

رسالة محمد

٢



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه مهندسی استخراج و مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه دار

هیرش محمودپور

اساتید راهنما

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

دکتر سید رحمان ترابی

شهریور ۱۳۹۴

دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه مهندسی استخراج و مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای هیرش محمودپور

تحت عنوان: تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه دار

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			حسین میرزائی نصیرآباد
			سید رحمان ترابی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		دکتر محمد اسماعیل جلالی
			دکتر احمد رمضانزاده

تقدیم بہ پدر و مادر م

آنان کہ خمیدند تا راست قامت بانم

آنان کہ موی سپید کردند تا موی سپید

بانم

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس بی پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد الطاف بی کران الهی، مقطعی از دوران تحصیل به پایان می رسد بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که مراد این امریاری دادند تشکر و قدردانی نمایم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر حسین میرزائی نصیر آباد و آقای دکتر سید رحمان ترابی و همچنین اساتید داوران محترم جناب دکتر سید اسماعیل جلالی و دکتر احمد رمضان زاده کمال تشکر و امتنان را دارم و همچنین برای دوستانی که مرا مورد لطف خود قرار داده اند، آرزوی موفقیت، سعادت و بهروزی دارم.

تعهد نامه

اینجناب هیرش محمودپور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده سنگ درزه دار تحت راهنمایی آقایان دکتر حسین میرزائی نصیرآباد و دکتر سید رحمان ترابی

متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

توده سنگ شامل ماده سنگ و انواع مختلفی از ناپیوستگی‌ها می‌باشد. انتقال جریان سیال درون توده سنگ از طریق شکستگی‌های سنگ و محیط‌های متخلخل انجام می‌گیرد. در سنگ‌های سخت، تخلخل اولیه نقش چندانی در پروسه انتقال سیال ندارد و جریان سیال از طریق شکستگی منتقل می‌گردد. هندسه شکستگی‌ها شامل بازشدگی، زبری، جهت‌داری و...، امری ضروری است. با توجه به اهمیت پارامتر زبری درزه، تأثیر این پارامتر بر اندازه دبی جریان عبوری از یک درزه توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعات مختلف انجام‌شده، زبری سطح درزه به صورت اعمال ضریب در قانون کوییک، تغییر توان بازشدگی در قانون کوییک و یا تغییر در میزان بازشدگی درزه در نظر گرفته شده است. در این پایان‌نامه برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه (JRC) از مدل رفتاری بارتون - بندیس استفاده شده است، که تأثیر زبری را به صورت کاهش بازشدگی دهانه ناپیوستگی اعمال می‌نماید برای این منظور ابتدا تأثیر زبری سطح درزه در میزان جریان آب عبوری از درزه‌ی منفرد مطالعه‌شده و نتایج حاصل با حالت مدل صفحات موازی (صفحات صاف) مقایسه شده و با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود نیز ارزیابی گردیده است. در ادامه، تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان عبوری از آن در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از مفهوم شبکه‌ی شکستگی مجزا، مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی DFN واقعی از توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه که در منطقه سنندج - همدان قرار دارد، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC ساخته شده است.

دبی جریان عبوری از مدل دوبعدی DFN در سه حالت درزه‌های صاف، درزه‌های با زبری میانگین و درزه با زبری متغیر در نرم‌افزار UDEC محاسبه و سپس به صورت کیفی و کمی باهم مقایسه شده‌اند و همچنین دبی جریان در دو حالت مدل با بازشدگی مکانیکی و مدل با بازشدگی هیدرولیکی برای مدل سه‌بعدی، در نرم‌افزار 3DEC محاسبه و مقایسه شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده، تأثیر زبری سطح درزه‌ها بر دبی جریان سیال عبوری، غیرقابل چشم‌پوشی است و زبری سطح درزه باعث تغییرات دهانه شکستگی در بعضی نواحی از شکستگی می‌شود و در صورتی که دقیق محاسبه نشود باعث تغییرات سرعت و دبی جریان می‌شود و از آنجا که بازشدگی در قانون کوبیک به توان ۳ می‌رسد و مهم‌ترین پارامتر محسوب می‌شود در صورتی که بازشدگی مؤثر (هیدرولیکی) دهانه محاسبه نشود، قانون کوبیک با انحراف همراه خواهد بود و سطوح زبر موجب کاهش شدید دبی جریان سیال نسبت به سطوح صاف در توده‌سنگ می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

مدل رفتاری بارتون – بندیس، زبری، شبکه شکستگی مجزا DFN، نرم‌افزار UDEC، نرم‌افزار 3DEC

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ح	فهرست اشکال
و	فهرست جداول
۱	۱- فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- جریان آب در شکستگی‌های توده‌سنگ
۳	۱-۲-۱- جریان آب در یک شکستگی منفرد
۵	۲-۲-۱- جریان آب در شبکه شکستگی‌ها
۵	۳-۱- هدف از انجام پایان نامه
۶	۴-۱- ضرورت مسئله
۷	۵-۱- سوابق تحقیق
۹	۶-۱- روش تحقیق
۱۲	۷-۱- ساختار گزارش
۱۵	۲- فصل دوم: جریان سیال در شکستگی منفرد
۱۶	۱-۲- مقدمه
۱۷	۲-۲- قانون کوبیک
۱۹	۳-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال در شکستگی منفرد

۲۷	۴-۳-۲- تأثیر زبری سطح درزه
۳۱	۴-۲- تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن
۳۳	۱-۴-۲- روابط تجربی بر مبنای کاهش توان بازشدگی
۳۴	۲-۴-۲- روابط تجربی بر مبنای کاهش بازشدگی
۳۴	۳-۴-۲- روابط تجربی بر مبنای اعمال ضریب به معادله کوبیک
۳۶	۵-۲- جمع بندی
۳۷	۳- فصل سوم: مطالعه عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال در درزه منفرد
۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۹	۲-۳- مدل رفتاری درزه بارتون - بندیس
۳۹	۱-۲-۳- رفتار نرمال درزه
۴۴	۲-۲-۳- رفتار برشی درزه
۴۸	۳-۳- مدل سازی عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان در شکستگی منفرد
۴۹	۱-۳-۳- مطالعه آزمایشگاهی رانجیت برای بررسی تأثیر زبری بر جریان سیال
۵۱	۲-۳-۳- مدل سازی عددی تأثیر زبری بر جریان آب با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی
۵۴	۴-۳- اعتبارسنجی مدل عددی با تست آزمایشگاهی
۵۶	۵-۳- مقایسه مدل عددی با نتایج تجربی
۵۹	۶-۳- جمع بندی
۶۱	۴- فصل چهارم: جریان سیال در توده سنگ درزه دار
۶۲	۱-۴- مقدمه

۶۴	۲-۴- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها
۶۸	۳-۴- برداشت پارامترهای هندسی شکستگی
۶۹	۴-۴- توصیف هندسی توده‌سنگ با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا (DFN)
۷۱	۵-۴- نحوه تولید DFN برای توده‌سنگ درزه‌دار
۷۱	۱-۵-۴- تولید تصادفی محل شکستگی
۷۲	۲-۵-۴- تولید تصادفی شیب شکستگی
۷۲	۳-۵-۴- تولید تصادفی طول خط اثر شکستگی‌ها
۷۳	۶-۴- شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی با روش مونت کارلو
۷۴	۷-۴- نرم‌افزار شبیه‌سازی تصادفی توده‌سنگ (3DEC)
۷۶	۸-۴- ابعاد مدل DFN
۷۸	۹-۴- مدل‌سازی دوبعدی DFN در UDEC
۷۸	۱۰-۴- همبستگی بین طول خط اثر و بازشدگی
۸۰	۱۱-۴- شرایط مرزی
۸۲	۱-۱۱-۴- شرایط مرزی برای اعمال فشار سیال
۸۳	۱۲-۴- مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر زبری در قالب مدل‌های DFN
۸۵	۱۳-۴- جمع‌بندی
	۵- فصل پنجم: مدل‌سازی عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ - مطالعه موردی توده‌سنگ محدوده‌ی سنندج
۸۷	
۸۸	۱-۵- مقدمه

- ۲-۵- برداشت ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه و تحلیل آماری خصوصیات هندسی شکستگی‌ها ۸۹
- ۹۱ ۱-۲-۵- برداشت ناپیوستگی‌ها با روش خط برداشت
- ۹۲ ۲-۲-۵- جهت‌داری شکستگی‌ها
- ۹۴ ۳-۲-۵- اندازه شکستگی‌ها
- ۹۶ ۴-۲-۵- بازشدگی شکستگی‌ها
- ۹۸ ۵-۲-۵- زبری سطح شکستگی‌ها
- ۱۰۰ ۶-۲-۵- دانسیته شکستگی‌ها
- ۱۰۱ ۳-۵- توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه
- ۱۰۱ ۱-۳-۵- تولید شبکه‌های شکستگی مجزای دو بعدی و سه بعدی
- ۱۰۴ ۴-۵- مدل‌سازی عددی جریان سیال در شبکه شکستگی‌های توده‌سنگ مورد مطالعه در حالت
دو بعدی
- ۱۰۴ ۱-۴-۵- مقدمه
- ۱۰۵ ۲-۴-۵- شرایط مرزی و شرایط اولیه
- ۱۰۶ ۳-۴-۵- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های صاف
- ۱۰۹ ۴-۴-۵- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های زبر
با زبری متوسط یکسان
- ۱۱۲ ۵-۴-۵- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های زبر با زبری متغیر
- ۱۱۵ ۵-۵- بحث و نتیجه‌گیری
- ۱۱۹ ۶-۵- مدل‌سازی عددی سه بعدی جریان سیال در شبکه شکستگی‌های توده‌سنگ

۱۱۹	۵-۶-۱- مقدمه
۱۲۱	۵-۶-۲- تأثیر زبری بر جریان سیال عبوری از توده‌سنگ
۱۲۳	۵-۷- بحث و نتیجه‌گیری
۱۲۵	۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری
۱۲۶	۶-۱- مقدمه
۱۳۰	۶-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۳۳	پیوست‌ها
۱۳۶	فهرست منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: فلوچارت مراحل انجام پایان‌نامه ۱۱
- شکل ۱-۲: توزیع سهمی‌گون سرعت جریان در شکستگی منفرد ۱۸
- شکل ۲-۲: پارامترهای تأثیرگذار هندسه شکستگی منفرد بر جریان سیال ۲۰
- شکل ۳-۲: جریان میان شکستگی منفرد: (a) شکستگی طبیعی، (b) شکستگی ایده‌آل ۲۱
- شکل ۴-۲: مدل مفهومی برای درک بازشدگی متغیر ۲۲
- شکل ۵-۲: رابطه تنش نرمال درزه با بازشدگی درزه ۲۴
- شکل ۶-۲: بازشدگی باقی مانده برای نمونه‌گرانیتهای مختلف با شکستگی منفرد ۲۵
- شکل ۷-۲: تأثیر بارگذاری و باربرداری بر روی ویژگی‌های جریان ۲۷
- شکل ۸-۲: مقایسه نرخ جریان از قانون کوبیک با نرخ جریان به‌دست آمده برای سطوح زیر ۳۰
- شکل ۹-۲: پروفایل‌های استاندارد پیشنهاد شده توسط بارتون (۱۹۷۳) ۳۱
- شکل ۱۰-۲: پروفایل‌های استاندارد سطح برای اندازه‌گیری ضریب زبری درزه ۳۲
- شکل ۱۱-۲: نرخ جریان نرمال شده برای JRC های مختلف ۳۵
- شکل ۱-۳: پارامترهای استفاده شده در محاسبه‌ی تنش نرمال در زمان سیکل بارگذاری ۴۰
- شکل ۲-۳: نمودار تغییرات پارامتر بسته‌شدگی دهانه با تغییرات تنش نرمال ۴۳
- شکل ۳-۳: منحنی‌های دهانه بازشدگی بر حسب تنش نرمال در ۴ سیکل کامل ۴۴
- شکل ۴-۳: نمایی از تغییرشکل قائم (اتساع) در اثر تنش برشی ۴۵
- شکل ۵-۳: مدل بررسی تأثیر تغییرشکل بر مقاومت برشی درزه ۴۵
- شکل ۶-۳: a دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان، b نمونه آزمایشگاهی ۵۰
- شکل ۷-۳: مقدار دبی جریان عبوری از شکستگی نمونه آزمایشگاهی ۵۱
- شکل ۸-۳: تنش‌های اعمالی بر مدل عددی شبیه‌سازی شده مطابق با تست آزمایشگاهی ۵۲

- شکل ۳-۹: تغییر شکل نرمال و برشی در اطراف شکستگی مدل ۵۳
- شکل ۳-۱۰: تصویر تغییر شکل حاصل از فشار سیال در طول شکستگی ۵۴
- شکل ۳-۱۱: b دبی جریان برای درزه با $JRC=6/2$ ، a دبی جریان برای درزه صاف ۵۶
- شکل ۳-۱۲: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج تجربی و بررسی تأثیر زبری ۵۷
- شکل ۳-۱۳: مقایسه دبی جریان سیال برای تست آزمایشگاهی، مدل عددی و روابط تجربی ۵۸
- شکل ۴-۱: نمای خط برداشت و معرفی انواع پایانه درزه‌ها ۶۶
- شکل ۴-۲: نمونه‌ای از فورم‌های برداشت خصوصیات هندسی توده‌سنگ ۶۷
- شکل ۴-۳: نمایی از دو نوع پنجره برداشت: (الف) پنجره برداشت دایره‌ای ۶۷
- شکل ۴-۴: انواع مدل‌های سه‌بعدی شبکه شکستگی مجزا DFN ۷۰
- شکل ۴-۵: شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ با روش مونت کارلو ۷۳
- شکل ۴-۶: فلوجارت شبیه‌سازی شبکه شکستگی مجزا برای توده‌سنگ درزه‌دار ۷۵
- شکل ۴-۷: تعریف المان معرف حجم ۷۶
- شکل ۴-۸: المان معرف حجم نفوذپذیری به‌دست آمده از تونلی در امریکا ۷۶
- شکل ۴-۹: شبیه‌سازی مدل‌سازی دو بعدی DFN، در نرم‌افزار UDEC ۷۸
- شکل ۴-۱۰: نحوه‌ی ثابت کردن جابجایی مرزها (سرعت)، v_x, v_y سرعت در راستای y و x ۸۱
- شکل ۴-۱۱: شکل‌های مختلفی از نحوه‌ی بارگذاری مدل ۸۱
- شکل ۴-۱۲: نحوه‌ی بارگذاری مدل دو بعدی DFN ۸۲
- شکل ۴-۱۳: نحوه‌ی اعمال فشار سیال بر مرزها ۸۲
- شکل ۴-۱۴: مدل دو بعدی DFN استفاده‌شده توسط کی‌بوک‌مین و استفانسون جهت بررسی تأثیر تنش بر جریان سیال ۸۴
- شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه ۹۰
- شکل ۵-۲: برگه‌های ثبت ناپیوستگی‌های با روش خط برداشت در منطقه مورد مطالعه ۹۱

- شکل ۳-۵: نمایی از منطقه مورد مطالعه و روش برداشت ناپیوستگی‌ها
 ۹۲ با استفاده از خط برداشت
- شکل ۴-۵: استریونت دسته درزه‌های اصلی و جهت‌داری هر دسته درزه
 ۹۳ برای منطقه مورد مطالعه
- شکل ۵-۵: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J_1
 ۹۵
- شکل ۶-۵: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J_2
 ۹۵
- شکل ۷-۵: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J_3
 ۹۶
- شکل ۸-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_1
 ۹۶
- شکل ۹-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_2
 ۹۷
- شکل ۱۰-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_3
 ۹۷
- شکل ۱۱-۵: همبستگی و برازش تابع توانی مناسب حاکم بر بازشدگی درزه
 ۹۸ و طول خط اثر
- شکل ۱۲-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J_1
 ۹۹
- شکل ۱۳-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J_2
 ۹۹
- شکل ۱۴-۵: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J_3
 ۱۰۰
- شکل ۱۵-۵: شبیه‌سازی چهار مدل سه‌بعدی DFN منطقه مورد مطالعه با استفاده از
 ۱۰۳ شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزار 3DEC
- شکل ۱۶-۵: دو مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی
 ۱۰۳ مونت کارلو در نرم‌افزار 3DEC
- شکل ۱۷-۵: مدل‌های دوبعدی DFN برای منطقه مورد مطالعه در راستای خط برداشت ۱۰۴
 ۱۰۵
- شکل ۱۸-۵: شرایط مرز بندی مدل دوبعدی DFN، در دو جهت مختلف
 ۱۰۵
- شکل ۱۹-۵: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=1$ و $t=2$
 ۱۰۷

- شکل ۵-۲۰: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=3$ و $t=4$ ۱۰۷
- شکل ۵-۲۱: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=5$ و $t=6$ ۱۰۸
- شکل ۵-۲۲: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح صاف ۱۰۸
- شکل ۵-۲۳: بیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=1$ و $t=2$ ۱۱۰
- شکل ۵-۲۴: بیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=3$ و $t=4$ ۱۱۱
- شکل ۵-۲۵: بیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=5$ و $t=6$ ۱۱۱
- شکل ۵-۲۶: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح زبر میانگین ۱۱۲
- شکل ۵-۲۷: بیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=1$ و $t=2$ ۱۱۳
- شکل ۵-۲۸: بیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=3$ و $t=4$ ۱۱۳
- شکل ۵-۲۹: بیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=5$ و $t=6$ ۱۱۴
- شکل ۵-۳۰: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح زبر متغیر ۱۱۴
- شکل ۵-۳۱: نمودار دبی آب بر حسب زمان (سیکل) برای سطوح زبر و سطوح صاف مدل دوبعدی ۱۱۷
- شکل ۵-۳۲: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه J_1 ۱۲۰
- شکل ۵-۳۳: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه J_2 ۱۲۱
- شکل ۵-۳۴: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه J_3 ۱۲۱

شکل ۵-۳۵: اعمال فشار سیال از بالا به پایین بر مدل سه‌بعدی برای بازشدگی بدون احتساب

۱۲۲

زبری سطح درزه (مکانیکی)

شکل ۵-۳۶: اعمال فشار سیال از بالا به پایین بر مدل سه‌بعدی برای

۱۲۲

بازشدگی هیدرولیکی (سطوح زبر)

۱۲۳

شکل ۵-۳۷: اندازه دبی جریان آب در دو مدل سه‌بعدی

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ضریب افت فشار و نرخ جریان برای درزه منفرد و برای جریان های آرام و مختلط ۲۹
- جدول ۱-۳: ثابت های استفاده شده جهت محاسبه ی v_{mi} ۴۱
- جدول ۲-۳: ثابت های مورد استفاده برای محاسبه ی v_{irr} ۴۲
- جدول ۳-۳: مقادیر استفاده شده برای محاسبه ی زبری JRC_{mob} ۴۷
- جدول ۳-۴: ابعاد و مشخصات نمونه آزمایشگاهی ۵۰
- جدول ۳-۵: خصوصیات سطح درزه نمونه ۵۰
- جدول ۳-۶: شرایط مرزی نمونه آزمایشگاهی که جهت مدل سازی عددی از آن استفاده شده ۵۰
- جدول ۱-۴: توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی های توده سنگ ۷۱
- جدول ۲-۴: انواع توابع توزیع برای طول خط اثر ۷۳
- جدول ۱-۵: مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مسیر سندج - همدان) ۸۹
- جدول ۲-۵: خصوصیات ماده سنگ و شکستگی های منطقه مورد مطالعه ۹۱
- جدول ۳-۵: خصوصیات دسته درزه های اصلی منطقه مورد مطالعه ۹۴
- جدول ۴-۵: اولویت بندی تابع توزیع های حاکم بر طول خط اثر هر دسته درزه ۹۴
- جدول ۵-۵: پارامترهای مناسب ترین تابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی برای هر دسته درزه همراه با میانگین و انحراف معیار ۹۵
- جدول ۶-۵: اولویت بندی توابع توزیع حاکم بر زبری سطح هر دسته درزه ۹۸
- جدول ۷-۵: میانگین و انحراف معیار زبری دسته درزه ها همراه با مناسب ترین تابع توزیع ۹۹

- جدول ۵-۸: دانسیته طولی، سطحی و حجمی برای منطقه مورد مطالعه ۱۰۰
- جدول ۵-۹: ورودی‌های شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید شبکه شکستگی
منطقه مورد مطالعه ۱۰۲
- جدول ۵-۱۰: اندازه تنش‌های اعمالی بر مرزهای مدل دوبعدی DFN ۱۰۵
- جدول ۵-۱۱: اندازه دبی جریان برای سه مدل دوبعدی ۱۱۶
- جدول ۵-۱۲: دبی جریان محاسبه شده در سطح مدل‌های مختلف شبیه‌سازی شده. ۱۱۸
- جدول ۵-۱۳: پارامترهای مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر اندازه بازشدگی دهانه شکستگی
برای هر دسته درزه ۱۲۰

۱- فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

توده‌سنگ شامل ماده سنگ و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها (مانند درزه‌ها و، صفحات لایه‌بندی) می‌باشد. در دو دهه‌ی گذشته مطالعات قابل توجهی بر روی پارامترهای تغییر حالت جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار و محیط‌های متخلخل به‌صورت تجربی و تحلیلی انجام گرفته است و انتقال جریان در توده‌سنگ به طور کلی از طریق سه فرآیند زیر قابل بررسی است (Indraratna et al., 1999):

۱. انتقال سیال از طریق شکستگی‌های توده‌سنگ

۲. انتقال سیال از طریق محیط‌های متخلخل (منافذ ماده سنگ)

۳. انتقال از طریق محیط‌های متخلخل و شکستگی‌های سنگ

بخش زیادی از پوسته زمین توسط سیال احاطه‌شده و شکستگی‌ها در قسمت بالایی فوقانی پوسته زمین (سطح زمین) متمرکز شده‌اند. در سنگ‌های نفوذپذیر شکستگی‌ها می‌توانند مجرای سریعی برای انتقال سیال باشند، ولی ماتریکس سنگ در مقابل سیال مقاومت می‌کند و به‌همین دلیل

شبکه‌ی شکستگی‌ها، مجرای اصلی عبور سیال در سنگ نفوذپذیر است.

