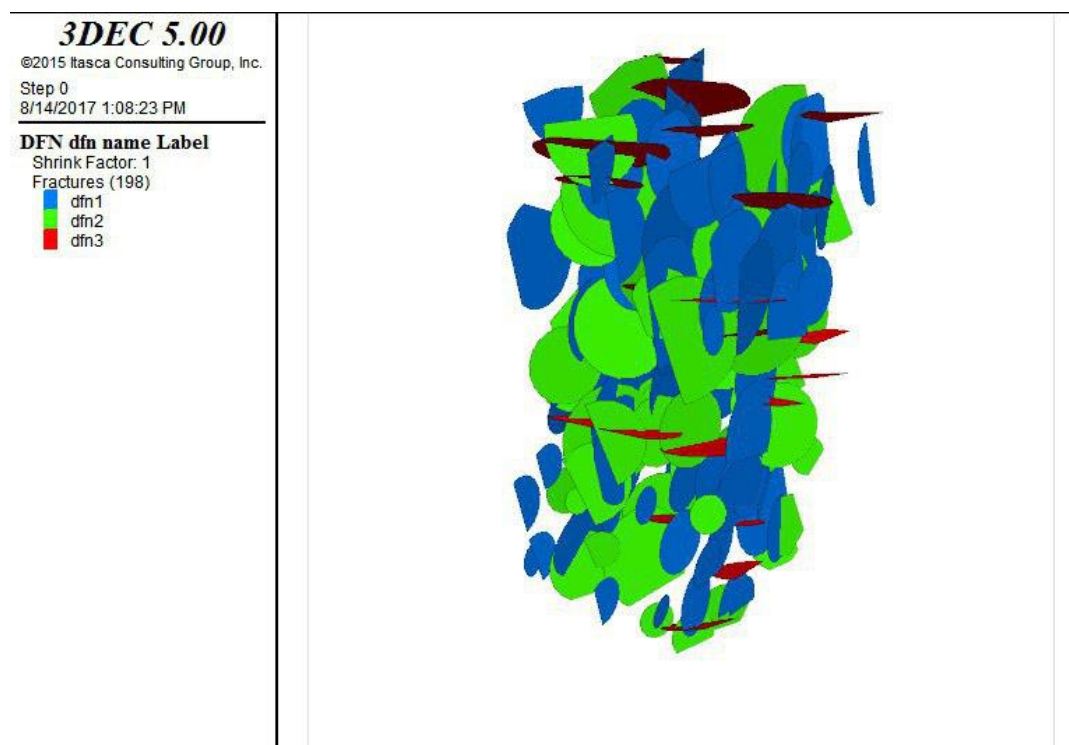


شکل ۵-۱۴ تزریق فشار ۲۵ بار دید از قائم

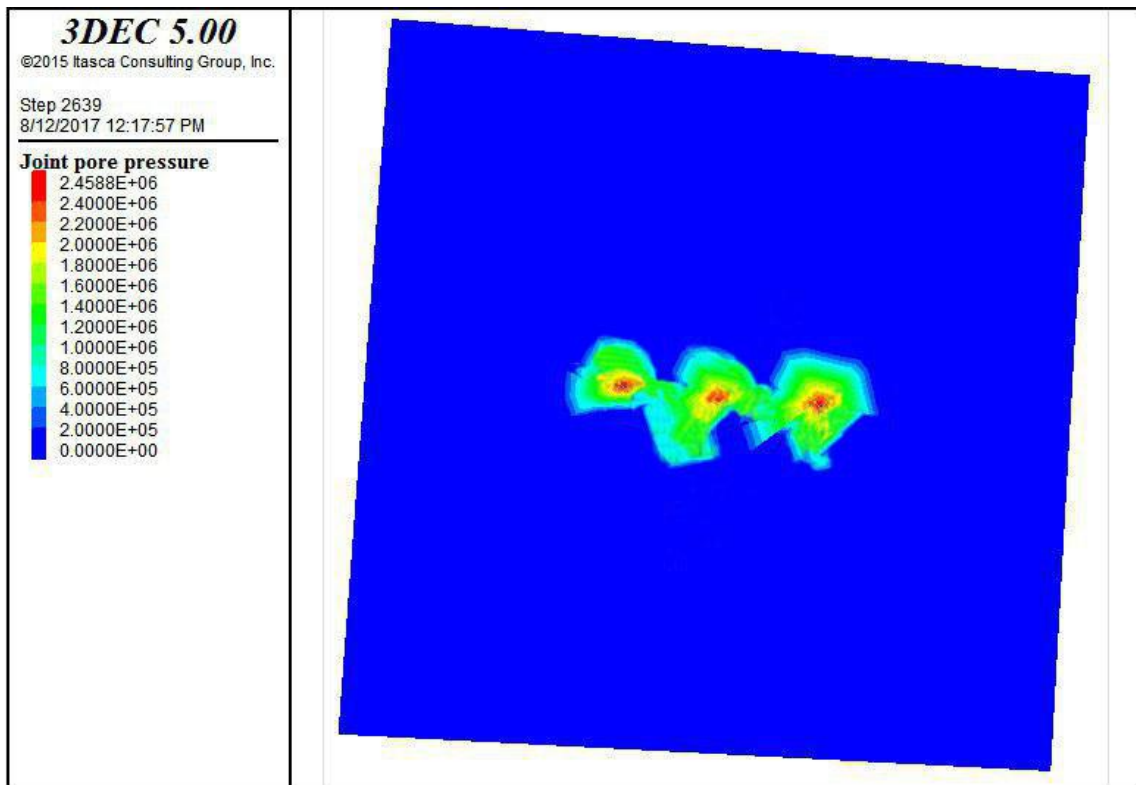
۵-۵-۱ تکرار مدل با DFN

در نرم‌افزار 3DEC برای ایجاد DFN به صورتی تعریف شده‌است که درزه‌ها به حالت تصادفی در بلوک پخش می‌شوند، بنابراین هر بار که کد DFN تکرار می‌شود نرم‌افزار به صورت تصادفی درزه‌ها را به حالتی دیگر در بلوک توزیع می‌کند که با توجه به اینکه تعداد