جریان سیال در داخل بلوک سنگی به‌طور یکنواخت جریان نمی‌یابد و خصوصیات هندسی شکستگی، عامل تعیین‌کننده‌ی انتقال سیال است. بنابراین تغییر در دبی جریان می‌تواند ناشی از تغییر هندسه‌ی بلوک شامل بازشدگی، زبری، جهت‌داری درزه و ... باشد لذا بررسی این پارامترها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

۲-۱- جریان آب در شکستگی‌های توده‌سنگ

در توده‌سنگ، هر شکستگی خصوصیات متفاوتی نسبت به دیگر شکستگی‌ها دارد و بنابراین تأثیر آنها بر جریان سیال عبوری متفاوت خواهد بود. به‌همین دلیل مطالعه جریان سیال در درزه باید در دو قالب، شکستگی منفرد و شبکه شکستگی مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار از هم تفکیک شوند.

۱-۲-۱- جریان آب در یک شکستگی منفرد

اگر جریان سیال در یک شکستگی، با جریان سیال بین دو صفحه موازی مشابه فرض شود (یعنی از زبری سطح درزه صرف‌نظر کرده و سطوح درزه صاف فرض شود)، معادله حاکم بر جریان سیال بین دو صفحه موازی برای سیال نیوتونی تراکم‌ناپذیر از معادله بنیادی ناویر - استوکس^۱ (رابطه ۱-۱) تبعیت می‌کند. معادلات ناویر - استوکس به کمک قانون دوم نیوتن به‌دست می‌آیند و بیان‌کننده تعادل مومنتوم و جرم در داخل فضای خالی شکستگی می‌باشد (Jing et al., 2007).

$$\rho \left(\frac{\delta u_i}{\delta t} + \sum_{\lambda=x,y,z} U_\lambda \frac{\delta u_i}{\delta \lambda} \right) = \mu \sum_{\lambda=x,y,z} \frac{\delta^2}{\delta \lambda^2} u_i - \frac{\delta P}{\delta i} + \rho g_i \quad (1-1)$$

که در آن $i=x,y,z$ جریان در راستای محور مختصات دکارتی، ρ چگالی سیال، u_i مؤلفه‌ی اسکالر

^۱ Navier-Stokes

بردار سرعت در امتداد مسیر i ، فشار سیال و g_i مؤلفه‌ی اسکالر شتاب گرانشی در جهت i می‌باشد. پس از ساده‌سازی معادلات ناویر – استوکس، معادله جریان برای درزه منفرد با دیواره‌های صاف و موازی به دست می‌آید که به قانون کوبیک^۱ معروف می‌باشد. معادله قانون کوبیک در رابطه ۱-۲ نشان داده شده است (Jing et al., 2007):

$$Q = \frac{gwe^3}{12v} \frac{\Delta h}{l} \quad (2-1)$$

که در آن w عرض شکستگی، e بازشدگی دهانه شکستگی با سطوح صاف (ایده‌ال)، v ویسکوزیته سینماتیکی سیال، g شتاب گرانش زمین و Δh اختلاف ارتفاع در طول l از درزه می‌باشد. رابطه‌ی ۱-۲ را می‌توان به صورت رابطه ۱-۳ خلاصه کرد و همچنین هدایت هیدرولیکی (K) برای شکستگی از رابطه ۱-۴ به دست می‌آید:

$$Q = Kwe \frac{\Delta h}{l} \quad (3-1)$$

$$K = \frac{ge^2}{12v} \quad (4-1)$$

فرض دیواره‌های موازی برای شکستگی، کاربرد قانون کوبیک را برای شکستگی‌های طبیعی محدود می‌کند و به دلیل موازی نبودن و زبری دیواره‌های شکستگی، برآورد دبی جریان در شکستگی با استفاده از قانون کوبیک با خطای بالا همراه است. همچنین زبری و موازی نبودن سطوح باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در دهانه‌های شکستگی شده که تغییرات ناگهانی دهانه و موازی نبودن دیواره‌های شکستگی باعث تغییر سرعت و دبی جریان سیال می‌شود.

امکان استفاده از قانون کوبیک برای شکستگی‌های زیر توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که اگر مقدار دهانه شکستگی مورد استفاده در قانون کوبیک به طور مناسب و دقیق انتخاب شود، قانون کوبیک رفتار هیدرومکانیکی شکستگی را به طور مناسبی برآورد

¹ Cubic law

² Conductivity

می‌کند ولی چنین برآوردی مستلزم ایجاد تغییراتی در قانون کوبیک می‌باشد که منجر به اصلاح قانون کوبیک می‌گردد.

۱-۲-۲- جریان آب در شبکه شکستگی‌ها

توده‌سنگ درزه‌دار شامل دسته درزه‌های اصلی و فرعی می‌باشد که رفتار هیدرومکانیکی شبکه شکستگی توسط خصوصیات هندسی این دسته درزه‌ها کنترل می‌شود. خصوصیات هندسی هر دسته درزه شامل: جهت‌داری^۱، فراوانی^۲، طول خط اثر^۳، بازشدگی مؤثر^۴ و ... می‌باشد (Indraratna et al., 1999). در طبیعت پارامترهای هندسی توده‌سنگ با عدم قطعیت همراه می‌باشند، بنابراین برداشت تک تک این پارامترها غیرممکن می‌باشد. لذا برای بررسی تأثیر خصوصیات ناپیوستگی‌ها بر جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار ابتدا باید مدل معادل و واقعی از توده‌سنگ منطقه تهیه و تولید شود.

برای مدل‌سازی واقعی هندسه توده‌سنگ درزه‌دار لازم است عدم قطعیت حاکم بر هندسه شکستگی‌ها مد نظر قرار گیرد. روش شکستگی مجزا (DFN^۵) یک ابزار غیرقابل جایگزین برای مدل‌سازی توده‌سنگ معادل می‌باشد که به وسیله آن هندسه شکستگی‌ها به‌طور صریح و با جزئیات تقریب زده می‌شود.

۱-۳- هدف از انجام پایان نامه

هدف از انجام این پایان‌نامه، مطالعه تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل‌سازی عددی است. بدین منظور ابتدا با در نظر گرفتن شکستگی منفرد با زبری متغیر، دبی جریان عبوری با مدل‌سازی عددی و با استفاده از معیار بارتون - بندیس تعیین و نتایج حاصل با

¹ Orientation

² Frequency

³ Trace length

⁴ Hydraulic Aperture

⁵ Discrete Fracture Network

نتایج قانون کوپیک و سایر مدل‌های تجربی مقایسه و با نتیجه مطالعات آزمایشگاهی اعتبار سنجی می‌شود. سپس با در نظر گرفتن شبکه شکستگی‌ها تأثیر پارامتر هندسی زبری سطح درزه بر رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از نرم‌افزار UDEC و 3DEC مطالعه و نتایج حاصل ارزیابی می‌شود. بدین منظور توده‌سنگ درزه‌دار محور سنندج - همدان به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده و با استفاده از مفهوم شبکه‌های شکستگی مجزا (DFN) هندسه توده‌سنگ شبیه‌سازی شده و رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ با مدل‌سازی عددی اجزاء مجزا مطالعه می‌شود.

۱-۴ - ضرورت مسئله

در پروژه‌های مهندسی بررسی تأثیر شکستگی‌ها بر نفوذپذیری دارای اهمیت قابل توجهی است. همچنین بررسی جریان سیال به‌منظور کنترل و نظارت بر زهکشی، تخمین بار هیدرولیکی اعمال شده بر سازه‌های مهندسی، نشست ساختگاه سازه، ذخیره‌سازی نفت و گاز در مخازن طبیعی، انباشت مواد رادیواکتیو در زیرزمین، استحصال انرژی زمین‌گرمایی و ... دارای اهمیت به‌سزایی می‌باشد. به عنوان مثال در شهرهای واشنگتن و هانورد امریکا برای تعیین مکان دفع زباله‌های هسته‌ای بررسی شکستگی‌های محدوده‌ی موردنظر، مورد توجه جدی قرار گرفته است. زیرا این آلودگی‌ها در بلندمدت می‌تواند از طریق شکستگی‌ها و توسط جریان‌های آب زیرزمینی به سطح زمین و زیستگاه انسان منتقل گردند. همچنین در حفاری‌های بزرگ نزدیک سطح زمین تغییر در فشار سیال داخل شبکه‌ی شکستگی‌ها ممکن است نقش مهمی را در کنترل پایداری ساختارها داشته باشد (Ranjith, 2000).

با توجه به نقش برجسته شبکه درزه و شکستگی‌ها در انتقال سیال، مطالعه تأثیر هر یک از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها به‌منظور بررسی دقیق جریان سیال ضروری می‌باشد. زبری سطح درزه یکی از ویژگی‌های توده‌سنگ می‌باشد که علی‌رغم مطالعات متعدد، نیاز به مطالعه بیشتر در این زمینه به‌وضوح احساس می‌شود. لذا در این تحقیق به‌منظور درک همه‌جانبه و منسجم رفتار سیال در طی عبور از مجاری ناپیوستگی‌های سنگی نقش این پارامتر در رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار

مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین با در دست داشتن یک مدل رفتاری (معیار بارتون - بندیس) که بیانگر تأثیر زبری سطح درزه در جریان سیال می‌باشد، برآورد صحیح‌تری از رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ درزه‌دار امکان‌پذیر می‌شود.

۱-۵- سوابق تحقیق

در طی سالیان گذشته برای مطالعه‌ی رفتار هیدرومکانیکی شبکه‌ی شکستگی‌ها، زبری دیواره ناپیوستگی در مدل‌سازی عددی مورد توجه قرار نمی‌گرفت و سطح شکستگی را صاف فرض می‌کردند و بدین منظور از قانون کوبیک (قانون کوبیک برای تنش‌های نرمال پایین کاربرد دارد) برای بررسی جریان سیال استفاده می‌کردند (Louis, 1969). برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ مطالعات گوناگونی برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر روی جریان عبوری از درزه انجام گرفت. در این راستا با توجه به اهمیت مطالعه‌ی تأثیر پارامتر زبری سطح درزه در میزان جریان عبوری از درزه‌ها، ویترسون^۱ با اعمال یک ضریب کاهش به معادله‌ی کوبیک، تأثیر این پارامتر در میزان آب عبوری از درزه را مورد بررسی قرار داد (Louis, 1969). افراد مختلف نظیر بارتون برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه در کیفیت جریان آب از درزه‌ها، توان بازشدگی را در قانون کوبیک تغییر دادند و بسته به شرایط مطالعه، ضرایب یا روابط خاصی ارائه داده‌اند. بارتون و بندیس برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه در میزان دبی آب عبوری از درزه‌ها، با استفاده از مفهوم JRC، میزان پارامتر بازشدگی درزه را در قانون کوبیک تغییر دادند (Barton et al., 1985).

جی‌یانگ (Yang, 2001) در سال ۲۰۰۱ با بیان رویکرد جدیدی، تأثیر زبری سطح درزه بر رفتار هیدرومکانیکی درزه‌های سنگ را مورد بررسی قرار داد و از آنالیز بعد فرکتال^۲ برای مدل‌سازی زبری سطح درزه استفاده کرد.

جوادی و همکاران (Jvadi et al., 2010) براساس نتایج شبیه‌سازی، مدل جدیدی برای جریان سیال

¹Withersoon

² Fractal Dimension

غیرخطی میان شکستگی‌های زبر پیشنهاد دادند. آنها از نرم‌افزار FLUENT برای مدل‌سازی سطح زبری درزه استفاده کردند که در نهایت نتایج خروجی نرم‌افزار مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است.

براون (Brown, 1987) برای شبیه‌سازی زبری سطح درزه از بعد فرکتال توپوگرافی سطح درزه استفاده کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ایشان نشان می‌دهد که دبی جریان واقعی بین سطوح زبر ۷۰-۹۰٪ دبی جریان بین سطوح صاف و موازی است.

روزعلی (Roozali et al., 2014) پس از انجام آزمایشات تجربی دریافت که با افزایش فشار آب، حجم جریان آب ۵ برابر افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش تنش نرمال، جریان آب رابطه معکوس با زبری درزه خواهد داشت. در سطح تنش بالا، JRC بیشتر باعث افزایش جریان می‌شود.

خلاصه و جمع‌بندی مطالعات انجام گرفته توسط محققان مختلف در زمینه تأثیر زبری بر دبی جریان در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱: مطالعات انجام گرفته در زمینه تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان بر حسب زمان انجام

موضوع تحقیق	محقق
بررسی آزمایشگاهی تأثیر میکروسکوپی پستی و بلندی سطح درزه بر نرخ جریان (Lomitze, 1951)	لومیت (۱۹۵۱)
تغییر نرخ جریان بین دو صفحه موازی بر حسب تنش بارگذاری (Iwai, 1976)	ایوای (۱۹۷۶)
تأثیر بازشدگی متغییر شکستگی بر نرخ جریان و اصلاح قانون کویک برای سطوح زبر	ویترسون و ایوای (۱۹۸۰)
بررسی آنالیز حساسیت تنش نرمال و زبری سطح درزه بر نرخ جریان (Tsang et al., 1981)	تسانگ و ویترسون (۱۹۸۱)
تأثیر JRC و JCS بر نرخ جریان (Barton et al., 1983)	بارتون و بندیس (۱۹۸۳)
بررسی تجربی وابستگی نرخ جریان بر زبری سطح درزه و بازشدگی سینوسی (Zimmerman, 1996)	زیمرن (۱۹۹۶)
تأثیر تنش بر بازشدگی هیدرولیکی متغیر و نرخ جریان سیال (Baghbanan, 2008)	باغبانان (۲۰۰۸)
تأثیر زبری ثابت و تنش نرمال متغیر بر نرخ جریان (Min et al., 2011)	کی بوک مین و استفانسون (۲۰۱۱)
بررسی تجربی تأثیر زبری متغیر بر جریان آب و تعیین رابطه تجربی با استفاده از شبکه عصبی در مقیاس شکستگی منفرد (Roozali et al., 2014)	روزعلی و حسینی (۲۰۱۴)

۱-۶- روش تحقیق

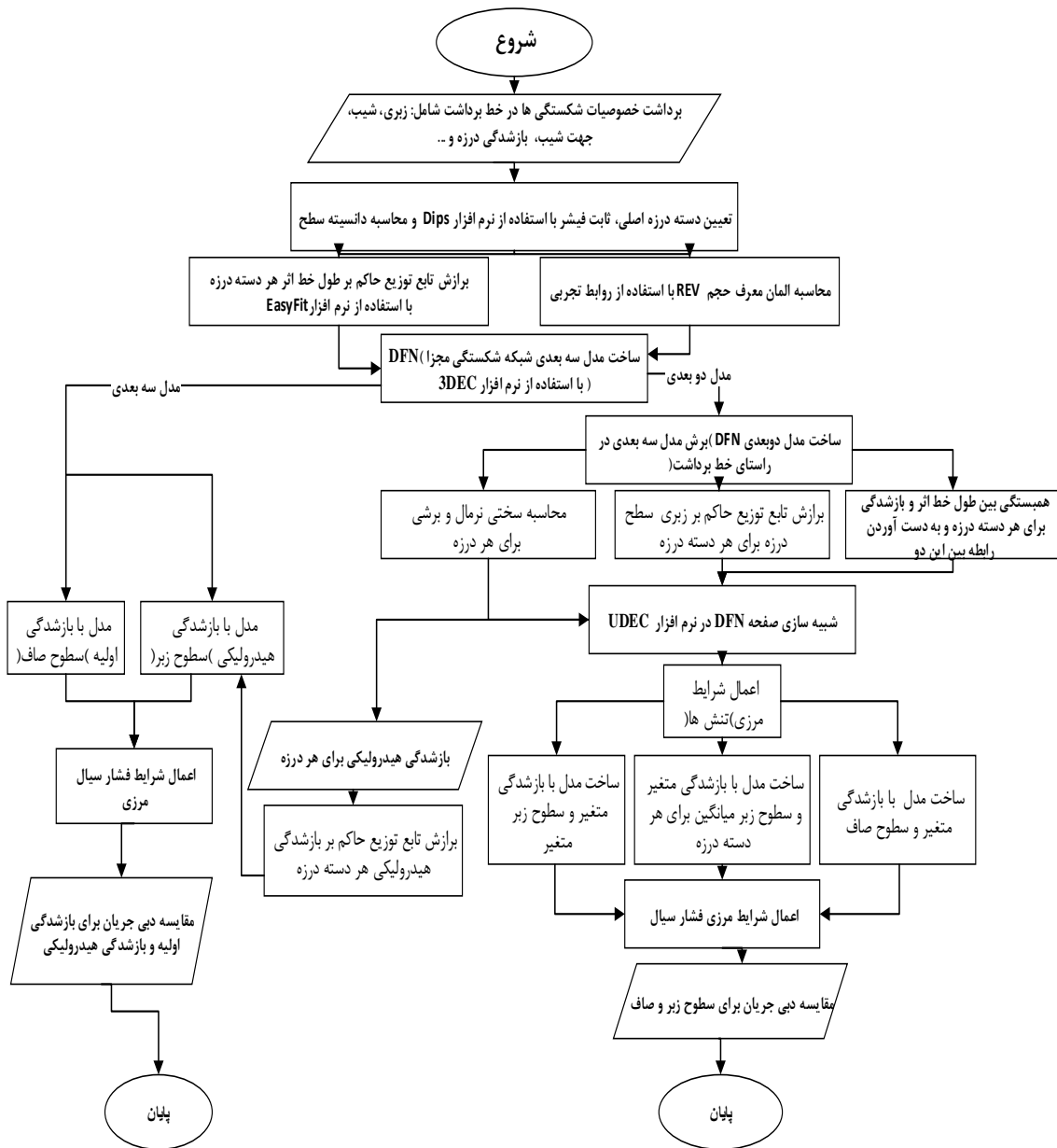
در مطالعات مختلف انجام شده، زبری سطح درزه به صورت اعمال ضریب در قانون کویک، تغییر توان بازشدگی در قانون کویک و یا تغییر در میزان بازشدگی درزه در نظر گرفته شده است. در این مطالعه

برای تأثیر زبری سطح درزه از مدل رفتاری بارتون - بندیس استفاده می‌شود که تأثیر زبری را به صورت کاهش بازشدگی درزه در نظر می‌گیرد.

مطالعه تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان در دو حالت شکستگی منفرد و شبکه شکستگی، با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام می‌گیرد. بدین منظور برای مدل‌سازی شکستگی منفرد در نرم‌افزار UDEC، با استفاده از معیار بارتون - بندیس زبری سطح درزه مطابق با خصوصیات نمونه آزمایشگاهی مدل‌سازی و سپس با نتایج (دبی جریان) نمونه آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود و در ادامه با روابط تجربی مقایسه می‌شود.

در ادامه این تحقیق تحلیل عددی تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان عبوری از آن در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده است. سپس با استفاده از مفهوم شبکه‌ی شکستگی مجزا، مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی DFN واقعی از توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه که در منطقه سنندج - همدان قرار دارد، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC ساخته شده است و در نهایت دبی جریان عبوری از مدل دوبعدی DFN در سه حالت درزه‌های صاف، درزه‌های با زبری میانگین و درزه با زبری متغیر در نرم‌افزار UDEC محاسبه و سپس به صورت کیفی و کمی باهم مقایسه شده‌اند و همچنین برای مدل سه‌بعدی دبی جریان در دو حالت مدل با بازشدگی مکانیکی و مدل با بازشدگی هیدرولیکی در نرم‌افزار 3DEC محاسبه و مقایسه شده‌اند.

همچنین مراحل انجام تحقیق جهت بررسی تأثیر زبری بر جریان سیال در شبکه شکستگی در فلوچارت شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: فلوچارت مراحل انجام پایان نامه

۱-۷- ساختار گزارش

این پایان‌نامه در ۶ فصل تهیه و تدوین شده است. در فصل اول با عنوان مقدمه، کلیاتی در مورد جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار، هدف و ضرورت از انجام پایان‌نامه، سابقه تحقیق، روش‌های انجام و ساختار تحقیق توضیح داده شده است.

در فصل دوم پارامترهای تأثیرگذار بر دبی جریان سیال در شکستگی منفرد توضیح داده شده است که زبری سطح درزه از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار محسوب می‌شود. در پایان این فصل روش‌های تجربی مختلف تأثیر زبری سطح درزه بر جریان عبوری از شکستگی منفرد به صورت مفصل توضیح داده شده است.

در فصل سوم به مدل‌سازی زبری سطح درزه شکستگی منفرد پرداخته شده است. برای مدل‌سازی شکستگی منفرد نرم‌افزار UDEC مورد استفاده قرار گرفته که در این نرم‌افزار برای بررسی تأثیر زبری بر جریان آب عبوری از درزه، از مدل رفتاری بارتون - بندیس استفاده شده است. برای این منظور مدل دوبعدی نمونه آزمایشگاهی که داده‌های آن از یک رساله دکتری برگرفته شده، تهیه شده و با نتایج این نمونه آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است و همچنین در پایان فصل مدل دوبعدی با روابط تجربی که در فصل دو تفسیر شده‌اند، مقایسه شده است.

در فصل چهارم تأثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها در مقیاس شبکه شکستگی و برای توده‌سنگ درزه‌دار بررسی شده است. در این فصل به نحوه برداشت ضریب زبری سطح درزه منفرد و روش‌های مختلف تخمین ضریب زبری پرداخته شده است. روش JRC یکی از کاربردی‌ترین روش‌های محاسبه ضریب زبری سطح درزه است، که در این فصل به تفصیل، روش‌های تخمین این پارامتر بیان شده است. همچنین توصیف هندسی توده‌سنگ با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا (DFN) انجام گرفته و نحوه تولید مدل‌های DFN تشریح شده است. در پایان فصل مطالعات انجام شده برای تاثیر زبری در قالب مدل‌های DFN بیان گردیده است.

در فصل پنجم مدل‌های DFN واقعی از منطقه مورد مطالعه در محور جاده سنندج - همدان ساخته

شده است. خصوصیات درزه‌ها با استفاده از روش خط برداشت، برداشت شده و دسته درزه‌های اصلی به وسیله نرم‌افزار Dips مشخص شده است. در ادامه با به‌کارگیری نرم‌افزارهای آماری، توابع توزیع حاکم بر هر دسته درزه، به آنها برازش شده و در نهایت DFN توده‌سنگ مورد مطالعه ساخته شده است. سپس مدل دوبعدی DFN در نرم‌افزار UDEC برای سطوح صاف، سطوح با زبری میانگین و سطوح با زبری متغیر شبیه‌سازی شده و در جهات مختلف فشار آب اعمال شده است. در پایان فصل، دبی آب برای مدل دوبعدی با حالت‌های ذکر شده در فوق، با هم مقایسه شده است.

در فصل ششم نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی در فصل سوم و همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی که در فصل پنجم برای درزه‌های صاف و زبر تشریح شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطرح شده است.

جریان آب در شکستگی

منفرد

۲-۱- مقدمه

کنترل آب ورودی به داخل حفریات زیرزمینی چه در مرحله احداث و چه در مرحله بهره‌برداری، اهمیت زیادی دارد. پیش‌بینی مؤثر جریان آب عبوری از توده‌سنگ درزه‌دار نیازمند بررسی دقیق پارامترهای هندسی توده‌سنگ می‌باشد. در توده‌سنگ درزه‌دار خصوصیات هر درزه متفاوت از دیگر درزه‌هاست و هر درزه تأثیر متفاوتی بر جریان آب عبوری دارد. لذا برای تحلیل عددی تأثیر هندسه توده‌سنگ بر جریان سیال عبوری لازم است که پارامترهای تأثیرگذار شکستگی منفرد بر جریان سیال بررسی شود و سپس تأثیر مجموعه درزه‌ها در قالب توده‌سنگ مورد بررسی قرار گیرد. خصوصیات هندسی شکستگی منفرد مانند بازشدگی دهانه‌ی درزه، زبری، جهت داری، پرشدگی درزه‌ها و ... بر رفتار جریان سیال تأثیرگذارند که زبری و بازشدگی دهانه درزه از مهم‌ترین پارامترها محسوب می‌شوند. در ادامه قانون کوبیک و پارامترهای تأثیرگذار بر آن و سپس پارامترهای تأثیرگذار هندسه ناپیوستگی بر دبی جریان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در نهایت زبری سطح درزه به‌عنوان پارامتر تأثیرگذار هندسه شکستگی و موضوع اصلی پایان‌نامه به تفصیل بحث خواهد شد و روابط تجربی که

تأثیر زبری سطح درزه را بر دبی جریان عبوری سیال مورد بررسی قرار داده‌اند، ارائه خواهد شد.

۲-۲- قانون کوبیک

جریان سیال در شکستگی منفرد، که از ساده‌سازی معادلات N-S (ناویر - استوکس) برای جریان سیال ویسکوز میان دو صفحه موازی با سطوح صاف و بازشدگی e (aperture) به دست می‌آید، قانون کوبیک در سنگ نامیده می‌شود.

اگر محل جهت‌داری شکستگی بر روی محور مختصاتی (x,y,z) قرار بگیرد، صفحه $x-y$ صفحه متوسط (دیواره شکستگی) و محور z بردار نرمال سطح شکستگی (نرمال عمود بر دیواره شکستگی) می‌باشد. معادله ۱-۲ از تعادل نیروهای اینرسی، نیروهای فشار، گرانش و نیروهای اصطکاکی در حجم بی‌نهایت کوچک به دست می‌آید. اگر جریان غیر متلاطم، غیر چرخشی، گذرا و آرام فرض شود و همچنین دیواره دو درزه صاف، موازی و مولفه سرعت در جهت نرمال z (v_z) برابر با صفر می‌باشند (Jing, 2007).

$$\left\{ \begin{array}{l} v \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = -b_x + g \frac{\partial h}{\partial x} \\ v \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} = -b_y + g \frac{\partial h}{\partial y} \\ -b_z + g \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad (1-2)$$

که $\frac{\partial h}{\partial z}$ گرادیان هیدرولیکی در جهات مشخص، b نیروی جسمی^۱، $\frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}$ مشتق دوم سرعت در جهت y ، g گرانش و v ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد.

اگر از دو معادله اول از رابطه ۱-۲ انتگرال گرفته شود به صورت معادله ۲-۲ نوشته می‌شود:

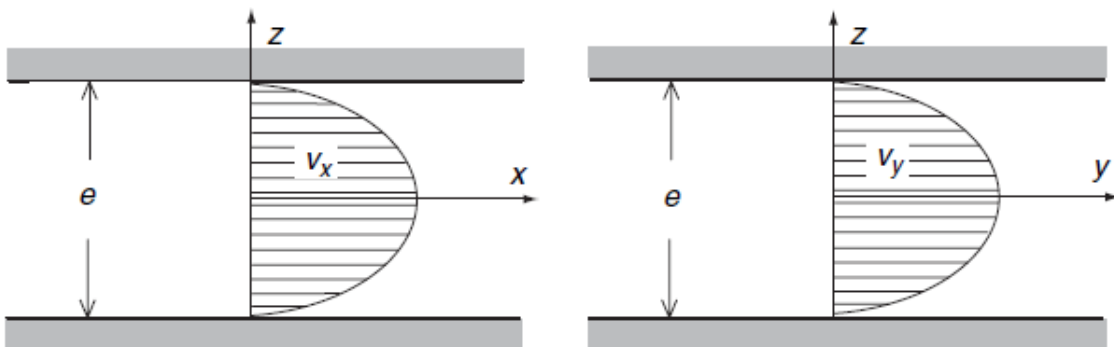
$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{g}{2v} \frac{\partial(h - b_x x)}{\partial x} z^2 + c_1 z + c_2 \\ v_y = \frac{g}{2v} \frac{\partial(h - b_y y)}{\partial y} z^2 + c_3 z + c_4 \end{array} \right. \quad (2-2)$$

در صورت استفاده از شرایط مرزی $v_x = v_y = 0 \mid_{z=\pm e/2}$ ، ثابت‌های انتگرال c_i ($i=1,2,3,4$) می‌توان به

¹Body force

معادله ۳-۲ رسید و شکل سهمی گون مولفه‌های v_x و v_y به صورت شکل ۱-۲ خواهد بود (Jing, 2007).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{g}{2\nu} \frac{\partial(h-b_x x)}{\partial x} \left[z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \\ v_y = \frac{g}{2\nu} \frac{\partial(h-b_y y)}{\partial y} \left[z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \end{array} \right. \quad (3-2)$$



شکل ۱-۲: توزیع سهمی گون سرعت جریان در شکستگی منفرد (Jing, 2007)

زمانی که صفحات x و y افقی باشند معادله ۳-۲ به صورت معادله ۴-۲ خلاصه می شوند.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{g}{2\nu} \frac{\partial h}{\partial x} \left[z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \\ v_y = \frac{g}{2\nu} \frac{\partial h}{\partial y} \left[z^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 \right] \end{array} \right. \quad (4-2)$$

معادلات ۳-۲ و ۴-۲، معادلات رینولدز برای جریان آرام بین دو صفحه موازی با دهانه بازشدگی e

(بازشدگی هیدرولیکی) می باشند. مولفه سرعت متوسط \bar{v}_x و \bar{v}_y از جریان بین دو صفحه موازی با

انتگرال گیری از معادله ۵-۲ در جهت z با بازشدگی e به دست می آید.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_x = \frac{1}{e} \int_{-e/2}^{e/2} v_x dz = -\frac{ge^2}{12\nu} \frac{\partial(h-b_x x)}{\partial x} \\ \bar{v}_y = \frac{1}{e} \int_{-e/2}^{e/2} v_y dz = -\frac{ge^2}{12\nu} \frac{\partial(h-b_y y)}{\partial y} \end{array} \right. \quad (5-2)$$

مقدار دبی در جهات x و y ، از حاصلضرب سرعت متوسط (معادلات ۵-۲) در بازشدگی به دست می آید

و به صورت معادلات ۶-۲ قابل بیان است:

$$\left[\begin{array}{l} q_x = e\bar{v}_x = -\left(\frac{ge^3}{12v}\right) \frac{\partial(h - b_x x)}{\partial x} \\ q_y = e\bar{v}_y = -\left(\frac{ge^3}{12v}\right) \frac{\partial(h - b_y y)}{\partial y} \end{array} \right. \quad (۶-۲)$$

سهولت عبور جریان سیالات از داخل شکستگی‌های توده‌سنگ را نفوذ پذیری می‌نامند و واحد آن m^2 می‌باشد. مقدار داخل پرانتز اول در معادله ۶-۲ انتقال‌پذیری^۱ (T) شکستگی نامیده می‌شود (معادله ۷-۲). همچنین از تقسیم انتقال‌پذیری بر بازشدگی، هدایت هیدرولیکی^۲ (K) به دست می‌آید (معادله ۸-۲).

$$T = \frac{ge^3}{12v} \quad (۷-۲)$$

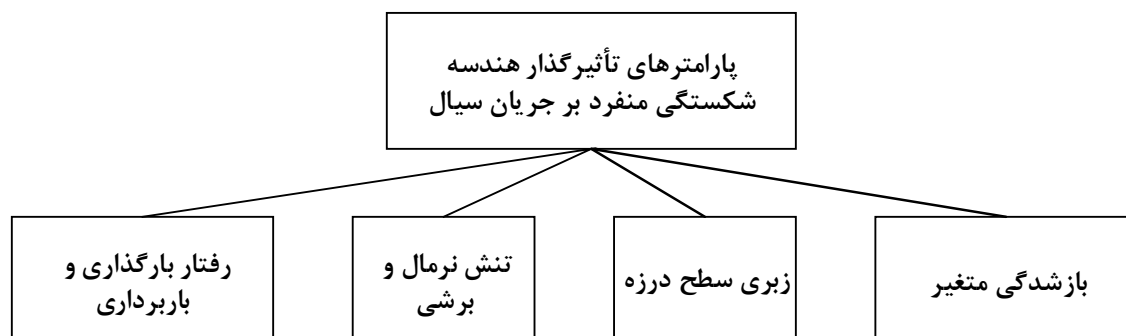
$$K = \frac{ge^2}{12v} \quad (۸-۲)$$

۲-۳- پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال در شکستگی منفرد

فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده جریان آب میان درزه‌ی منفرد در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، که در ادامه تشریح شده‌اند.

^۱ Transmissivity

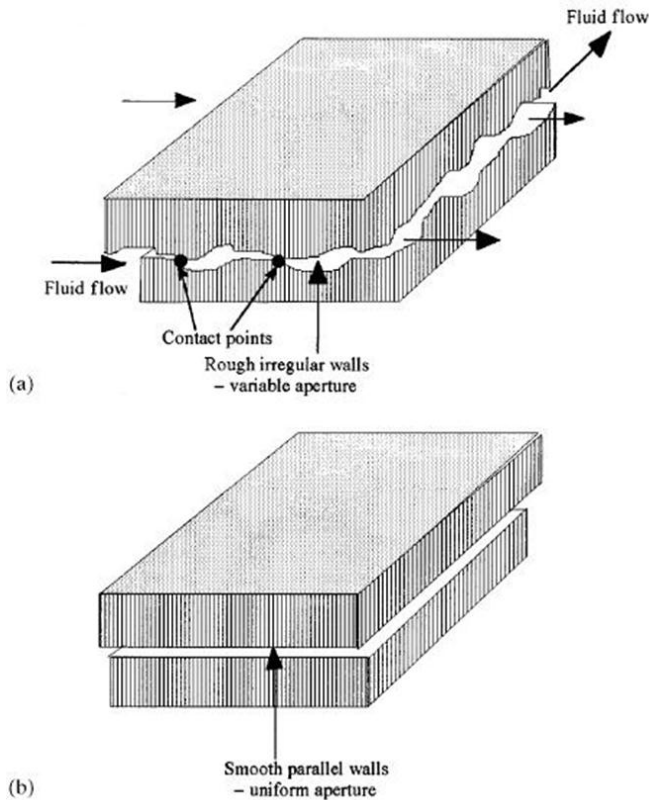
^۲ Hydraulic Conductivity



شکل ۲-۲: پارامترهای تأثیرگذار هندسه شکستگی منفرد بر جریان سیال برگرفته از (Indraratna et al, 1999)

۲-۳-۱- بازشدگی متغیر

در بیشتر مطالعات گذشته، جریان سیال داخل درزه منفرد به صورت جریان داخل لوله و کانال شبیه‌سازی می‌شد که تغییر بازشدگی درزه مورد توجه قرار نمی‌گرفت. معمولاً شکستگی‌ها، زبر و نامنظم با دهانه‌های بازشدگی متغیر هستند. بازشدگی متغیر هر شکستگی، پارامتر کلیدی برای تعیین ویژگی‌های جریان عبوری از آن درزه می‌باشد. اما آنجا که اندازه‌گیری بازشدگی برای یک شکستگی که دیواره‌های آن در چندین نقطه با هم برخورد داشته‌اند، بسیار مشکل است (شکل ۲-۳)، معمولاً در مدل‌سازی‌ها، درزه را صاف با صفحات موازی فرض می‌کنند (Sean, 2000; ITASCA, 2011).



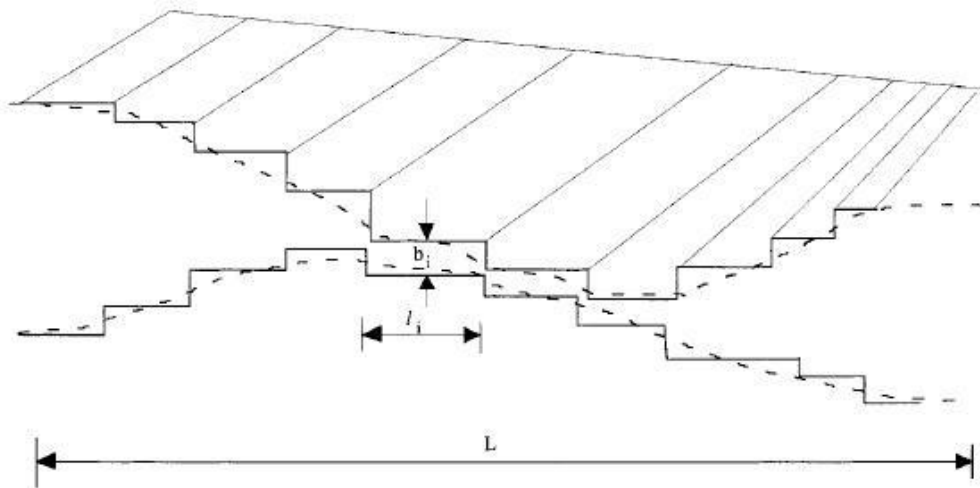
شکل ۳-۲: جریان میان شکستگی منفرد: (a) شکستگی طبیعی، (b) شکستگی ایده‌آل

(Indraratna et al., 1999)

در شکستگی‌های طبیعی، انحناهایی (بی‌منظمی طبیعی) که در طول درزه به طول L وجود دارد را می‌توان به بخش‌های کوچک‌تری با دیواره‌هایی با صفحات صاف تقسیم کرد (شکل ۳-۲). جریان کل عبوری از مجموع این بخش‌ها از رابطه‌ی ۳-۲ به دست می‌آید که شکل دیگری از قانون کوبیک برای سطوح صاف است:

$$Q = \sum_{i=1}^N J \frac{\gamma}{12\mu} b_i^3 l \quad (3-2)$$

که N تعداد بخش‌ها، J گرادیان هیدرولیکی، l طول بخش‌ها، b_i بازشدگی بخش‌ها، μ ویسکوزیته دینامیکی، γ وزن مخصوص سیال می‌باشد.