ناپیوستگی‌ها در این مدل کم است DFN را سه بار تکرار کرده و هر بار با شرایط مشابه سابق، تزریق فقط در فشار ۲۵ بار انجام شده‌است تا تاثیرات ناشی از تغییر پخش‌شدگی درزه‌ها توسط نرم‌افزار در تزریق را مشاهده شود.

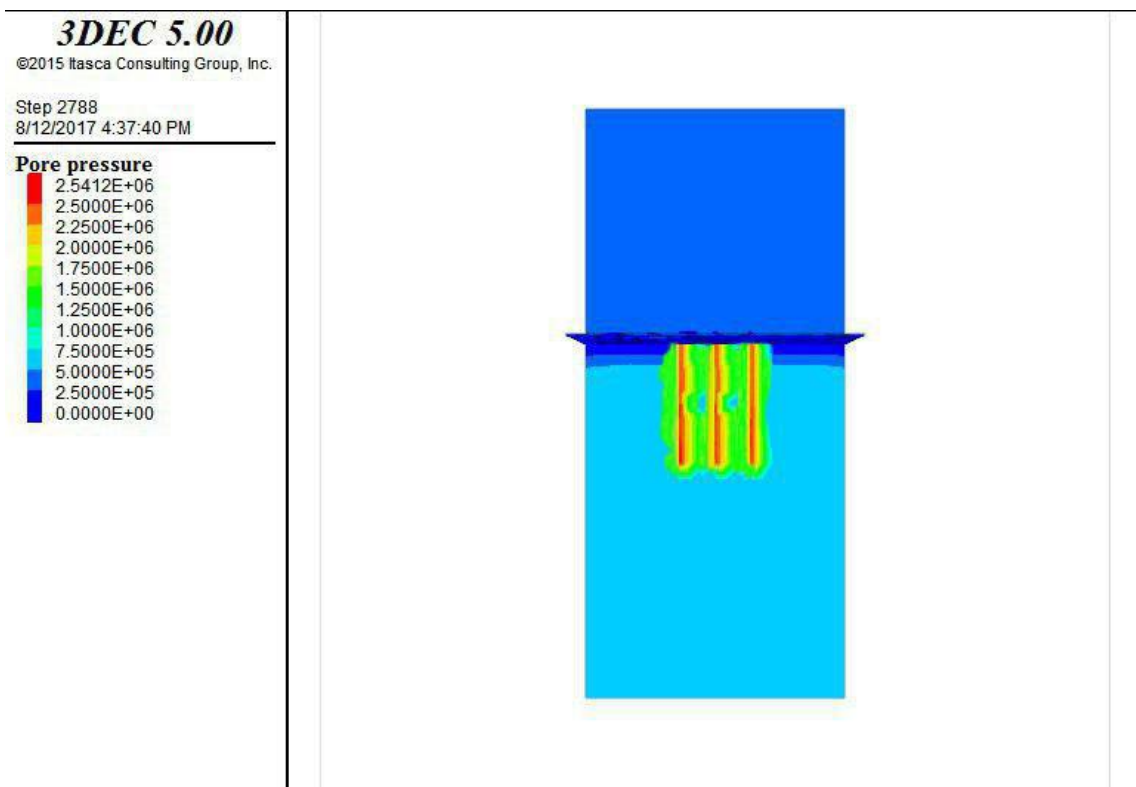
مطابق شکل ۵-۱۵ DFN را تکرار کرده و نتایج تزریق در شکل‌های ۵-۱۶ و ۵-۱۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۵ تکرار DFN برای دومین بار