شکل ۲-۴: مدل مفهومی برای درک بازشدگی متغیر که طول درزه \$L\$ به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شده

(Indraratna et al., 1999)

۲-۳-۲- تأثیر تنش نرمال و برشی بر روی بازشدگی

تغییرات در بازشدگی ناپیوستگی‌ها ناشی از تغییر تنش است. فرض می‌شود ماتریکس سنگ ایزوتروپ و الاستیک خطی باشد و از قانون هوک تبعیت کند. رابطه تنش-بازشدگی از فرمول‌های زیر تبعیت می‌کند و بازشدگی ناپیوستگی (\$e_t\$) در هر زمانی از رابطه ۲-۱۰ پیروی می‌کند (Indraratna et al., 1999):

$$e_t = e_0 \pm \delta_n \quad (۲-۱۰)$$

که \$e_0\$ بازشدگی در زمان \$t=0\$، \$e_t\$ بازشدگی در زمان \$t\$، \$\delta_n\$ اندازه‌ی تغییر بازشدگی (تغییرشکل نرمال) در بازه زمانی \$t\$ می‌باشد و در رابطه ۲-۱۱ تعریف شده است.

رابطه مولفه‌های تغییرشکل برشی و نرمال به ترتیب با تنش عمودی و افقی وارده بر ناپیوستگی، توسط آقایان براون و برایی (Indraratna et al., 1999) به دست آمده است که در رابطه ۲-۱۱ و ۲-۱۲ نشان داده شده است:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n} [\sigma_1 \cos \beta + \sigma_3 \sin \beta] \quad (11-2)$$

$$\delta_\tau = \frac{1}{k_s} [\sigma_3 \cos \beta + \sigma_1 \sin \beta] \quad (12-2)$$

σ_1 : تنش عمودی وارده بر ناپیوستگی (N/m^2)

σ_3 : تنش افقی وارده بر ناپیوستگی (N/m^2)

K_n : سختی نرمال ناپیوستگی (N/m^2)

K_s : سختی برشی ناپیوستگی (N/m^2)

β : جهت داری درزه (درجه):

δ_n : بازشدگی قائم ناپیوستگی (m)

δ_τ : تغییر شکل مماسی ناپیوستگی (m)

با توجه به این که فشار آب به صورت عمود بر درزه وارد می شود پس بازشدگی عمودی درزه تحت تأثیر قرار می گیرد و معادله ۱۲-۲ به صورت معادله ۱۳-۲ اصلاح می گردد:

$$\delta_n = \frac{1}{k_n} [\sigma_1 \cos \beta + \sigma_3 \sin \beta - p_w] \quad (13-2)$$

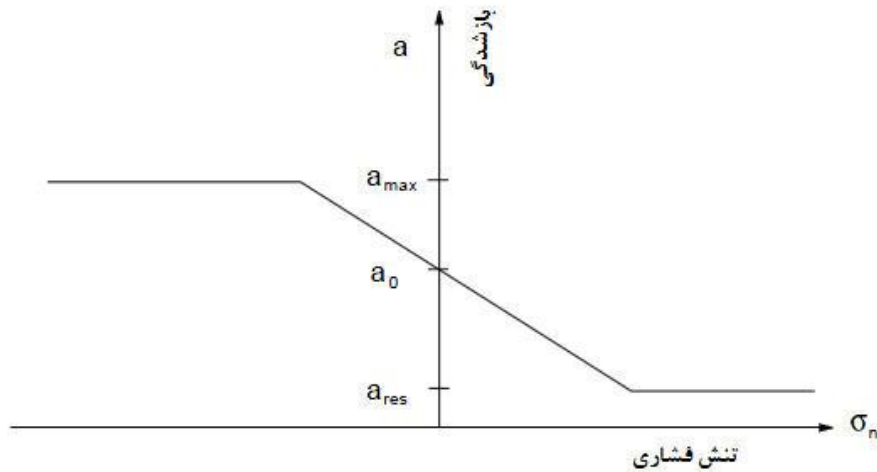
که P_w فشار آب داخل ناپیوستگی (N/m^2) و δ_τ بدون تغییر باقی می ماند.

۲-۳-۱-۲- انواع بازشدگی

الف) بازشدگی اولیه: بازشدگی درزه که تنش نرمال بر آن واقع نمی گردد و در آن مقدار تنش برابر صفر است، بازشدگی اولیه نامیده می شود (بازشدگی a_{max} در شکل ۲-۵).

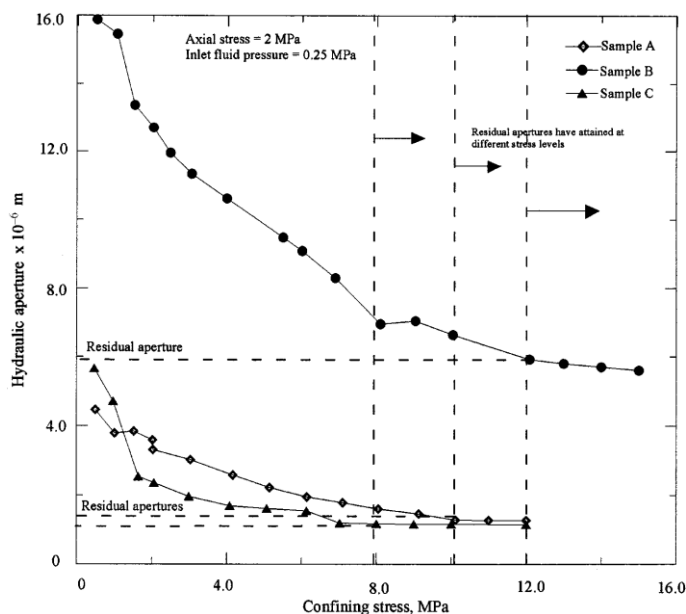
ب) بازشدگی ثانویه: پس از هر بارگذاری و افزایش تنش بر روی درزه، بازشدگی کاهش می یابد، این تغییرات تا زمانی که با افزایش تنش، بازشدگی تغییر نکند ادامه می یابد. اندازه بازشدگی که بعد از این

سطح از تنش باقی می ماند، بازشدگی باقی مانده نامیده می شود (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲: رابطه تنش نرمال درزه با بازشدگی درزه (ITASCA, 2011)

بازشدگی باقی مانده تابعی از شرایط تنش داخلی، خصوصیات کانی شناسی، سنگ شناسی و هندسه محیط است (Ranjith, 2000) و بسته به بازشدگی اولیه درزه، بازشدگی باقی مانده برای انواع سنگها متفاوت می باشد بدین معنی که هر سنگ بازشدگی باقی مانده متفاوتی دارد (شکل ۶-۲).



شکل ۲-۶: بازشدگی باقی‌مانده برای نمونه گرانیت‌های مختلف با شکستگی منفرد (Indraratna et al., 1999)

ناپیوستگی‌های توده‌سنگ درزه‌دار معمولاً دیواره‌های زبر و ناهمواری دارند و اندازه بازشدگی اولیه در طول ناپیوستگی مقدار ثابتی نیست. در تحلیل مسائل هیدرولیکی با توجه به نقش اساسی ناپیوستگی‌ها، از اندازه بازشدگی مؤثر (هیدرولیکی) استفاده می‌شود.

(ج) بازشدگی مؤثر (هیدرولیکی)

اندازه دهانه‌ای که هدایت هیدرولیکی را به‌طور مناسب بیان می‌کند تحت عنوان دهانه هیدرولیکی شکستگی شناخته می‌شود و برای محاسبه آن روش‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

الف) استفاده از آنالیز برگشتی قانون کوپیک

برای محاسبه بازشدگی هیدرولیکی، اندازه دبی جریان به‌دست آمده از تست لوژان را در قانون کوپیک (معادله ۱-۲) جایگزین کرده و مقدار دهانه هیدرولیک (e) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

(معادله ۲-۱۴):

$$e = \sqrt[3]{\frac{12v l Q}{\Delta h g w}} \quad (14-2)$$

با استفاده از این روش می‌توان تأثیر پارامترهای هندسه شکستگی شامل: زبری سطح درزه و انحنا درزه را در دبی جریان سیال مورد بررسی قرار داد.

ب) استفاده از رابط تجربی و معیار بارتون - بندیس

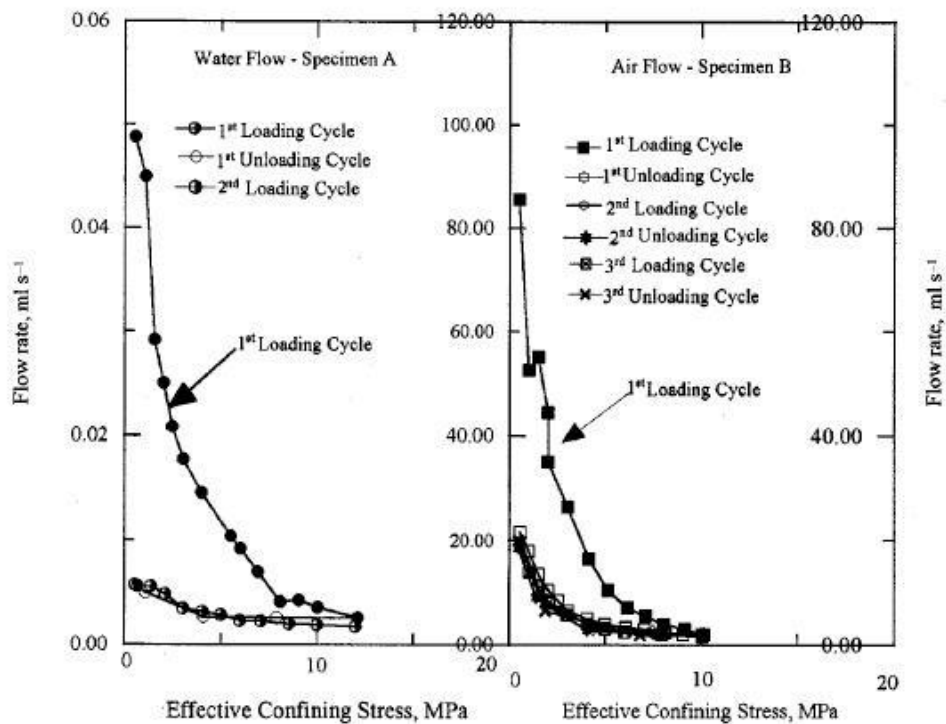
بارتون (۱۹۸۷) رابطه تجربی ۱۵-۲ را ارائه داد که براساس زبری JRC و بازشدگی مکانیکی E می‌توان بازشدگی هیدرولیکی e را به دست آورد (معادله ۱۵-۲).

$$e = \frac{E^2}{JRC^{2.5}} \quad (15-2)$$

۲-۳-۳- تأثیر باربرداری و بارگذاری

از جمله پارامترهای مؤثر بر تغییرات جریان سیال در توده سنگ، رفتار بارگذاری و باربرداری است. شکل ۲-۷ نشان می‌دهد که کاهش نرخ جریان با افزایش فشار محصورکننده، برای مرحله اول بارگذاری روند قابل توجهی دارد و به تدریج با کاهش این فشار نرخ جریان افزایش می‌یابد و زمانی که تنش محصورکننده به ۱۰ MPa می‌رسد، دیگر تغییری در نرخ جریان اتفاق نمی‌افتد. در چرخه دوم و سوم بارگذاری و باربرداری، تغییرات قابل توجهی در حجم جریان رخ نمی‌دهد، زیرا بازشدگی شکستگی‌ها در چرخه ۲ و ۳ به بازشدگی باقی‌مانده نزدیک شده‌اند و در نتیجه اتساع بر اثر باربرداری و تراکم ناشی از بارگذاری قابل توجه نیست. به عبارت دیگر کرنش برگشت ناپذیر (پلاستیک) در بارگذاری بحرانی رخ خواهد داد و بعد از بارگذاری بحرانی نفوذپذیری کاهش می‌یابد. کرنش برگشت ناپذیر در نتیجه تخریب حاصل از کشیدن پستی و بلندی‌های سطح درزه (زبری) بر روی هم ایجاد می‌شود. پس در اثر بارگذاری و باربرداری سطح برخورد پستی و بلندی‌های دیواره‌های درزه با

هم بیشتر می‌شود و به همین دلیل شیب تغییرات بازشدگی در سیکل اول بیشتر می‌باشد و در سیکل‌های بعدی کاهش می‌یابد تا به بازشدگی باقی‌مانده برسد (Indraratna et al., 1999). اهمیت به‌سزای این ویژگی در معیار بارتون - بندیس منکس شده است (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷: تأثیر بارگذاری و باربرداری بر روی ویژگی‌های جریان (Indraratna et al., 1999)

۲-۳-۴- تأثیر زبری سطح درزه

در گذشته محققان معمولاً جریان میان ناپیوستگی منفرد را توسط قانون کوپیک و براساس جریان آرام میان صفحات موازی، بیان می‌کردند. در ادامه این تحقیقات ویترسپون و ایوا^۱ برپایه نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشنهاد کردند که برای درزه‌های زبر، در تنش محصورکننده‌ی پایین می‌توان از قانون کوپیک استفاده کرد (Witherspoon, 1980). در حقیقت درزه‌های طبیعی، زبر هستند و

¹ Witherspoon and Iwai,

به‌موجب آن باعث کاهش هد جریان سیال می‌شود. افرادی همچون لوییز (۱۹۷۶) و براون (۱۹۸۷) از تأثیر بسزای زبری بر جریان سیال، آگاهی داشتند و بدین خاطر به اصلاح قانون کوییک و تأثیر زبری در این قانون پرداختند که در ادامه به مرور و بررسی این مطالعات پرداخته خواهد شد.

لوییز^۱ معتقد است که می‌توان برای بررسی زبری سطح درزه از تئوری جریان درون مجرای لوله استفاده کرد. با افزایش زبری، هد جریان سیال کاهش می‌یابد و ضریب کاهش فشار سیال (λ) می‌تواند اثر زبری را نشان دهد که وابسته به عدد رینولدز (Re) و بازشدگی درزه می‌باشد. لوییز با انجام آزمایش دریافت که برای شکستگی سنگ، در شکستگی زبر، ضریب کاهش فشار سیال تابعی از عدد رینولدز (جریان آرام و متلاطم)، زبری درزه (K) و بازشدگی درزه (e) می‌باشد. برای درزه‌های صاف، ضریب کاهش فشار فقط تابعی از عدد رینولدز و بازشدگی درزه می‌باشد (معادله ۱۶-۲)

(Louis, 1976)

$$\lambda = f\left(R_e, \frac{k}{2e}\right) \quad (16-2)$$

که λ ضریب اصطکاک، Re عدد رینولدز، k زبری (ارتفاع ناهمواری سطح درزه) و e بازشدگی دهانه درزه می‌باشد.

از معادله ۱۶-۲ می‌توان دریافت که زبری سطح درزه (K) با کاهش فشار سیال رابطه مستقیم دارد و بازشدگی با آن رابطه معکوس دارد.

برای درزه‌های صاف ضریب کاهش فشار فقط تابعی از عدد رینولدز است. روابط بین نرخ جریان و ضریب کاهش فشار سیال برای زبری‌های مختلف و برای هر دو جریان آرام و متلاطم در جدول ۱-۲ آمده است (Thiel, 1989; Indraratna et al., 1999).

¹Louis

جدول ۱-۲: ضریب افت فشار سیال و نرخ جریان برای درزه منفرد و جریان های آرام و مختلط که تئوری

آن از مجرای لوله گرفته شده است (Thiel, 1989; Ranjith, 2000)

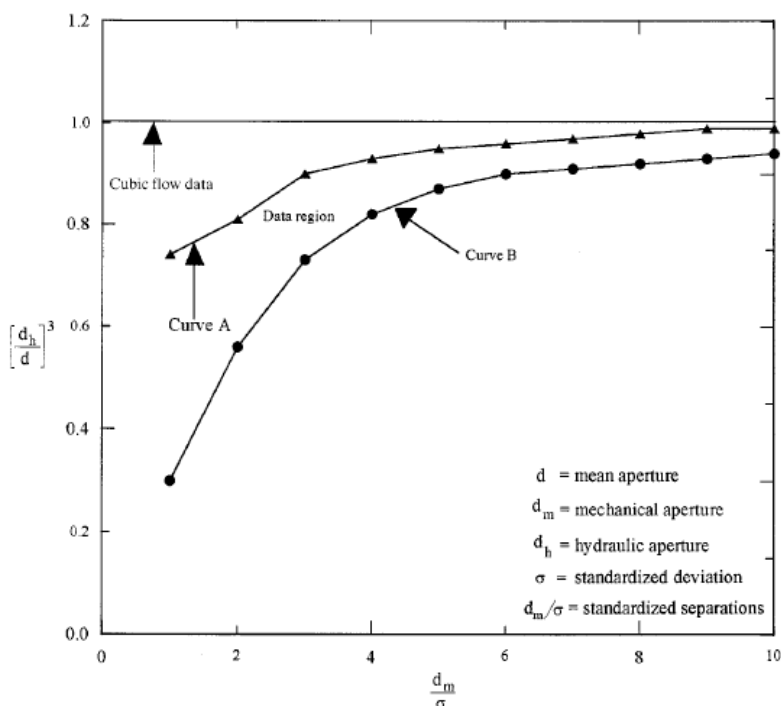
محقق	دبی جریان (q)	ضریب کاهش فشار سیال	نوع جریان
پویسنیل ^۱	$q = \frac{g}{12\nu} J e^3$	$\lambda = \frac{96}{R}$	آرام ^۲ زبری نسبی ^۳ $K/D_h \leq 0.033$
بلاسیوس ^۴	$q = \left(\frac{g}{0.079} \left(\frac{2}{\nu}\right)^{0.25} J e^3\right)^{4/7}$	$\lambda = 0.316 R^{-0.25}$	متلاطم ^۵ (جریان موازی ^۶)
نیکورادوس ^۷	$q = 4\sqrt{g} \left(\log \frac{3.7D_h}{k}\right) e^3 \sqrt{g}$	$\frac{1}{\lambda} = -2 \log \frac{k}{3.7D_h}$	متلاطم ^۵ (جریان موازی ^۶)
لوییز	$q = -\frac{g J e^3}{12\nu(1 + 8.8(k/D_h)^{1.5})}$	$\lambda = \frac{96}{R} (1 + 8.8(\frac{k}{D_h})^{1.5})$	آرام زبری نسبی $K/D_h > 0.033$
لوییز	$q = 4\sqrt{g} \left(\log \frac{1.9D_h}{k}\right) e^3 \sqrt{g}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k}{1.9D_h}$	متلاطم (جریان غیرموازی ^۸)

* K ارتفاع زبری ناهمواری سطح درزه، D_h بازشدگی اولیه دهانه درزه، e بازشدگی هیدرولیکی، J گرادیان هیدرولیکی و g شتاب گرانش می باشد.

مطالعات براون در زمینه تأثیر زبری بر روی جریان سیال در شکل ۲-۸ خلاصه شده است. در این شکل محور قائم دبی جریان آب (دبی جریان واقعی در سطوح زبر بر دبی جریان در قانون کوییک) و محور افقی دامنه‌ای از بازشدگی مکانیکی را نشان می‌دهد. براون به‌جای ترسیم مستقیم نرخ دبی جریان، نرخ $(\frac{d_h}{d})^3$ را در برابر بازشدگی‌های مکانیکی ترسیم کرد (d_h بازشدگی هیدرولیکی و d

- ¹ Poiseuille
- ² Laminar
- ³ Relative roughness
- ⁴ Blasius
- ⁵ Turbulent
- ⁶ Parall flow
- ⁷ Nikuradse
- ⁸ Nonparallel flow

بازشدگی میانگین). بدیهی است برای بازشدگی‌های بزرگ، انحراف از تئوری قانون کوبیک ناچیز است و در بازشدگی کم، دبی جریان واقعی ۴۰-۷۰٪ دبی جریان برای قانون کوبیک می‌باشد. همچنین طبق این نمودار می‌توان دریافت که در بازشدگی ثابت، هر چه زبری سطح درزه بیشتر شود بازشدگی هیدرولیکی کمتر و در نتیجه اختلاف بین دبی به‌دست آمده برای سطوح زبر با دبی جریان برای قانون کوبیک (سطح صاف) بیشتر می‌شود.



شکل ۲-۸: مقایسه نرخ جریان از قانون کوبیک با نرخ جریان به‌دست آمده برای سطوح زبر (Brown, 1987)

تا به این مرحله پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال و لزوم بررسی آن‌ها در شکستگی منفرد بررسی شد. در ادامه به‌دلیل اهمیت پارامتر ضریب زبری سطح درزه (JRC)، به تفصیل به بررسی تأثیر این پارامتر و روش‌های اندازه‌گیری آن پرداخته خواهد شد.

۴-۲- تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن

همانطور که اشاره شد بارتون زبری سطح درزه را با پارامتری به نام ضریب JRC تعریف کرده است. بارتون با انجام آزمایشات متعدد، پروفیلی به طول ۱۰ سانتی‌متر از زبری درزه با کلاس‌های استاندارد ده‌گانه ارائه داد. براین اساس، ضریب زبری (JRC) متناسب با پروفیلی که بیشترین شباهت را با زبری درزه داشته باشد، تعیین می‌شود. پروفیل‌های ده‌گانه و مقادیر ضریب زبری درزه در شکل ۹-۲ نمایش داده شده است.

	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	JRC = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20

شکل ۹-۲: پروفیل‌های استاندارد پیشنهاد شده توسط بارتون برای اندازه‌گیری ضریب زبری درزه

(Barton, 1973)

ضریب زبری سطح JRC مقداری بین صفر ۰ تا ۲۰ قرار دارد، به طوری که مقدار آن برای درزه صاف صفر و برای درزه زبر و خشن ۲۰ است.

علاوه بر روش مقایسه پروفیل‌های درزه با پروفیل‌های استاندارد (شکل ۹-۲)، روش‌های مختلفی نظیر استفاده از بیشترین دامنه زبر، کالیبره کردن با بازشدگی مکانیکی و هیدرولیکی درزه، روش تحلیلی

بر اساس توابع ریاضی و مدل‌های فراکتال نیز برای اندازه‌گیری JRC ارائه شده است. به‌عنوان مثال در روش استفاده از بیشترین دامنه زبر، بیشترین دامنه زبر (a) از پروفیلی بطول L، مقدار JRC با استفاده از رابطه ۱۷-۲ تعیین می‌گردد.

Description of joint	Standard joint profiles	JRC range
Smooth, planar: cleavage joints		0 - 2
Smooth, planar: tectonic joints		2 - 4
Undulating, planar: foliation joints		4 - 6
Rough, planar: tectonic joints		6 - 8
Rough, planar: tectonic joints		8 - 10
Rough, undulating: bedding joints		10 - 12
Rough, undulating: tectonic joints		12 - 14
Rough, undulating: relief joints		14 - 16
Rough, irregular: bedding joints		16 - 18
Rough, irregular: artificial tension		18 - 20

شکل ۱۰-۲: پروفایل‌های استاندارد سطح برای اندازه‌گیری ضریب زبری درزه (ISRM, 1978)

$$JRC = 400 \left(\frac{a}{L} \right) \quad (17-2)$$

در مطالعات مختلف برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر اساس قانون کوبیک تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. در این مطالعه‌ها سه رویکرد برای اعمال زبری سطح درزه در معادله کوبیک مدنظر قرار گرفته است. در رویکرد اول بسته به مقدار زبری سطح درزه، توان بازشدگی در معادله کوبیک مقداری کاهش داده شده است، در رویکرد دوم بسته به مقدار زبری سطح درزه، مقدار بازشدگی در معادله کوبیک کاهش داده شده است و در رویکرد سوم ضریبی که تابع زبری سطح درزه

است در معادله کوپیک اضافه شده است. در ادامه مطالعات انجام شده و روابط تجربی ارائه شده بر مبنای این رویکردها به ترتیب مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۴-۱- روابط تجربی بر مبنای کاهش توان بازشدگی

قانون کوپیک براساس تحلیل تئوری به‌دست آمده و برای استفاده از آن باید سطوح درزه را صاف در نظر گرفت یا توان بازشدگی درزه را کاهش داد که در زیر چندین رابطه تجربی ارائه‌شده برای این منظور، نشان داده شده است.

لومیت^۱ جهت مطالعه پستی و بلندی سطح درزه در مقیاس میکروسکوپی از صفحات شیشه استفاده کرد و معادله ۲-۱۹ را برای ضریب نفوذپذیری به‌دست آورد، که با جای‌گذاری در معادله ۲-۱۸ که همان قانون کوپیک است، دبی جریان به‌دست می‌آید (Jing, 2007):

$$q = beK \Delta h/L \quad (18-2)$$

$$K = \frac{ge^2}{12v} \left(1 + 17\left(\frac{R_t}{2e}\right)^{1.5}\right) \quad (19-2)$$

که $R_t = z_{max} - z_{min}$ از اندازه‌گیری زبری صفحات به‌دست می‌آید و z_{min} و z_{max} ماکزیمم و مینیمم ارتفاع بلندی^۲ سطح درزه، b عرض بازشدگی و k ضریب نفوذپذیری می‌باشد (Jing, 2007). لومیت با کاهش توان بازشدگی در رابطه بالا تأثیر پارامتر زبری را مورد بررسی قرار داد و همچنین لوییز^۳ رابطه جدیدی برای ضریب نفوذپذیری به‌دست آورده است که در زیر نشان داده شده است (معادله ۲-۲۰):

$$K = \frac{ge^2}{12v} \left(1 + 8.8\left(\frac{R_t}{2e}\right)^{1.5}\right) \quad (20-2)$$

¹ lomitze

² asperty

³ louis

همچنین بارتون و دی کوادروس^۱ پس از انجام آزمایشات متعدد دریافتند که تأثیر زبری بر نفوذپذیری با کاهش توان بازشدگی به شکل رابطه ۲-۲۱ تبدیل می‌شود (Barton and De, 1997):

$$K = \frac{ge^2}{12\nu} \left(1 + 20.5 \left(\frac{R_t}{2e}\right)^{1.5}\right) \quad (21-2)$$

۲-۴-۲- روابط تجربی بر مبنای کاهش بازشدگی

بارتون به منظور در نظر گرفتن اثر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری، زبری درزه را با ضریب زبری JRC در نظر گرفته و بین سه پارامتر بازشدگی مکانیکی (E)، بازشدگی مؤثر (بازشدگی هیدرولیکی) و ضریب زبری JRC رابطه تجربی ۲-۱۵ را ارائه داد:

بدیهی است که زبری باعث کاهش بازشدگی می‌شود و طبق رابطه ۲-۱۵ همیشه بازشدگی مؤثر (e) کمتر از بازشدگی مکانیکی می‌باشد. با قراردادن بازشدگی هیدرولیکی در قانون کوپیک عملاً اثر زبری درزه، در نظر گرفته می‌شود (معادله ۲-۶).

۲-۴-۳- روابط تجربی بر مبنای اعمال ضریب به معادله کوپیک

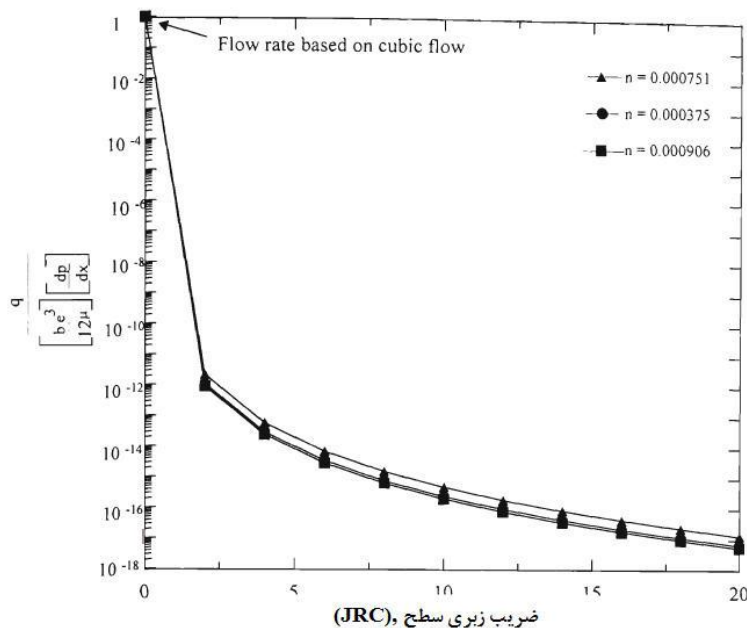
تیل^۲ برای اعمال تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن، ضریبی را به معادله کوپیک اضافه نموده و رابطه‌ای تجربی ارائه کرده است. ضریب مذکور تابعی از بازشدگی مکانیکی، طول درزه و JRC است. رابطه تجربی تیل براساس معادله کوپیک به شکل معادله ۲-۲۳ می‌باشد.

$$q = \frac{be^3}{12\mu} \left(\frac{E^3}{E^3 + nL^{1.5}JRC^{5.25}}\right) \left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (22-2)$$

که E بازشدگی مکانیکی درزه در تنش نرمال صفر، L طول درزه، b عرض بازشدگی، $\frac{dp}{dx}$ گرادیان تنش، e بازشدگی هیدرولیکی و μ ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد. مقدار ثابت n برای زبری‌های

¹ de Quadros
² Thiel

مختلف به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۷۵۱، ۰/۰۰۰۳۷۵ و ۰/۰۰۰۹۰۶ می باشد (Ranjith, 2000). منحنی جریان بر حسب JRC برای روش تجربی تیل در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است و بازشدگی مکانیکی در تنش نرمال صفر برابر با ۰/۰۱ mm است و به دلیل افزایش JRC نرخ جریان، کاهش چشم گیری پیدا کرده است.



شکل ۱۱-۲: نرخ جریان نرمال شده برای JRC های مختلف (Ranjith, 2000)

معادله ۲-۲۲ بیشتر در تونل هایی که تخمین سریع نرخ جریان میان شکستگی ها در سقف لازم است به کار می رود. برای این منظور شکستگی های محیط تونل برداشت می شود و درزه ها با پرفایل استاندارد مقایسه شده و مقدار JRC برای آن تخمین زده می شود و در مرحله ی بعد بازشدگی مکانیکی شکستگی ها را اندازه گیری می کنند. سپس با استفاده از فرمول های تجربی مقدار دبی جریان را تخمین می زنند.

۲-۵- جمع‌بندی

پیش‌بینی مؤثر جریان آب عبوری از شکستگی نیازمند بررسی دقیق پارامترهای هندسی شکستگی می‌باشد. پارامترهای هندسی شکستگی منفرد شامل: بازشدگی متغیر، زبری سطح درزه، رفتار بارگذاری و باربرداری و تنش‌های نرمال و برشی می‌باشد. اگر دیواره‌های درزه صاف فرض شود می‌توان از ساده‌سازی معادلات ناویر - استوکس برای جریان‌های آرام، غیرچرخشی و گذارا، استفاده کرد که قانون کوییک نامیده می‌شود. اما شکستگی‌های موجود در طبیعت عمدتاً زبر هستند و در صورتی که زبری سطح درزه در قانون کوییک تأثیر داده نشود، دبی جریان آب عبوری از شکستگی با خطا همراه خواهد بود.

در مطالعات مختلف برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر اساس قانون کوییک تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. در این فصل سه رویکرد برای اعمال زبری سطح درزه در معادله کوییک مرور شده است، که شامل: کاهش توان بازشدگی درزه، کاهش بازشدگی درزه و اعمال ضریب به قانون کوییک می‌باشد.

کلیه رویکردهای بالا فقط رفتار هیدرولیکی را مدنظر قرار داده‌اند در حالیکه در طبیعت شکستگی‌ها تحت اندرکنش هیدرومکانیکی قرار می‌گیرند و بازشدگی مؤثر درزه‌ها علاوه بر زبری سطح درزه شدیداً به میدان تنش (تنش نرمال و برشی و همچنین رفتار بارگذاری و باربرداری) وابسته است بنابراین برای تأثیر زبری سطح درزه نیاز به معیاری است که تغییرات بازشدگی تحت تأثیر مولفه‌های تنش و دیگر پارامترهای شکل ۲-۲ را مدنظر قرار دهد.

معیار بارتون - بندیس، رفتار هیدرومکانیکی درزه را طی سیکل‌های مختلف بارگذاری و باربرداری ارزیابی می‌کند و تغییرات پارامترهای مختلف نظیر بازشدگی، سختی نرمال، تغییرشکل برشی و ... را در گام‌های زمانی مختلف مدل‌سازی، محاسبه می‌کند. لذا به کارگیری این معیار در قالب روش‌های عددی اجزاء مجزا اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در فصل آینده مدل‌سازی عددی تأثیر زبری بر جریان سیال در شکستگی منفرد بر اساس این معیار انجام گرفته است.

۳- فصل سوم

مطالعه عددی تأثیر زبری

سطح درزه بر جریان سیال در

درزه منفرد

۳-۱- مقدمه

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، هدف از انجام این مطالعه بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ درزه‌دار است. همان‌گونه که در فصل دوم بحث شد، پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال در شکستگی منفرد، شامل: بازشدگی متغیر، زبری سطح درزه، تنش نرمال و برشی و رفتار بارگذاری و باربرداری می‌باشد.

در این فصل با استفاده از معیار بارتون - بندیس، تأثیر زبری سطح درزه بر رفتار هیدرومکانیکی درزه منفرد مطالعه شده و با نتایج مطالعات تجربی مختلف مقایسه خواهد شد و در نهایت با نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی می‌شود.

از آنجاکه معیار بارتون - بندیس، رفتار هیدرومکانیکی درزه را طی سیکل‌های مختلف بارگذاری و باربرداری ارزیابی کرده و تغییرات پارامترهای مختلف نظیر بازشدگی، سختی نرمال، تغییر شکل برشی،

اتساع و ... در گام‌های زمانی مختلف مدل‌سازی بروز می‌یابد، لذا به‌کارگیری این معیار در قالب روش‌های عددی اجزاء مجزا و در نتیجه نرم‌افزار UDEC اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

در نرم‌افزار UDEC، محیط توده‌سنگ متشکل از مجموعه بلوک‌های مجزا است و UDEC قابلیت بررسی و آنالیز جریان سیال میان شکستگی‌ها، برای سیستم بلوک‌های نفوذناپذیر را دارد. نرم‌افزار UDEC یک برنامه دوبعدی است که بر اساس روش اجزاء مجزا عمل می‌کند، که این روش به‌منظور بررسی رفتار تغییر شکل پذیری در توده‌سنگ درزه‌دار، توسعه داده شده است. در این روش توده‌سنگ به‌صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که توسط درزه‌ها تفکیک شده و امکان ایجاد تغییر شکل در امتداد آن وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود. تفاوت اصلی این روش با سایر روش‌ها، هندسه مدل است که توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌ها تعریف می‌شود. این نرم‌افزار قادر است جریان سیال درون ناپیوستگی‌ها و یا بخش‌های حفاری شده را شبیه‌سازی کند. در این حالت یک تحلیل هیدرومکانیکی صورت می‌گیرد که در آن قابلیت هدایت سیال در شکستگی‌ها به تغییر شکل مکانیکی و بازشدگی درزه‌ها بستگی دارد (Itasca Consulting Group Inc, 2000).

۳-۲- مدل رفتاری درزه بارتون - بندیس

زنجیره روابط تجربی برای تشریح تأثیر سطح زیر دیواره ناپیوستگی بر تغییر شکل و مقاومت ناپیوستگی، توسط آقای بارتون و بندیس توسعه داده شده‌اند (این روابط در قالب نرم‌افزار UDEC اجرا شده است). معیار درزه بارتون - بندیس ویژگی‌های زیر را در برمی‌گیرد (Itasca Consulting Group Inc, 2000):

۳-۲-۱- رفتار نرمال درزه

رفتار نرمال درزه توسط پارامترهای زیر کنترل می‌شود:

الف) محاسبه بازشدگی هیدرولیکی براساس زبری سطح درزه (JRC)

ب) برگشت پذیری^۱ ناشی از سیکل بارگذاری و باربرداری

ج) افزایش سختی نرمال ناشی از سیکل بارگذاری و باربرداری

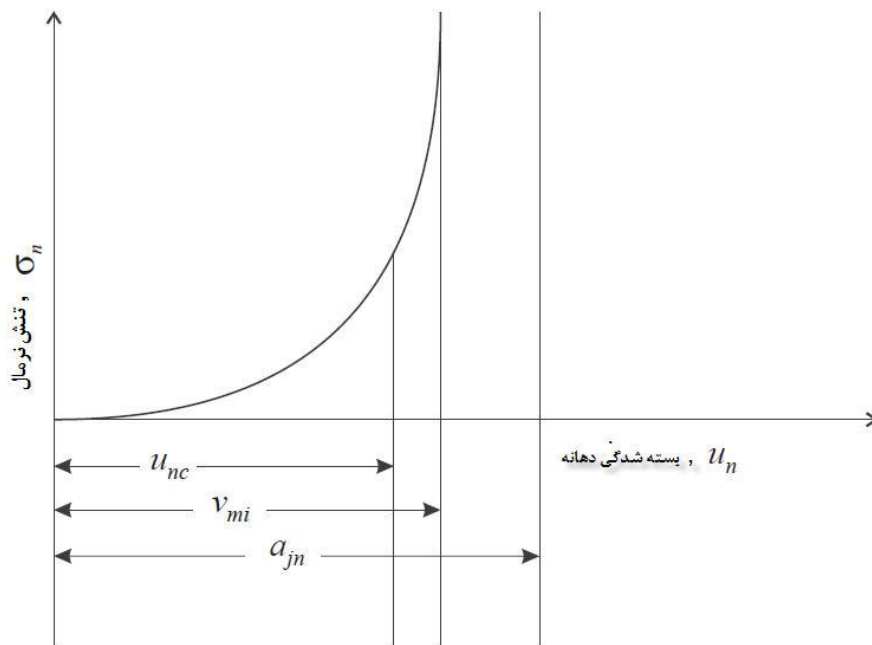
د) تغییر سختی نرمال ناشی از تغییرشکل برشی

ه) منحنی هیپربولیک تنش - تغییرشکل

تغییرشکل - تنش نرمال در معیار بارتون- بندیس^۲ با استفاده از معادله ۱-۳ بیان می‌شود:

$$\sigma_n = \frac{-u_{nc} \cdot K_{ni}}{1 - \frac{u_{nc}}{v_{mi}}} \quad (1-3)$$

که σ_n تنش نرمال، u_{nc} تغییرشکل نرمال بر حسب (mm)، K_{ni} سختی نرمال اولیه بر حسب (MPa/mm) و v_{mi} ماکزیمم بسته‌شدگی برای سیکل بارگذاری i است. نمودار تغییرات تنش نرمال (σ_n) به‌ازای مقادیر مختلف بسته‌شدگی دهانه درز در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: پارامترهای استفاده شده در محاسبه‌ی تنش نرمال در زمان سیکل بارگذاری

(Itasca Consulting Group Inc, 2000)

¹ hysteresis

² Barton-Bandis joint model

سختی نرمال اولیه با افزایش تعداد سیکل بارگذاری تغییر می‌کند و از روی معادله ۲-۳ محاسبه می‌شود:

$$K_{ni} = 0.0178 \left[\frac{JCS_0}{a_{jn}} \right] + 1.748JRC_0 - 7.155 \quad (2-3)$$

که JCS_0 مقاومت فشاری دیواره درزه در مقیاس آزمایشگاهی، a_{jn} بازشدگی درزه در تنش نرمال صفر و JRC_0 ضریب زبری درزه در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد.