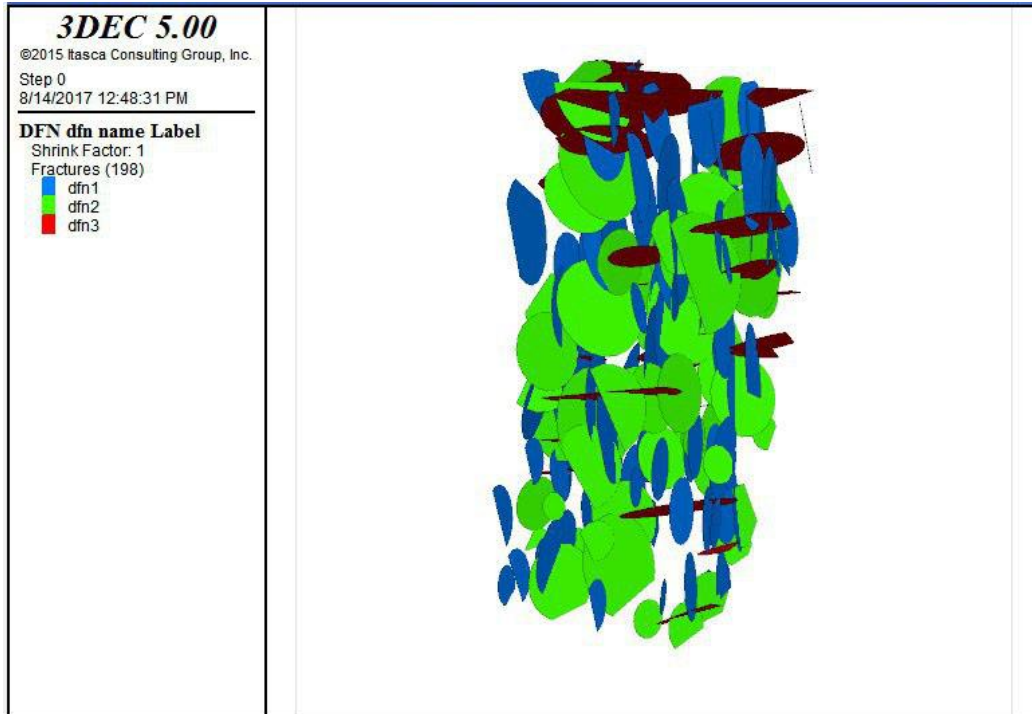


شکل ۱۶-۵ تزریق دید از افق تکرار دوم

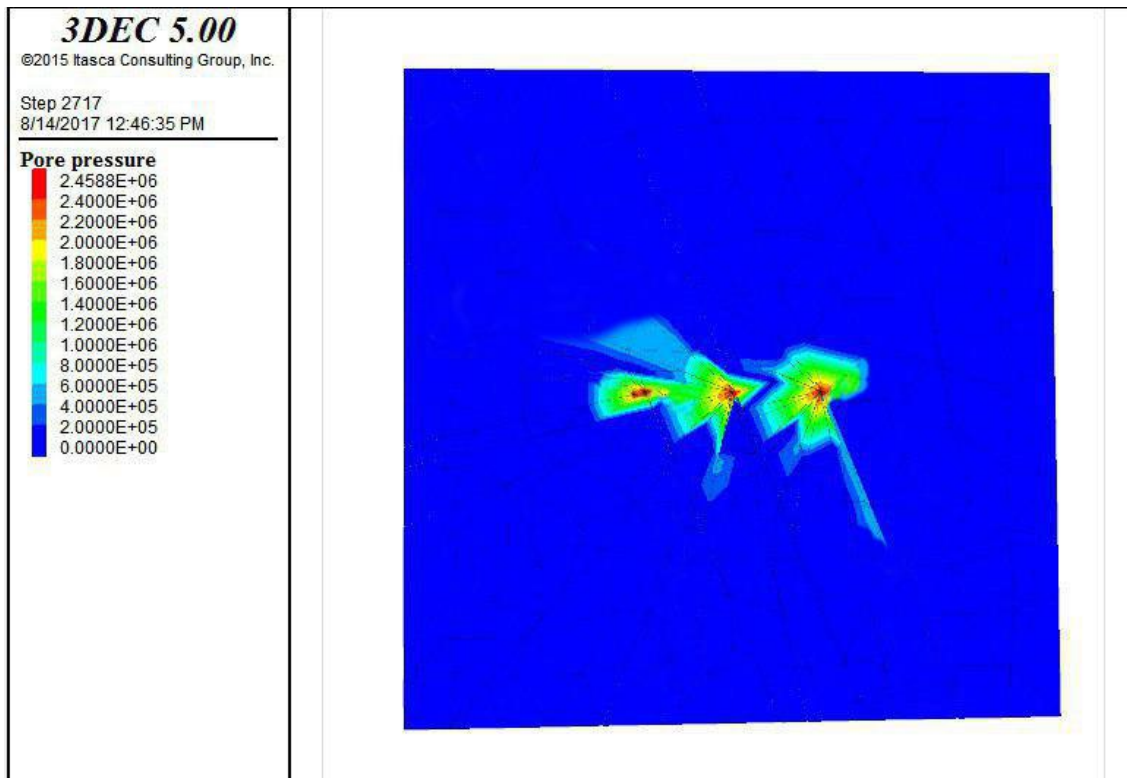


شکل ۱۷-۵ تزریق دید از قائم تکرار دوم

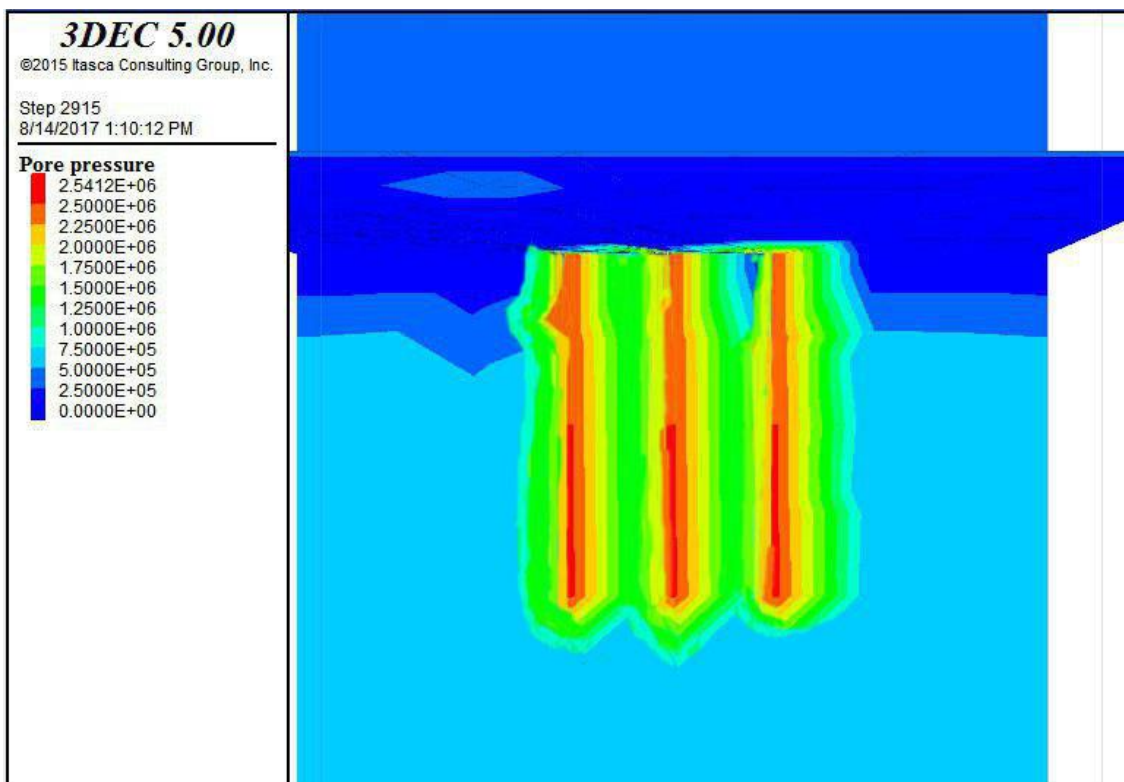
- تکرار DFN برای سومین بار و مشاهده نتایج تزریق:



شکل ۵-۱۸ تکرار DFN برای سومین بار

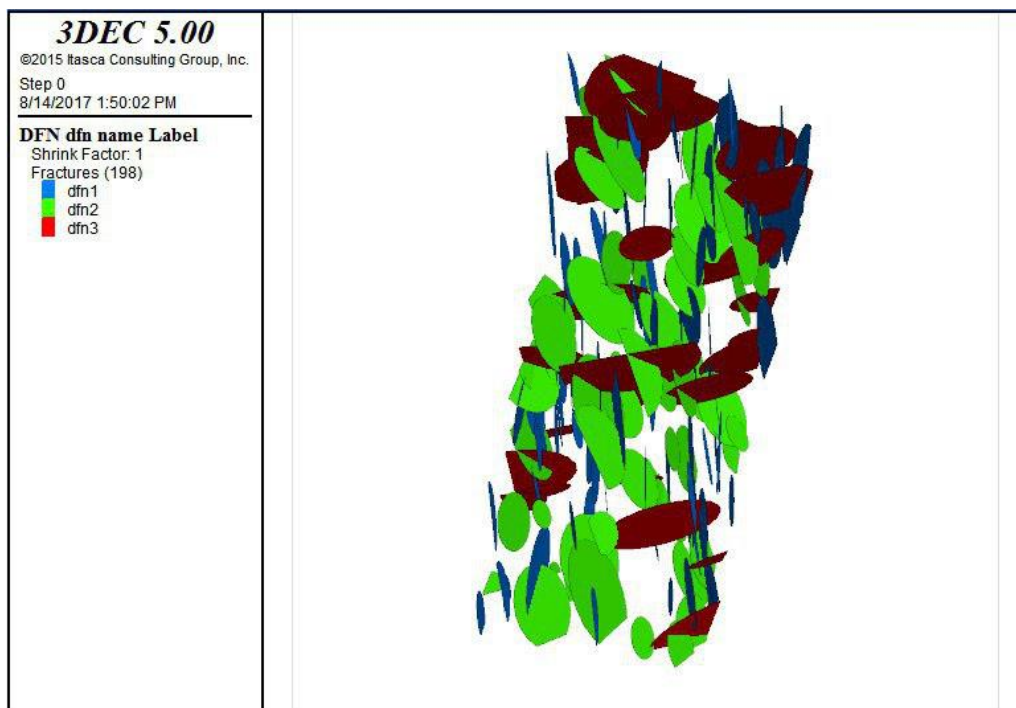


شکل ۵-۱۹ تزریق دید از افق تکرار سوم