ماکزیمم بسته‌شدگی (v_{mi}) برای سیکل بارگذاری i از رابطه‌ی ۳-۳ به‌دست می‌آید
(Itasca Consulting Group Inc, 2000; Jing et al., 2007):

$$v_{mi} = A_i + B_i(JRC_0) + C_i \left[\frac{JCS_0}{a_{jn}} \right]^{D_i} \quad (3-3)$$

پارمترهای A_i, B_i, C_i, D_i در رابطه‌ی ۳-۳ مقادیر ثابت هستند که در جدول ۱-۳ نشان داده شده‌اند
(Itasca Consulting Group Inc, 2000):

جدول ۱-۳: ثابت‌های استفاده شده جهت محاسبه‌ی v_{mi} (Itasca Consulting Group Inc, 2000)

ثابت	سیکل ۱	سیکل ۲	سیکل ۳	سیکل ۴
A_i	-۰/۲۹۶	-۰/۱۰۰۵	-۰/۱۰۳۱	-۰/۱۰۳۱
B_i	-۰/۰۰۵۶	-۰/۰۰۷۳	-۰/۰۰۷۴	-۰/۰۰۷۴
C_i	۲/۲۴۱	۱/۰۰۸۲	۱/۱۳۵	۱/۱۳۵
D_i	-۰/۲۴۵	-۰/۲۳۰	-۰/۲۵۱	-۰/۲۵۱

پس از هر بارگذاری، مرحله‌ی باربرداری انجام می‌گیرد و جهت محاسبه‌ی v_{mi} و K_{ni} برای مرحله باربرداری، از فرمول‌های مرحله‌ی بارگذاری استفاده می‌شود. K_{ni} از رابطه ۲-۳ به‌دست می‌آید با این تفاوت که مقدار بازشدگی جدید در این فرمول جای‌گذاری می‌شود. بعد از هر بارگذاری مقدار

بازشدگی اولیه کاهش و در مرحله‌ی باربرداری بازشدگی به مقدار اولیه‌ی خود بازمی‌گردد و در واقع منحنی بارگذاری و باربرداری روی هم قرار نمی‌گیرند (برابر نیستند) و بازشدگی نسبت به بازشدگی اولیه، برگشت‌ناپذیر است پس بسته‌شدگی برگشت‌ناپذیر^۱ (v_{irr}) برابر است با مقدار بسته‌شدگی دهانه‌ی درزه، بعد از هر باربرداری و از رابطه ۳-۴ به دست می‌آید (شکل ۳-۲). مقدار بازشدگی جدید از کم‌نمودن بسته‌شدگی برگشت‌ناپذیر (بعد از هر باربرداری) از مقدار بازشدگی در بارگذاری قبلی به دست می‌آید، بدین معنی که بازشدگی جدید (a_{jn}) از کم‌نمودن v_{irr} از a_{jn} (بارگذاری قبلی) به دست می‌آید و مقدار بسته‌شدگی برگشت‌ناپذیر از رابطه ۳-۴ محاسبه می‌شود:

$$v_{irr} = [C_1 - C_2 \left[\frac{JRC_0}{a_{jn}} \right]] \frac{u_{nl}}{100} \quad (۴-۳)$$

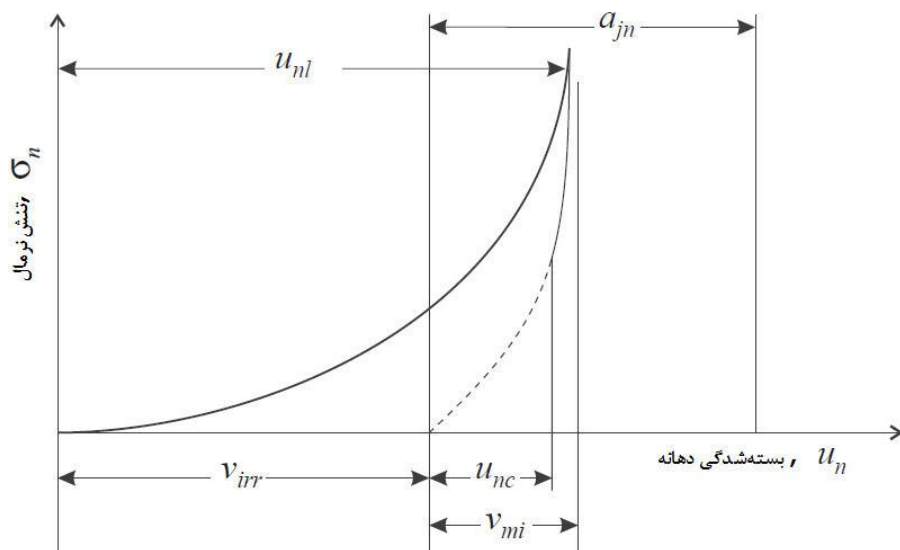
که در این معادله u_{nl} ماکزیمم بسته‌شدگی برای مرحله بارگذاری کامل و C_1 و C_2 ثابت‌های تجربی برای یک سیکل خاص می‌باشند. مقدار ثابت‌های C_1 و C_2 در رابطه ۳-۴ در جدول ۳-۲ ذکر شده است.

جدول ۳-۲: ثابت‌های مورد استفاده برای محاسبه‌ی v_{irr}

(Itasca Consulting Group Inc, 2000)

ثابت	سیکل ۱	سیکل ۲	سیکل ۳	سیکل ۴
C_1	۸۴/۷۷	۴۴/۳۷	۳۱/۳۸	۲۰/۰۰
C_2	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱

^۱ Irrecoverable closure

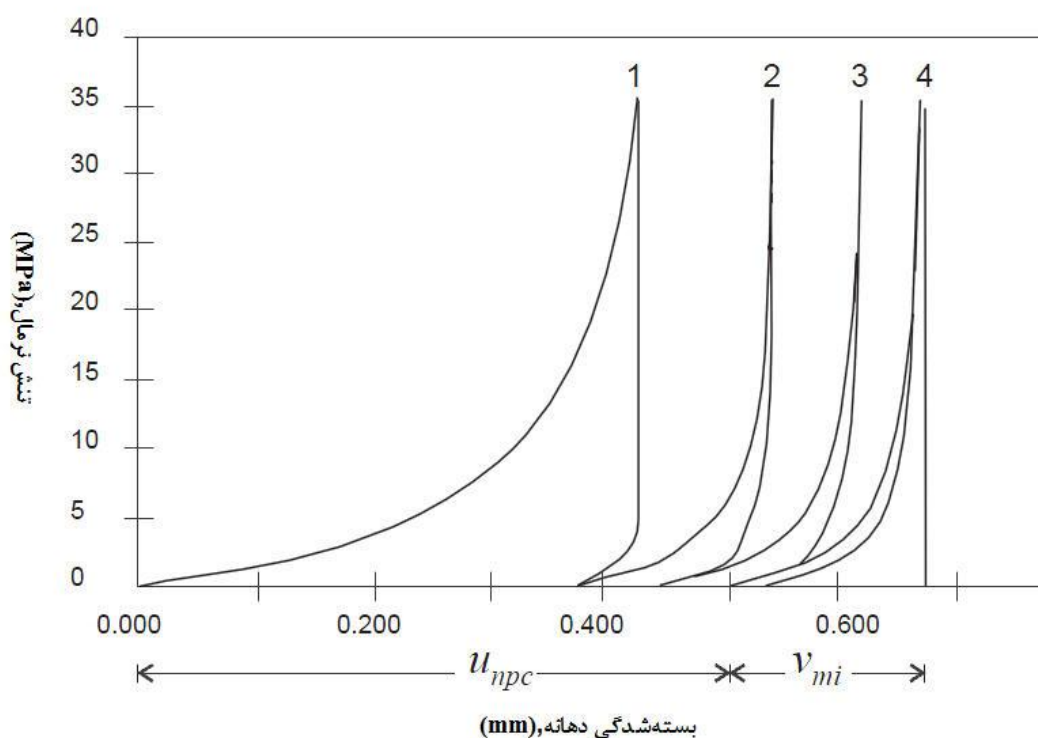


شکل ۳-۲: نمودار تغییرات پارامتر بسته‌شدگی دهانه با تغییرات تنش نرمال در سیکل نرمال

(Itasca Consulting Group Inc, 2000)

به منظور حفظ جابجایی پیوسته، v_{irr} به مجموع بسته‌شدگی‌های برگشت‌ناپذیر قبلی اضافه می‌شود. (u_{npc}) و از بسته‌شدگی حاضر (u_{nc}) کم می‌شود. برای بارگذاری بعدی، K_{ni} ثابت باقی می‌ماند و v_m جدید از رابطه ۳-۳ به دست می‌آید و برای بارگذاری بعدی ثابت است. اگر باربرداری انجام گیرد منحنی هایپربولیک به سمت محور افقی انتقال داده می‌شود و v_{mi} با استفاده از بارگذاری پیوسته اصلاح می‌شود. چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری تا زمانی که دیگر رفتار نرمال درزه تغییر نکند، ادامه خواهد داشت (شکل ۳-۳). ثابت‌های تجربی که در معادلات بارتون- بندیس استفاده شده برای سیکل‌های بعد از ۴ تغییر نمی‌کنند، ولی اما بازشدگی بعد از سیکل ۴ نیز همچنان کاهش می‌یابد. چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری تا زمانی که منحنی بارگذاری و باربرداری روی هم قرار بگیرند ادامه می‌یابد، بدین معنا که دیگر بازشدگی درزه تغییر نمی‌کند که در این حالت بازشدگی هیدرولیکی^۱ نامیده می‌شود.

¹ hydraulic aperture

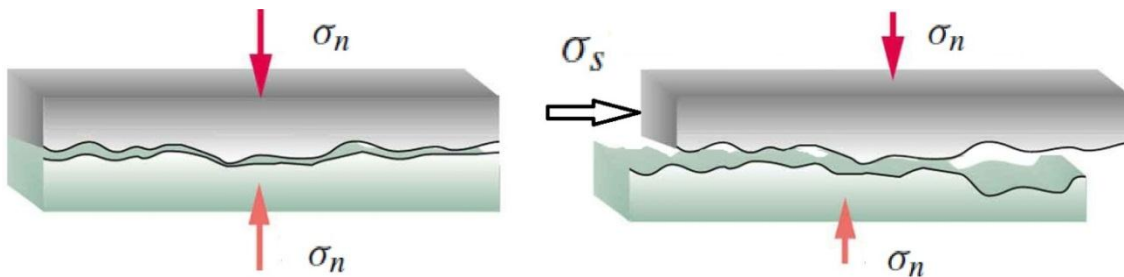


شکل ۳-۳: منحنی‌های دهانه بازشدگی بر حسب تنش نرمال در ۴ سیکل کامل

(Itasca Consulting Group Inc, 2000)

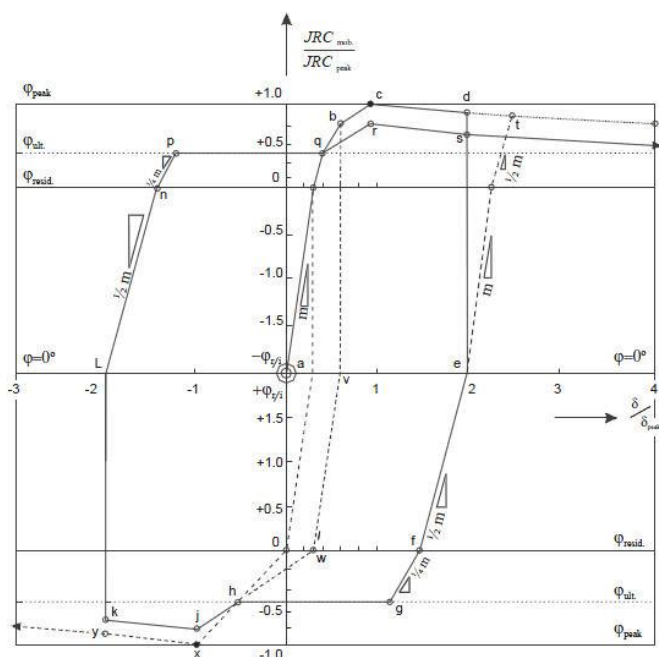
۳-۲-۲- رفتار برشی درزه

مهمترین پارامتری که توسط رفتار برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد اتساع درزه می‌باشد. اتساع پدیده‌ای است که هنگام تغییر شکل برشی درزه و بر اثر زبری دندانه‌ها و ناصافی‌های سطوح دیواره‌های درزه به وجود می‌آید و باعث می‌شود که پس از تغییر شکل برشی درزه، تغییر شکل قائم در راستای تنش نرمال واقع بر درزه ایجاد گردد. اگر بر اثر تنش برشی دندانه‌های سطح درزه به اندازه Δu_s (در راستای افقی) جابجا شود، جابجایی قائم Δu_n در راستای قائم ایجاد می‌شود (شکل ۳-۴). پدیده اتساع وابسته به زبری سطح درزه می‌باشد و زبر بودن سطح درزه باعث افزایش اتساع می‌گردد. در ادامه مراحل محاسبه پدیده اتساع و روابطی که منجر به بررسی این پدیده می‌گردد، به صورت کامل تشریح شده است.



شکل ۳-۴: نمایی از تغییر شکل قائم (اتساع) در اثر تنش برشی

مقاومت برشی درزه‌ها با استفاده از زبری متحرک^۱ به دست می‌آید و ضریب زبری متحرک^۲ (JRC_{mob}) تابعی از خصوصیات درزه، شامل: طول، بارگذاری نرمال و تغییر شکل برشی است. رابطه‌ی تغییر شکل برشی نرمال شده^۳ (δ/δ_{peak}) و ضریب زبری متحرک نرمال شده^۴ (JRC_{mob}/JRC_{peak}) در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: مدل بررسی تأثیر تغییر شکل بر مقاومت برشی درزه (Itasca Consulting Group Inc, 2000).

- ¹ Roughness mobilized
- ² mobilized roughness coefficient
- ³ normalized shear displacement
- ⁴ normalized mobilized roughness coefficient

به کار بردن مدل تنش برشی (شکل ۵-۳) باعث محدود شدن تنش برشی می‌شود. تنش برشی (σ_s^L) وابسته به پارامترهای ضریب زبری (JRC_n) در مقیاس کامل، مقاومت فشاری دیواره‌ی درزه (JCS_n) و پیک تغییرشکل برشی^۱ (δ_{peak}) می‌باشد که این پارامترها از معادلات زیر به دست می‌آید.

$$JRC = JRC_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02 JRC_0} \quad (۵-۳)$$

$$JRC_n = JSC_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03 JRC_0} \quad (۶-۳)$$

$$\delta_{peak} = \frac{L_n}{500} \cdot \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{0.33} \quad (۷-۳)$$

L_0 طول درزه در مقیاس آزمایشگاهی و L_n طول درزه در مقیاس واقعی (برداشت شده) می‌باشد.

سهام زبری^۲ طبق معادله ۸-۳ به دست می‌آید:

$$RUFF = JRC_n \cdot \log_{10}\left(\frac{JCS_n}{\sigma_n}\right) \quad (۸-۳)$$

σ_n تنش نرمال خاص و ضریب زبری متحرک درزه از رابطه ۹-۳ به دست می‌آید.

$$JRC_{mob} = B \cdot JRC_n \quad (۹-۳)$$

مقدار B در معادله ۹-۳ از جدول ۳-۳ به دست می‌آید. برای به دست آوردن B ، ابتدا باید ضریب A را محاسبه کرد، که ضریب A از تقسیم تغییرشکل برشی خاص^۳ بر پیک تغییرشکل برشی به دست می‌آید و سپس از ستون B برای محاسبه‌ی JRC_{mob} استفاده می‌شود.

¹ peak shear displacement
² contribution
³ current shear displacement

جدول ۳-۳: مقادیر استفاده شده برای محاسبه‌ی زیری JRC_{mob} (Itasca Consulting Group Inc,)

(2000)

A	B	A	B
$\frac{\delta}{\delta_{peak}}$	$\frac{JRC_{mob}}{JRC_n}$	$\frac{\delta}{\delta_{peak}}$	$\frac{JRC_{mob}}{JRC_n}$
۰/۰	$\varphi_r/RUFF$	۶/۰	۰/۶
۰/۲	$-۰/۲۵ (\varphi_r/RUFF)$	۸/۰	۰/۵۵
۰/۳	۰/۰	۱۰/۰	۰/۵
۰/۴۵	۰/۵	۲۰/۰	۰/۴
۰/۶	۰/۷۵	۴۰/۰	۰/۳
۰/۸	۰/۹	۶۰/۰	۰/۲
۲/۰	۰/۸۵	۸۰/۰	۰/۱
۳/۰	۰/۷۵	۱۰۰/۰	۰/۰
۴/۰	۰/۷	۱۰۰/۰	۰/۰

در نهایت تنش برشی محدود شده (σ_s^L) ، از معادله ۳-۱۰ به دست می‌آید:

$$\sigma_s^L = \sigma_n \cdot \tan(JRC_{mob} \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) + \varphi_r) \quad (۱۰-۳)$$

که در معادله بالا φ_r زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.

سختی برشی $bbjk_s$ وابسته به تغییرشکل برشی است و از قسمت خطی بارگذاری (تنش برشی -

تغییرشکل برشی) به دست می‌آید. تنش برشی افزایشی از رابطه ۳-۱۱ و سختی برشی از روابط ۳-۱۲

و ۳-۱۳ محاسبه می‌گردد:

$$\Delta\sigma_s = \Delta u_s \cdot bbjk_s \quad (۱۱-۳)$$

¹ limiting shear stress

$$bbjk_s = \sigma_n \cdot \tan\left(\frac{0.75 \varphi_{resid}}{0.2 \delta_{peak}}\right) \cdot L \quad \text{for } \left(\frac{\delta}{\delta_{peak}}\right) < 0.20 \quad (12-3)$$

$$bbjk_s = \sigma_n \left(\frac{0.25 \varphi_{resid}}{0.1 \delta_{peak}}\right) L \quad \text{for } \left(\frac{\delta}{\delta_{peak}}\right) > 0.20 \quad (13-3)$$

برای محاسبه اتساع، از زبری متحرک استفاده می‌شود. بررسی تغییرات پدیده اتساع (Δu_n) بر پایه تغییرات تنش برشی و تنش نرمال با رابطه ۳-۱۴ بیان می‌شود. از معادله ۳-۱۴ می‌توان دریافت که زبر بودن سطح درزه مقدار اتساع را افزایش می‌دهد

$$\Delta u_n = \Delta u_s \cdot \tan\left(0.5 JRC_{mob} \log\left(\frac{JCS_n}{\sigma_n}\right)\right) \quad (14-3)$$

که JRC_{mob} زبری متحرک سطح درزه، JCS_n مقاومت فشاری دیواره درزه و σ_n تنش نرمال وارد بر سطح درزه می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس پدیده اتساع وابسته به زبری (JRC) سطح درزه می‌باشد و از طریق رفتار برشی درزه می‌توان تأثیر آن را بر دبی جریان سیال مورد بررسی قرار داد. در مدل رفتاری بارتون - بندیس، از طریق بررسی رفتار نرمال درزه، می‌توان بازشدگی هیدرولیکی را محاسبه کرد. چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری تا زمانی که منحنی بارگذاری و باربرداری روی هم قرار بگیرند، ادامه می‌یابد. پس از چرخه‌ی مشخصی، بازشدگی دهانه دیگر تغییر نمی‌کند و به مقدار مشخصی مجانب می‌شود که آن را بازشدگی مؤثر یا بازشدگی هیدرولیکی می‌نامند. پس برای محاسبه دبی جریان در قانون کوپیک طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس از بازشدگی هیدرولیکی استفاده می‌شود.

۳-۳- مدل‌سازی عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان در شکستگی منفرد

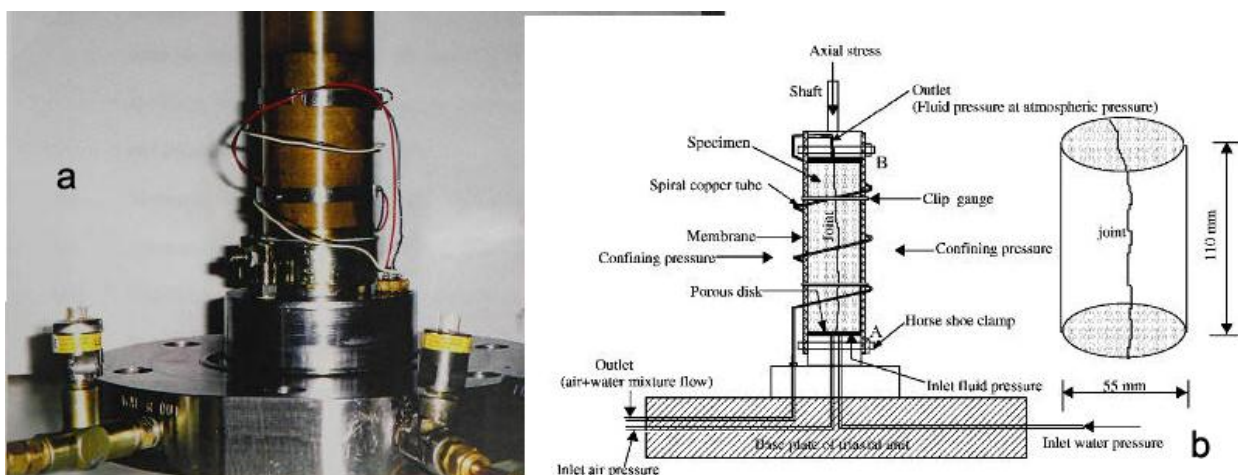
برای تحلیل و ارزیابی تأثیر زبری سطح درزه‌ها بر جریان سیال در شکستگی‌های توده‌سنگ، لازم است ابتدا تأثیر زبری درزه بر جریان، در شکستگی منفرد مورد مطالعه قرار گیرد. لذا برای مدل‌سازی تأثیر زبری بر رفتار مکانیکی درزه به صورت عددی، معیار بارتون - بندیس در قالب روش عددی اجزاء مجزا

به کار گرفته شده است. برای ارزیابی دقت این معیار نتایج آن با نتایج روابط تجربی بحث شده در فصل ۲ مقایسه شده و همچنین برای اعتبارسنجی مدل سازی عددی، نتایج معیار بارتون - بندیس با نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی مقایسه شده است.

بنابراین در این فصل ابتدا مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر توضیح داده می شود و سپس نتایج مدل سازی عددی براساس ورودی های آزمایشگاهی بحث می شود.

۳-۳-۱- مطالعه آزمایشگاهی رانجیت^۱ برای بررسی تأثیر زبری بر جریان سیال

رانجیت (Ranjith, 2000; Ranjith et al., 2006) آزمایشات مختلفی را برای محاسبه دبی جریان تحت شرایط مختلف همچون فشار منفذی متغیر تنش های محصورکننده و زبری سطح درزه متغیر انجام داده است، به همین دلیل از داده های مدل آزمایشگاهی ایشان برای ساختن مدل عددی در این پایان نامه استفاده شده است. نتایج مدل عددی ساخته شده با نتایج تست آزمایشگاهی ایشان مقایسه و اعتبارسنجی گردیده است. رنجیت برای اندازه گیری دبی جریان در شکستگی منفرد از دستگاه تست سه محوره فشار بالا^۲ استفاده کرده است که شکل ۳-۶ بیانگر خصوصیات نمونه و دستگاه مورد استفاده می باشد.



شکل ۳-۶: a دستگاه اندازه گیری نرخ جریان، b نمونه آزمایشگاهی به همراه خصوصیات دستگاه (Ranjith, 2000)

^۱Ranjith gamaga

^۲ High pressure triaxial tests

ابعاد، خصوصیات ماده سنگ و شکستگی نمونه آزمایشگاهی که برای مدل سازی عددی استفاده شده است، در جدول ۳-۴ و ۳-۵ ذکر شده و همچنین شرایط مرزی برای این نمونه، در جدول ۳-۶ آمده است.

جدول ۳-۴: ابعاد و مشخصات نمونه آزمایشگاهی

مشخصات	اندازه	مشخصات	اندازه
ابعاد مدل استوانه	۵۵×۱۱۰mm	چسپندگی	۵۵/۱ MPa
مدول یانگ	۷۳/۸GPa	زاویه اصطکاک	۵۱ درجه
مدول بالک	۴۳/۹GPa	چگالی سنگ	۲۷۶۰ Kg/m ³
مدول برشی	۳۰/۲ GPa	مقاومت فشاری تک محوره	۲۲۶ MPa
ضریب پواسون	۰/۲۲		

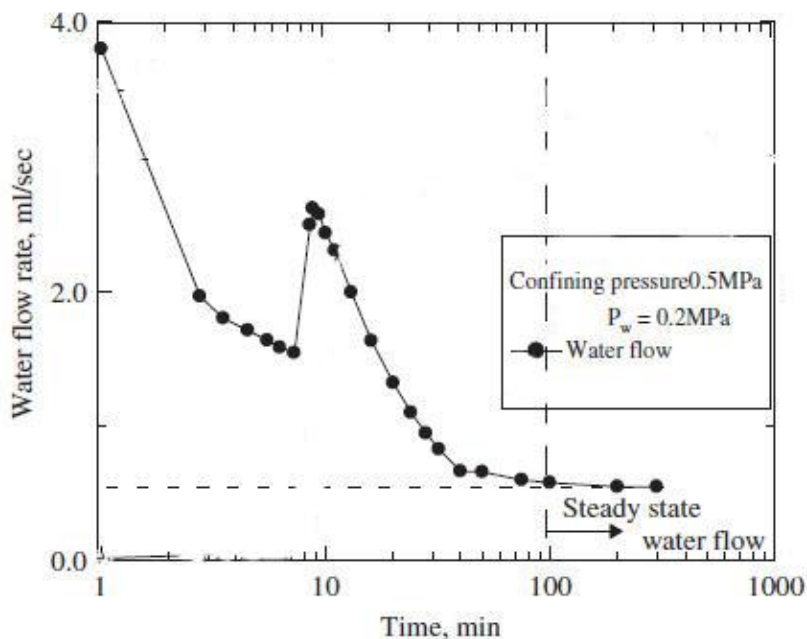
جدول ۳-۵: خصوصیات سطح شکستگی نمونه آزمایشگاهی

زبری درزه (JRC)	بازشدگی درزه در تنش نرمال صفر (a_{zero})	بازشدگی باقی مانده (a_{resid})	سختی برشی	سختی عمودی	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)
۶/۲	۰/۲mm	۰/۰۲۵mm	۹GPa	۹GPa	۱۰۸ MPa

جدول ۳-۶: شرایط مرزی نمونه آزمایشگاهی که جهت مدل سازی عددی از آن استفاده شده است.

تنش محوری (MPa)	فشار منفذی (MPa)	تنش محصورکننده (MPa)
۰/۵	۰/۲	۰/۵

رنجیت نمونه مورد آزمایش با خصوصیات بالا را تحت فشار سیال معینی قرار داد و نتیجه آزمایش ایشان در نمودار شکل ۳-۷ نشان داده شده است، که دبی جریان برای ضریب زبری $JRC = 6/2$ ، $\mu = 0.6$ میکرو متر مکعب بر ثانیه می باشد.



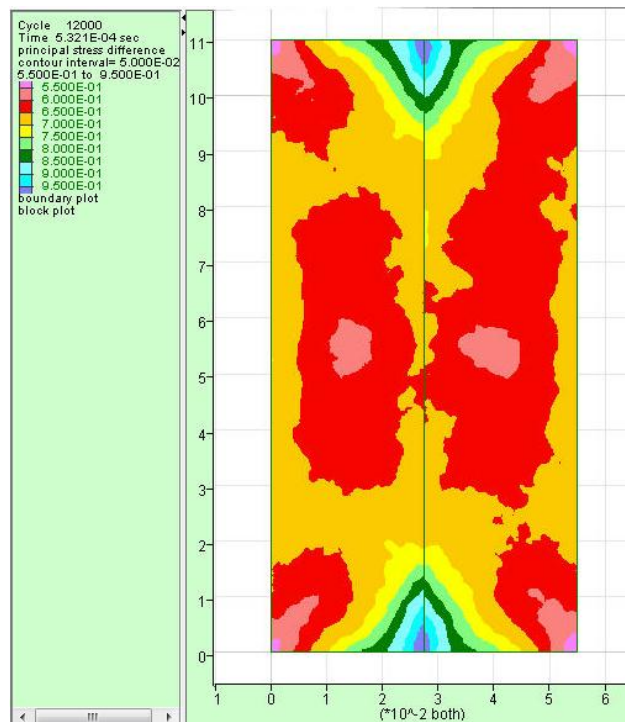
شکل ۳-۷: مقدار دبی جریان عبوری از شکستگی نمونه آزمایشگاهی برابر $\mu = 0.6$ میکرو متر مکعب بر ثانیه می باشد (Ranjith 2000; Ranjith et al., 2006).

نتیجه دبی جریان آب در شکستگی منفرد برای نمونه آزمایشگاهی در بالا توضیح داده شد. در ادامه دو مدل عددی مطابق با این خصوصیات ساخته شده است. در مدل اول، زبری سطح درزه مطابق با زبری نمونه ساخته شده و در مدل دوم درزه صاف در نظر گرفته شده و در نهایت دبی جریان برای این دو مدل عددی با نتایج تست آزمایشگاهی مقایسه شده است.

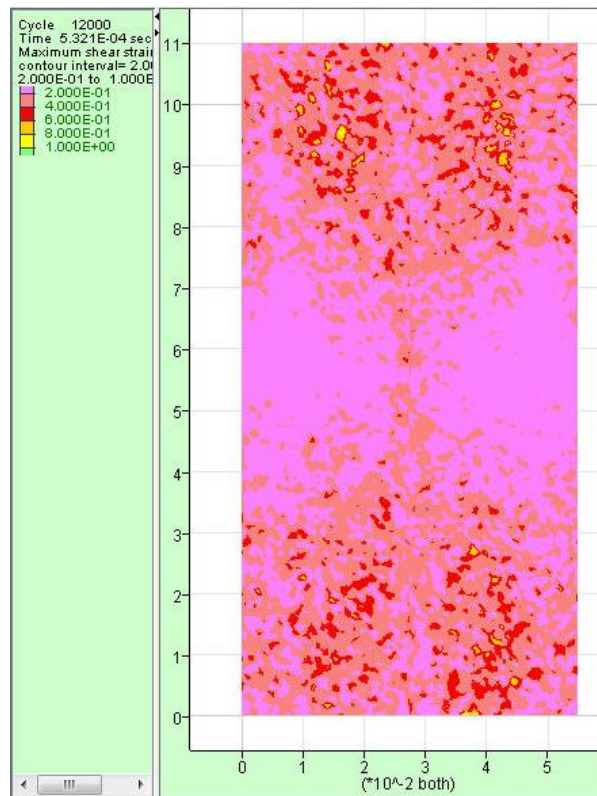
۳-۳-۲- مدل سازی عددی تأثیر زبری بر جریان آب با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر زبری سطح شکستگی (منفرد)، دو مدل عددی با استفاده از خصوصیات نمونه

آزمایشگاهی ساخته شده است. زبری مدل اول مطابق با نمونه آزمایشگاهی، برابر با $JRC=6/2$ شبیه‌سازی شده و در مدل دوم، سطوح شکستگی صاف در نظر گرفته شده است. پس از شبیه‌سازی عددی دو مدل فوق، بر آن‌ها تنش اعمال گردیده است. شکل تنش‌های اعمالی بر دو مدل، شبیه به هم هستند (شکل ۳-۸). در اطراف شکستگی و گوشه‌های مدل تنش بیشینه است و به همین دلیل در این نواحی تغییرشکل بیشتری ایجاد شده است. تغییرشکل مدل عددی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



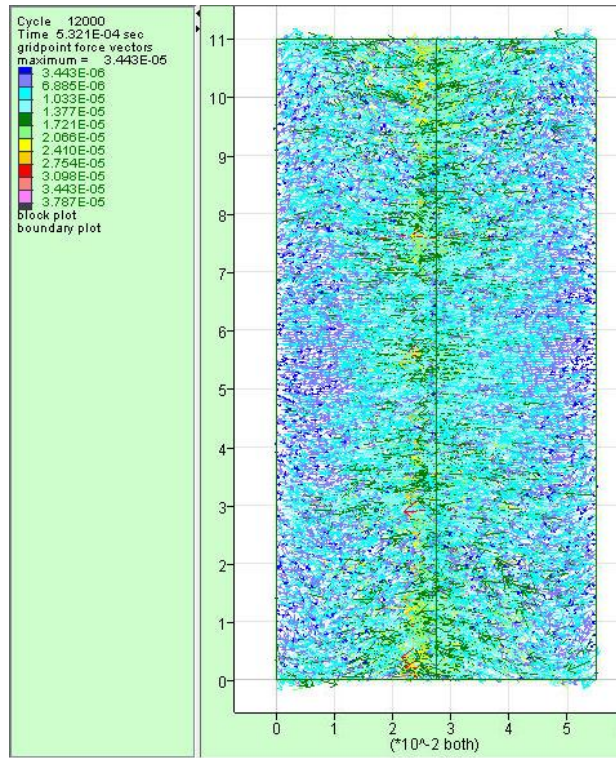
شکل ۳-۸: تنش‌های اعمالی بر مدل عددی شبیه‌سازی شده مطابق با تست آزمایشگاهی



شکل ۳-۹: تغییرشکل نرمال و برشی در اطراف شکستگی مدل .

در اعماق زمین، سیال با فشار بالا وارد حفریات زیرزمینی می‌شود و باعث تغییرشکل بازشدگی دهانه درزه‌ها می‌شوند. به‌همین دلیل در آزمایشات تجربی برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان از دستگاه‌هایی با فشار سیال اعمالی بالا استفاده می‌شود، تا تأثیر پارامترهای تأثیرگذار بر دبی جریان با دقت و صحت بالا مورد ارزیابی قرار گیرد.

پس از اعمال تنش، دو مدل تحت فشار (بالا) آب ۰/۲ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند و بر اثر فشار سیال، تغییرشکل در طول شکستگی اتفاق می‌افتد که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: تغییر شکل حاصل از فشار سیال در طول شکستگی

در نرم افزار UDEC برای محاسبه دبی جریان عبوری از شکستگی، طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس از بازشدگی هیدرولیکی در قانون کوپیک استفاده می شود و مقدار دبی جریان عبوری از شکستگی، طبق قانون کوپیک برای مدل عددی محاسبه می شود.

۳-۴- اعتبارسنجی مدل عددی با تست آزمایشگاهی

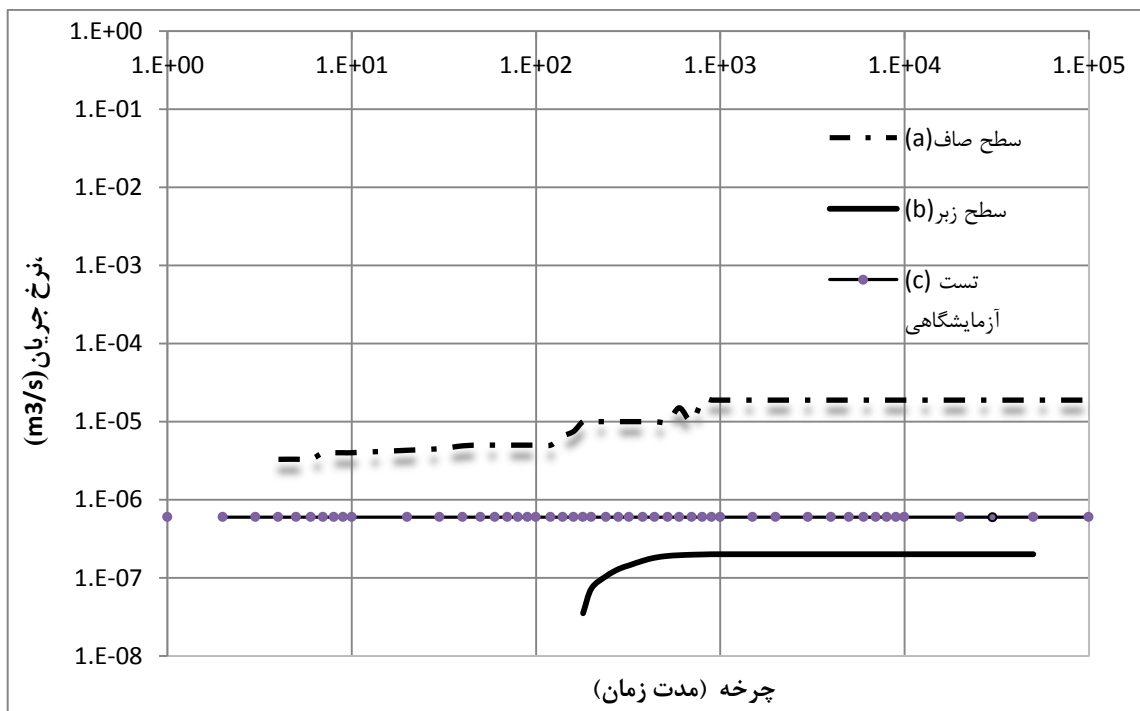
برای اعتبارسنجی مدل رفتاری بارتون - بندیس در نرم افزار UDEC از نمونه آزمایشگاهی استفاده شده است و مدلی عددی مطابق با خصوصیات نمونه آزمایشگاهی که شامل زبری $JRC=6/2$ می باشد، ساخته شد. در نمودار شکل ۳-۱۱ مقدار دبی جریان برای مدل عددی با $JRC=6/2$ (منحنی b) بر حسب چرخه (مدت زمان) محاسبه شده و همچنین دبی جریان برای نمونه آزمایشگاهی که از شکل ۳-۷ استخراج شده، به صورت منحنی c نشان داده شده است. طبق این نمودار دبی جریان برای تست آزمایشگاهی برابر $0/6$ میکرومترمکعب بر ثانیه و برای مدل عددی $0/2$ میکرومترمکعب بر ثانیه

می‌باشد. نتایج دبی جریان برای مدل عددی و تست آزمایشگاهی تقریباً یکسان می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت، که مدل عددی (بر اساس مدل رفتاری بارتون - بندیس) می‌تواند مدل کاملی برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال باشد.