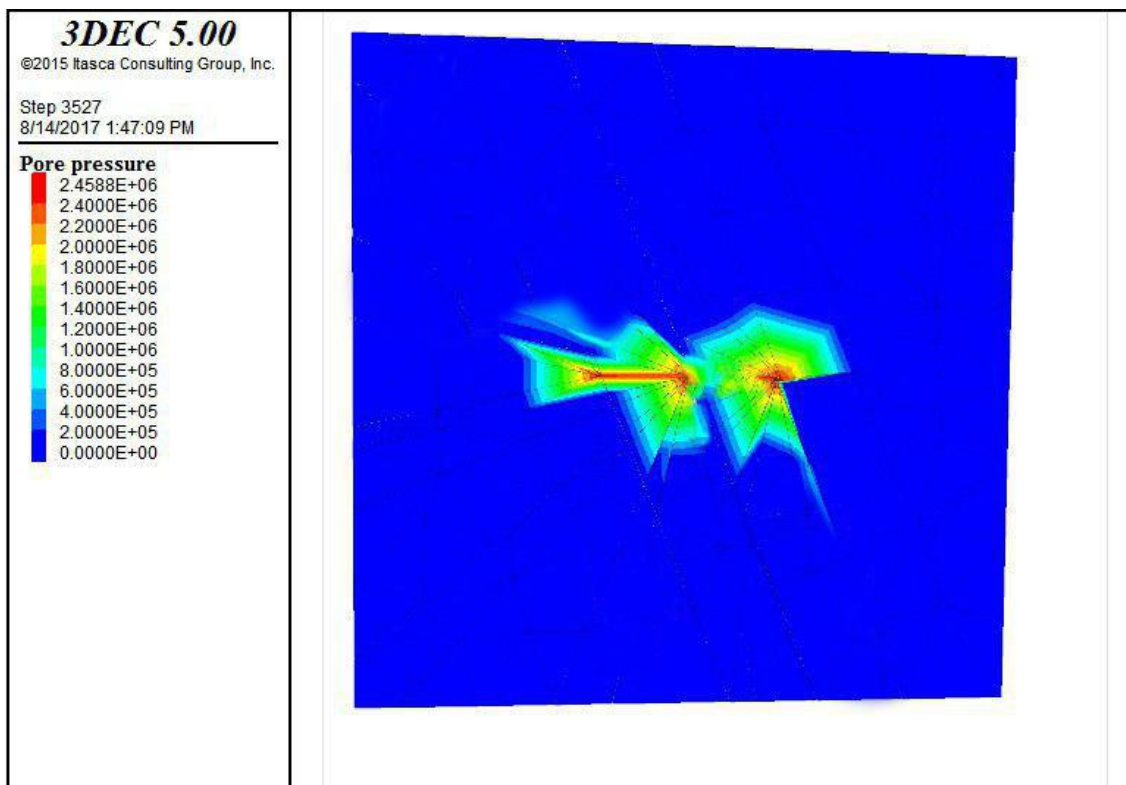


شکل ۲۰-۵ تزریق دید قائم تکرار سوم

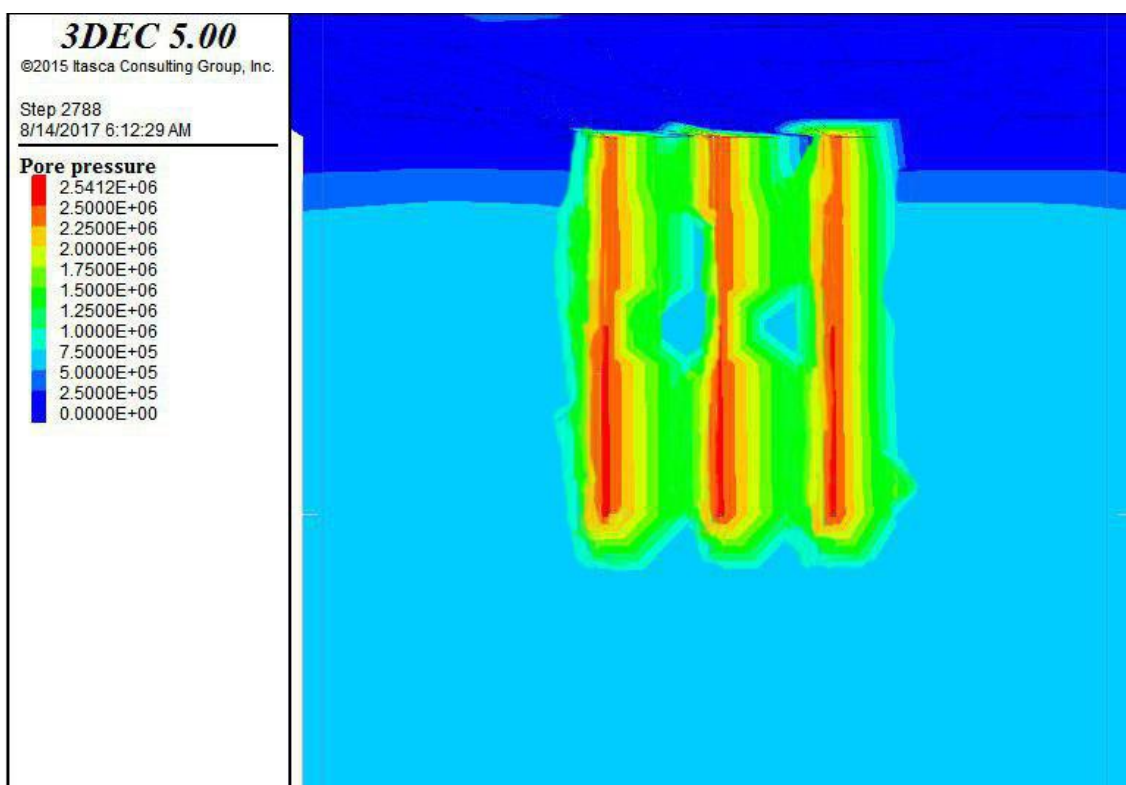
- تکرار DFN برای چهارمین بار:



شکل ۲۱-۵ تکرار DFN برای چهارمین بار



شکل ۲۲-۵ تزریق دید از افق تکرار چهار



شکل ۲۳-۵ تزریق دید از قائم تکرار چهار

همانطور که از نتایج مشخص است با تکرار DFN با توجه به این که نرم افزار 3DEC محل قرارگیری شکستگی‌ها را در مدل جابه‌جا می‌کند، تأثیر چندان زیادی در هم‌پوشانی چال‌های تزریق نداشته و فقط تغییر اندکی در جهت‌های انتشار تزریق می‌گذارد که بنابراین می‌توان گفت با ایجاد شبکه شکستگی مجزا برای مدل‌سازی انتشار تزریق جهت آب‌بندی ایراد چندان‌ی در نتیجه کار ایجاد نمی‌کند. در نهایت از نتایج به‌دست آمده از انتشار مواد به توده‌سنگ، عملیات تزریق در ساختگاه سد اگر مبنای فاصله‌داری چال‌های تزریق با میزان ۱/۵ متر و فشار تزریق ۲۵ بار انجام شود باعث هم‌پوشانی یکدیگر می‌شوند که این امر موجب آب‌بند شدن آن منطقه می‌شود.

۵-۶ جمع‌بندی

در فصلی که گذشت به مدل‌سازی عددی توده‌سنگ ساختگاه سد تنگاب توسط نرم‌افزار 3DEC پرداخته شد و پس از ایجاد شبکه شکستگی مجزا (DFN) وضعیت نفوذپذیری ساختگاه تحت کوپل هیدرو مکانیکی به‌دست آمد که با مقادیر تست برجا لوژان مقایسه و اعتبار سنجی شد. سپس مدل‌سازی عملیات تزریق در چندین مرحله انجام و در نهایت الگوی مناسب تزریق برای آب‌بندی ساختگاه سد تنگاب بدست آمد.

فصل ششم

نتیجه گیری

۶-۱ نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این پایان نامه به شرح زیر است:

- پارامترهای ورودی به عنوان داده‌های خام جهت ایجاد 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 من جمله مقاومت، مدول تغییر شکل پذیری و... اطمینان حاصل شود تا خروجی‌های مدل عددی قابل اطمینان باشد.
- به منظور اعتبار سنجی مقادیر تانسور نفوذپذیری محاسبه شده به روش عددی در این مطالعه با مقایسه مقادیر نفوذپذیری به دست آمده توسط لوژان برجا در ساختگاه سد تنگاب، دقت و صحت مدل‌سازی در این پایان‌نامه سنجیده و تایید شده است.
- در این مدل‌سازی برای بدست آوردن میزان انتشار مواد تزریق شده عملیات تزریق را در چندین مرحله با افزایش فشار تزریق انجام شده است و در نهایت حداکثر فشار مجاز که کمتر از فشار روباره است مناسب‌ترین انتشار را که دو چال تزریق مجاور هم‌دیگر را هم‌پوشانی کنند نشان داده است. از نتایج به دست آمده از انتشار مواد به توده سنگ، عملیات تزریق در ساختگاه سد اگر مبنای فاصله‌داری چال‌های تزریق با میزان $1/5$ متر و فشار تزریق ۲۵ بار انجام شود باعث ایجاد هم‌پوشانی چال‌ها که این امر موجب آب‌بند شدن آن منطقه می‌شود.

۶-۲ پیشنهادات

در هر مطالعه‌ای همواره فرض‌های ساده‌کننده‌ای در مدل‌سازی‌های عددی صورت می‌گیرد و این فرضیات و عدم قطعیت‌ها در مباحث ژئومکانیکی به دلیل پیچیدگی مسائل شدت بیشتری دارد. بهتر است در مدل‌سازی‌های عددی ابتدا مدل‌های ساده ایجاد و تحلیل شوند و رفته رفته به جزئیات و پیچیدگی‌های مدل افزوده گردد. در زیر پیشنهادهایی جهت مطالعات آتی ارائه شده است:

- به دلیل زمان بر بودن پروسه تحلیل حساسیت برای هر یک از مدل‌ها، پیشنهاد می‌شود که پارامترهای بیشتری تحلیل حساسیت شوند تا نتایج گسترده‌تری جهت مقایسه در دسترس قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی تحلیل حساسیت پارامترهایی نظیر نسبت تنش افقی به قائم، قطر گمانه‌های تزریق، مواد پرکننده درزه‌ها، مشخصات رئولوژیکی دوغاب انجام شود.
- به دلیل حجم زیاد و زمان بر بودن، در این مطالعه تنها عملیات تزریق در ۵ متر انتهایی گمانه انجام شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق و گسترده‌تر پیشنهاد می‌شود تزریق در طول کل گمانه مدل‌سازی و تحلیل شود.

- Alain T, Renaud.V, (Oct 2003) *Hydro-mechanical upscaling of a fractured rock mass using a 3D numerical approach*. International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems, , Stockholm, Sweden. pp.263-268
- 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.
- Baghbanan, A. (2008). *Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses* (Doctoral dissertation, KTH).
- Brantburger, M., Stille, H., & Eriksson, M. (2000). Controlling grout spreading in tunnel grouting—analyses and developments of the GIN-method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(4), 343-352.
- Brassington, R. (2007). *Field Hydrogeology, Third Edition*, 11-22.
- Chan, M. P. (2005). Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering.
- Dalmalm, T. (2004). *Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions* (Doctoral dissertation, Byggnvetenskap).
- Deere, D. U., & Lombardi, G. (1985, April). Grout slurries—Thick or thin?. In *Issues in Dam Grouting* (pp. 156-164). ASCE.
- Eriksson, M.,(2002). *Prediction of grout spread and sealing effect. A probabilistic approach*.
- Ewert, F. K. (1985). *Rock grouting: with emphasis on dam sites*. Springer Science & Business Media. Springer-verlag, Berlin.
- Ewert, F. K. (1998). Permeability, Groutability and Grouting of Rocks Related to Dam Sites. Part 2. *Dam Engineering*, 8, 123-176.
- Foyo, A., & Sánchez, M. A. (2002). Permeability tests for rock masses. A proposal for a new expression for the equivalent Lugeon unit (ELU). *Dam Engineering*, 13(3), 199-218.
- Fransson, Å. (2001). Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field test. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4), 331-339.

- Gothäll, R., & Stille, H. (2010). Fracture–fracture interaction during grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3), 199-204.
- 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.
- Harrison, D. M. (2000). *The Grouting Handbook: A step-by-step guide to heavy equipment grouting*. Gulf Professional Publishing.
- Hässler, L., Håkansson, U., & Stille, H. (1992). Computer-simulated flow of grouts in jointed rock. *Tunnelling and underground space technology*, 7(4), 441-446.
- Hassler, L., Stille, H., & Hakansson, U. (1987, January). Simulation of grouting in jointed rock. In *6th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Heinz, W. F., & Segatto, P. I. (1999). Grouting of dispersive dam foundations. In *Proc. 12th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Hernqvist, L., Fransson, Å., & Vidstrand, P. (2008). Numerical modeling of grout spread and leakage into a tunnel in hard rock—a case study. In *World Tunnel Congress-2008: Underground Facilities for Better Environment & Safety-India* (Vol. 1, pp. 482-491).
- Hiscock, K. M. (2005). *Hydrogeology: principles and practice*. John Wiley & Sons.
- Houlsby, A. C. (1990). *Construction and design of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations* (Vol. 67). John Wiley & Sons.
- Hudson J.A. (2005). *Engineering Properties of rock*. Vol 4, Lexinton MA, USA,
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier.

- Indraratna, B., Ranjith, P. G., & Gale, W. (1999, January). Deformation and permeability characteristics of rocks with interconnected fractures. In *9th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.
- Itasca Consulting Group Inc.,(2013),3DEC User' s guide, ver 5.0, Minneapolis, Minnesota
- Ivars, D. M. (2006). Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(5), 705-725.
- Janson, T.; Stille, H.; Hakansson, U., (1996),"Grouting of Jointed Rock-A Case Study", Department of Soil and Rock Mechanics, RoyalInstitute of Technology, Stockholm, Sweden
- Jing, L., & Stephansson, O. (2007). 1-Introduction. *Developments in geotechnical engineering*, 85, 1-21.
- Kutzner C., (1996), “Grouting Rock and Soil” , Taylor & Francis
- Lee, J. S., Bang, C. S., Mok, Y. J., & Joh, S. H. (2000). Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(7), 1027-1037.
- Lombardi, G. (1985, June). The role of cohesion in cement grouting of rock. In *Proceedings of 15th international congress on large dam, Lausanne, Switzerland* (pp. 235-261).
- Maadikhah, A., & Mortazavi, A. (2008, January). Numerical Analysis Of The Effect Of Joint Geometric Parameters On Grouting Process In Jointed Rock Mass. In *ISRM International Symposium-5th Asian Rock Mechanics Symposium*. International Society for Rock Mechanics.
- Nonveiller, E. (1989). Grouting theory and practice, development of geotechnical engineering.
- Park, B. Y., Kim, K. S., Kwon, S., Kim, C., Bae, D. S., Hartley, L. J., & Lee, H. K. (2002). Determination of the hydraulic conductivity components using a three-dimensional fracture network model in volcanic rock. *Engineering Geology*, 66(1), 127-141.

- Pettersson, S. Å., & Molin, H. (1999). Grouting & Drilling for grouting. *Atlas Copco, Sweden*.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media.
- 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.
- Shroff, A. V., & Shah, D. L. (1999). Grouting technology in tunnelling and dam construction. *A. A. Balkema*. 626, 626.
- Stille, H., & Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(1), 46-64.
- Teimori Sangarami, Ahmad., (2005), Calculation of Effective Permeability and Simulation of Fluid Flow in Naturally Fractured Reservoirs, PhD Thesis, University of New South Wales.
- Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1995). Relation between vein length and aperture. *Journal of structural geology*, 17(3), 423-434.
- Wang, X. (2005). *Stereological interpretation of rock fracture traces on borehole walls and other cylindrical surfaces* (Doctoral dissertation).
- Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures*. John Wiley & Sons.
- Weaver, K. (1991). Dam Foundation Grouting. American Society of Civil Engineers, Geo-Institute, Reston, VA. In *Library of Congress Catalog, Card*(No. 91-34635).
- Weaver, K., D., (1993), *Selection of grout mixes grouting in rock, Grouting in rock and concrete*, Windman (Ed), A, A., Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Widmann, R. (1996, December). International society for rock mechanics commission on rock grouting. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 33, No. 8, pp. 803-847). Pergamon.

- Yang, C. P. (2004). Estimating cement take and grout efficiency on foundation improvement for Li-Yu-Tan dam. *Engineering geology*, 75(1), 1-14.
- Zhang, L. (2006). Engineering properties of rocks: Elsevier Geo-Engineering Book Series. *Lexington, MA*, 4, 36-223.
- اصفهانی، ع. (۱۳۹۳)، "برآورد تانسور نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه بعدی اجزا مجزا و مدل‌های شبکه شکستگی مجزا مطالعه موردی: ساختگاه سد مخزنی پاریسیان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شریف‌زاده، م. (۱۳۸۷) "تقویت توده‌سنگ‌ها با دوغاب‌های پایه سیمانی در روش عدد شدت تزریق (GIN)"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- شرکت مهندسی مشاور آب نیرو، (۱۳۹۳) "گزارش زمین‌شناسی عمومی و مهندسی سد تنگاب"
- طاهری، د.، نیکودل، م. ر. و اومیه‌ای، ع. (۱۳۸۲) "بررسی تزریق‌پذیری پی سنگ و تکیه‌گاه‌های سد بختیاری بر اساس WPT"، کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، همدان.
- فیروزی، ع.، فیروزی، ع. (۱۳۹۰) "استفاده از تزریق شیمیایی برای آب بندی قسمتی از پی سد کرخه"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- کربلا-م.ا. (۱۳۸۸) "تزریق دوغاب سیمانی در سنگ"، چاپ اول، اهواز
- کردنظیری، م. (۱۳۹۰) "مدل‌سازی عددی نرخ نفوذ آب به درون تونل دسترسی در تونل بلند زاگرس با استفاده از روش DEM-D"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- مجدعی، ع.، گلی، ا. (۱۳۸۸) "مدل‌سازی عددی حرکت آمیزه تزریق سیمانی در پرده آب‌بند پی سد گتوند علیا به روش دو فازی" اولین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی بتن، تبریز.
- مسعودی، م. (۱۳۸۷) "مدل‌سازی تحلیلی و عددی فرایند تزریق دوغاب سیمانی در سنگ درزه‌دار براساس نتایج تزریق آزمایشی در ساختگاه سد سیمره"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن.
- معاونت امور فنی و تدوین معیارها، (۱۳۷۸) "نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، شماره ۶.

- مهدوی نژاد.ح، (۱۳۹۰) " بررسی فرآیند تزریق آب بند در تونل های سنگ سخت مطالعه موردی تونل انتقال آب کرج-تهران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- میرزایی نصیرآباد.ح،(۱۳۹۱) "تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه شکستگی های مجزای توده سنگ درزه دار"، اولین همایش زمین شناسی فلات ایران، کرمان.

Abstract

Many of the dams' reservoirs have leakage problems that may occur due to the foundation or dam body. Among the measures taken to prevent this phenomenon underwater structures is the installation of sealing curtains. By means of a suitable injection pattern, these sealants can be effective against water escape. The study is to determine the injectable pattern for strengthening the Tangab dam construction site. In the first step, field studies from the dam site that is including the perceived discontinuities (orientation, aperture, continuity, etc.) and then the data collected by DIPS and EASY-FIT software were analyzed and evaluated, and the statistical distribution functions dominated by the discontinuity characteristics were obtained. In the second step, a discrete fracture network (DFN) was constructed based on the data in the software in 3D in the discrete software of 3DEC. In the third stage of the tensor, the permeability of the dam site is obtained by numerical method and is compared with and validated by the leak tolerance values by the Luzhan test at the Tangab dam site. In the fourth step, in order to obtain the release of injected materials, the modeling performed the injection operation in several steps with increasing injection pressure finally, according to the site of the dam, with the maximum permissible injection pressure, which is less than the loading pressure the most appropriate release was obtained at a pressure of 25 bar with a distance of 1.5 m in the injection borehole, which caused the boreholes to coincide and can be provided as an appropriate injection pattern for water sealing in the water escape route.

Keywords: Numerical modeling, Grouting process, Discrete Fracture Network, Permeability, Injection pressure, Cement-based grout



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces

**Selection of suitable injection pattern for water sealing of Tangab dam
foundation**

By: Eshagh Shariyari

Supervisor:

Dr Syed-Mohammad Esmail Jalali

August 2017