پس از اعتبارسنجی مدل عددی با تست آزمایشگاهی، به‌منظور بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن، نتایج دبی جریان مدل عددی زبر با دبی جریان مدل عددی با سطوح صاف باهم مقایسه شده‌اند. طبق نمودار شکل ۳-۱۱ اندازه دبی جریان برای سطوح صاف ۳/۴۳ میکرومتر مکعب بر ثانیه (منحنی a) و برای سطوح زبر به ۰/۲ میکرومتر مکعب بر ثانیه (منحنی b) کاهش یافته است.

طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس، هر چه سطوح زبرتر شوند بازشدگی مؤثر (هیدرولیکی) کمتری خواهند داشت. از دیدگاه بررسی کیفی، بدیهی است که دبی جریان عبوری از شکستگی با افزایش زبری، کاهش می‌یابد. اما از منظر کمی میزان دبی جریان برای سطوح زبر در مقایسه با سطوح صاف تفاوت شدیدی دارند (Dimadis et al., 2014).

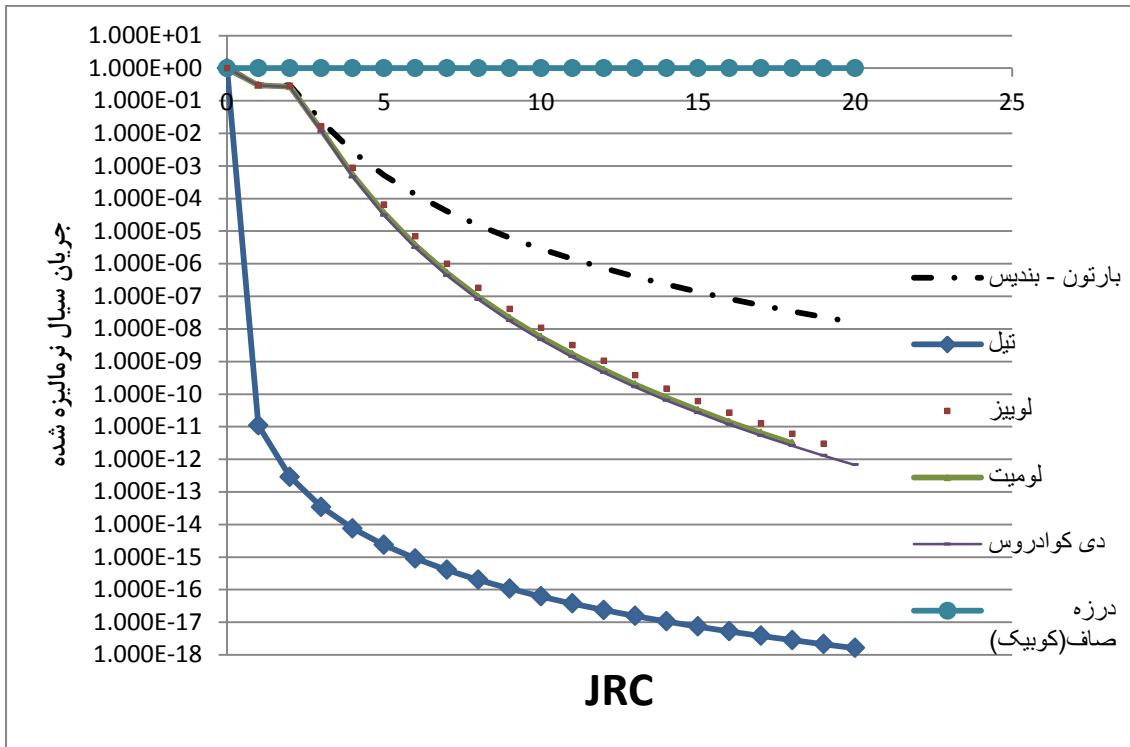
در قانون کوییک بازشدگی هیدرولیکی دهانه درزه مهمترین پارامتر در محاسبه دبی جریان عبوری از طول درزه می‌باشد. چون بازشدگی دهانه درزه در این قانون به توان ۳ می‌رسد و تغییر جزئی در بازشدگی، باعث تغییر شدید دبی جریان می‌شود. در مدل رفتاری بارتون - بندیس زبری سطح درزه باعث کاهش بازشدگی مؤثر دهانه درزه می‌شود و طبق این مدل رفتاری، دو مدل عددی با سطوح صاف و زبر (با بازشدگی مکانیکی ثابت)، بازشدگی هیدرولیکی یکسان ندارند. پس در نتیجه هر چه سطح زبرتر شود، اختلاف بازشدگی مؤثر بیشتر و در نتیجه دبی جریان اختلاف بیشتری نسبت به سطوح صاف پیدا می‌کند (Dimadis et al., 2014). در دو مدل عددی ساخته شده، زبری $JRC=6/2$ باعث کاهش بازشدگی مؤثر نسبت به سطوح صاف می‌شود و به همین دلیل زمانی که در قانون کوییک به توان سه می‌رسد اختلاف شدید دبی جریان برای سطوح زبر ($JRC=6/2$) و صاف ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۱: (a) دبی جریان برای درزه صاف، (b) دبی جریان برای درزه با $JRC=6/2$ و (c) دبی جریان حاصل از تست آزمایشگاهی

۳-۵- مقایسه مدل عددی با نتایج تجربی

نمودار شکل ۳-۱۲ مقایسه روابط تجربی و مدل عددی، برای بررسی قابلیت معیار بارتون - بندیس در مقایسه با روابط تجربی بحث شده در فصل ۲ را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی زبری JRC و محور قائم دبی جریان نرمالیزه شده است. نرمالیزه کردن دبی جریان بدین جهت صورت گرفته که بتوان تأثیر زبری را بهتر نشان داد. طبق این نمودار اعمال ضریب برای تأثیر زبری در قانون کوبیک باعث کاهش شدید دبی جریان (منحنی تیل) می‌شود و هر چه JRC افزایش می‌یابد اختلاف دبی جریان برای روابط تجربی نسبت به مدل عددی بیشتر می‌شود.

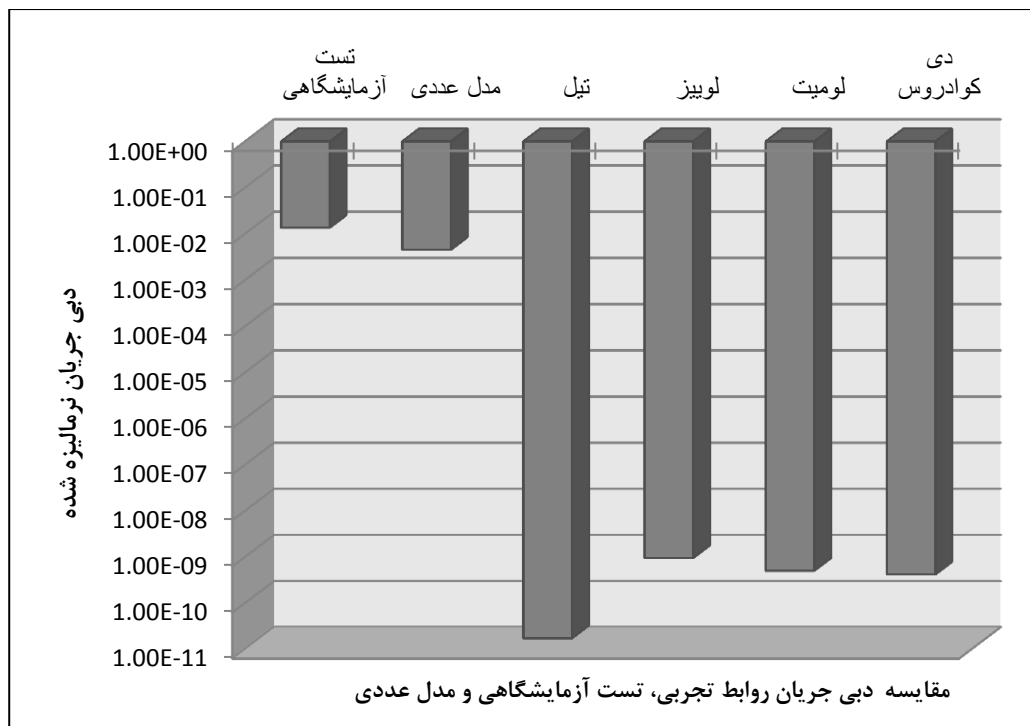


شکل ۳-۱۲: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج تجربی و بررسی تأثیر زبری در روابط تجربی مختلف

طبق نمودار شکل ۳-۱۲، منحنی‌های مربوط به کاهش توان بازشدگی با افزایش JRC شیب ملایم‌تری نسبت به رابطه تجربی تیل و دبی جریان، اختلاف کمتری نسبت به مدل عددی دارد (منحنی‌های لوییز، لومیت و دی کوادروس). پس می‌توان دریافت که تنها با اعمال ضریب و کاهش توان بازشدگی در قانون کوبیک، نمی‌توان تأثیر زبری سطح درزه را کاملاً مورد بررسی قرار داد. در روابط تجربی، فقط رفتار هیدرولیکی مدنظر قرار گرفته می‌شود، ولی در طبیعت رفتار درزه‌ها تحت تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی قرار می‌گیرد و نادیده گرفتن پارامترهایی همچون رفتار بارگذاری و باربرداری، سختی نرمال و برشی در قالب تنش نرمال و برشی و ... می‌تواند منجر به پیش‌بینی نادرست دبی جریان شود.

در نمودار شکل ۳-۱۳ مدل عددی دبی جریان سیال، تست آزمایشگاهی و روابط تجربی مربوطه با هم مقایسه شده‌اند. در این شکل، محور عمودی دبی جریان نرمالیزه شده می‌باشد و محور افقی روابط تجربی، مدل عددی و تست آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. اهمیت دبی جریان نرمالیزه شده

(محور عمودی) این است که امکان بررسی تأثیر زبری بر دبی جریان را فراهم می‌سازد و برای این منظور، فقط تأثیر زبری بر دبی جریان نشان داده می‌شود. طبق نمودار شکل ۳-۱۳ تأثیر زبری بر دبی جریان برای مدل عددی و تست آزمایشگاهی یکسان می‌باشد و می‌توان دریافت که مدل عددی تأثیر و نقش زبری بر دبی جریان را به‌طور کامل در نظر گرفته است. اعمال ضریب کاهش و کاهش توان بازشدگی (به ترتیب مدل تیل و لویز، لومیت و دی کوادروس) به قانون کوبیک برای اعمال تأثیر زبری بر دبی جریان باعث اختلاف شدید نسبت به تست آزمایشگاهی شده است و دبی جریان، به اشتباه شدیداً کاهش یافته است. اختلاف برای رابطه تیل نسبت به دیگر روابط تجربی بیشتر می‌باشد و می‌توان دریافت اعمال ضریب به قانون کوبیک نمی‌تواند مبنای درستی برای بیان تأثیر زبری بر جریان سیال باشد.



شکل ۳-۱۳: مقایسه دبی جریان سیال برای تست آزمایشگاهی، مدل عددی و روابط تجربی

همچنان که اشاره شد روابط تجربی مورد اشاره فقط رفتار هیدرولیکی را مدنظر قرار داده‌اند در حالیکه در طبیعت رفتار درزه‌ها تحت اندرکنش هیدرومکانیکی قرار می‌گیرد و بازشدگی مؤثر درزه‌ها علاوه بر

زبری سطح درزه شدیداً به میدان تنش وابسته است. برای تأیید دادن زبری سطح درزه معیار بارتون - بندیس می‌تواند تغییرات بازشدگی تحت تأثیر مولفه‌های تنش را کاملاً تحت پوشش قرار دهد و نتایج نمودارهای ۱۲-۳ و ۱۳-۳ تضمینی برای این امر است که مدل عددی برای بررسی تأثیر زبری بر دبی جریان قابل قبول می‌باشد.

۳-۶- جمع‌بندی

جریان سیال در سطح درزه بیشتر تحت تأثیر بازشدگی دهانه و زبری سطح درزه قرار می‌گیرد و معیار بارتون - بندیس، زبری سطح درزه را به صورت کاهش بازشدگی دهانه درزه، در نظر می‌گیرد و از آنجا که در طبیعت سطح شکستگی‌ها عمدتاً زبر هستند، لذا نمی‌توان از این پارامتر چشم‌پوشی کرد و سطح شکستگی را صاف در نظر گرفت.

معیار بارتون - بندیس، تأثیر خصوصیات شکستگی منفرد شامل: بازشدگی متغیر، زبری سطح درزه، تنش نرمال (و برشی) و رفتار بارگذاری و باربرداری بر دبی جریان سیال را به طور کامل در مدل اعمال می‌نماید.

در معیار بارتون - بندیس، رفتار درزه در دو قالب رفتار نرمال درزه و رفتار برشی درزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در رفتار نرمال درزه (طبق روابط ذکر شده در بخش رفتار نرمال)، تأثیر زبری JRC بر بازشدگی، سختی نرمال و تنش نرمال مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در رفتار نرمال، مقدار بازشدگی و سختی نرمال پس از هر بارگذاری و باربرداری تغییر می‌کند و تا زمانی که به مقدار بازشدگی ثابتی مجانب شود، ادامه می‌یابد. سپس بازشدگی مؤثر (هیدرولیکی) به دست آمده، در قانون کوپیک برای محاسبه دبی جریان عبوری از شکستگی استفاده می‌شود.

در رفتار برشی، پدیده‌ی مهم اتساع مورد بررسی قرار می‌گیرد و طبق رابطه ۱۴-۳ پدیده اتساع تحت‌الشعاع زبری سطح درزه قرار می‌گیرد. پس معیار بارتون - بندیس زبری، می‌تواند معیار مناسب و غیر قابل جایگزین برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان عبوری از شکستگی باشد.

در این مرحله از تحقیق، برای اعتبارسنجی معیار بارتون - بندیس (نرم افزار UDEC) و مدل عددی، مدلی مطابق با خصوصیات تست آزمایشگاهی ساخته شده است که زبری سطح شکستگی نمونه آزمایشگاهی $JRC=6/2$ می باشد. نتایج مدل عددی دبی جریان سیال عبوری از شکستگی مدل عددی ($JRC=6/2$) مشابه با نتایج دبی جریان تست آزمایشگاهی می باشد. همچنین برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه، مدلی مطابق با خصوصیات تست آزمایشگاهی ولی با سطح شکستگی صاف ساخته شد و با مدل عددی زبر ($JRC=6/2$) و تست آزمایشگاهی مقایسه شد. دبی جریان سیال برای مدل با سطح شکستگی زبر و تست آزمایشگاهی نسبت به مدل با سطح شکستگی صاف، شدیداً کاهش یافته است به همین دلیل چشم پوشی از زبری سطح درزه غیر قابل قبول است.

همچنین برای بررسی قابلیت معیار بارتون - بندیس نتایج مدل سازی و تست آزمایشگاهی، با روابط تجربی (بخش ۳-۵) مقایسه شده است. بر اساس این مقایسه، می توان دریافت که با اعمال ضریب و کاهش توان بازشدگی در روابط تجربی قانون کوپیک، که اصطلاحاً اصلاح قانون کوپیک نامیده می شود، نمی توان تأثیر و نقش زبری سطح درزه را بر دبی جریان سیال به صورت کامل در نظر گرفت. در این فصل تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری در قالب معیار بارتون - بندیس و برای شکستگی منفرد مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد، تأثیر زبری بر دبی جریان برای شبکه شکستگی، بررسی می گردد و کارایی معیار بارتون - بندیس در توده سنگ درزه دار سنجیده می شود.

۴- فصل چهارم

جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار - تأثیر

پارامترهای هندسی شکستگی‌ها بر جریان

سیال در توده‌سنگ درزه‌دار

۴-۱- مقدمه

طراحی هر نوع سازه سنگی نیازمند جمع‌آوری اطلاعات مختلف از وضعیت زمین شناسی منطقه مورد نظر می‌باشد. پوسته زمین شامل شکستگی‌ها و ماده‌سنگ می‌باشد و شکستگی‌ها تأثیرات عمیقی بر روی خواص توده سنگ می‌گذارند و مجرای اصلی جریان سیال در آن می‌باشند. لذا اندازه‌گیری هندسه و خصوصیات آن جهت تعیین مدل مناسب برای بررسی جریان سیال در توده‌سنگ ضروری می‌باشد.

خصوصیاتی که هندسه یک شکستگی در توده‌سنگ را تعریف می‌کند عبارتند از: جهت‌داری، فاصله‌داری، شکل، طول اثر، اندازه، دانسیته و موقعیت مرکز شکستگی.

جهت‌داری^۱: زاویه شیب و زاویه جهت شیب شکستگی، جهت‌داری آن را مشخص می‌کند و برای تعیین تعداد دسته درزه‌های توده‌سنگ با استفاده از تصاویر استریوگراف به کار می‌روند.

¹ Orientation

فاصله‌داری^۱: فاصله دو شکستگی مجاور از یک دسته درزه یکسان، که جهت‌داری آنها از تابع توزیع یکسانی تبعیت می‌کند (Hoek et al., 1981).

شکل ناپیوستگی^۲: این پارامتر اساساً نامعلوم بوده و معمولاً به شکل دایروی، مستطیلی و یا چند ضلعی صفحه‌ای فرض می‌شوند (Hoek et al., 1981).

طول خط اثر^۳: هر شکستگی در رخنمون به صورت یک خط مشاهده می‌شود. این خط، خط اثرشکستگی و طول آن طول خط اثر می‌باشد.

اندازه شکستگی^۴: این پارامتر را نمی‌توان مستقیماً با استفاده از برداشت سطحی و اطلاعات گمانه‌ها به دست آورد. تخمین این پارامتر توسط تابع توزیع طول خط اثر انجام می‌گیرد (Hoek et al., 1981). بازشدگی دهانه درزه: فاصله عمودی بین دو دیواره درزه که در شکستگی منفرد مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر دبی جریان به حساب می‌آید.

دانسیتة شکستگی‌ها: دانسیته برای هر دسته درزه از شکستگی‌ها اندازه‌گیری می‌شود. دانسیته را می‌توان از سه روش تعریف کرد: خطی، سطحی و حجمی (Singhal et al., 2010).

الف) دانسیته خطی^۵ (بر حسب $1/m$): تعداد شکستگی‌ها (برای هر دسته درزه) بر واحد طول اندازه‌گیری در جهت خط برداشت را دانسیته خطی گویند که برای هر دسته درزه جداگانه حساب می‌شود.

ب) دانسیته سطحی^۶ (بر حسب $1/m^2$): تعداد مرکز شکستگی‌ها (خط اثر) بر واحد سطح در پنجره برداشت را دانسیته سطحی گویند.

ج) دانسیته حجمی^۷ (بر حسب $1/m^3$): عبارت است از تعداد مرکز شکستگی‌ها بر واحد حجم توده سنگ (Itasca, 2013).

¹ spacing

² Fracture Shape

³ Fracture Length

⁴ Fracture Area

⁵ Linear fracture density

⁶ Aeral fracture density

⁷ Volumetric fracture density

موقعیت مرکز شکستگی^۱: عبارت است از مرکز هندسی شکستگی. این پارامتر مستقیماً از برداشت سطحی و مغزه‌های حفاری قابل اندازه‌گیری نیستند.

خصوصیات هندسه شکستگی‌ها از طریق پیمایش صحرایی و برداشت رخنمون‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به این که خواص ناپیوستگی‌ها در طبیعت با عدم قطعیت همراه است، لذا برای نمایش صریح این خواص، از توابع توزیع استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی توده‌سنگ منطقه از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود و با استفاده از توابع توزیع پارامترهای هندسه شکستگی‌ها، مدل‌های تصادفی تولید می‌شوند که شبکه شکستگی مجزا (DFN) نامیده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزارهای مخصوص، تنش‌های منطقه بر مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی DFN وارد می‌گردد. سپس جریان سیال در مدل‌ها برقرار می‌شود و در نهایت تأثیر پارامترهای هندسی شکستگی همچون زبری و بازشدگی درزه ارزیابی می‌گردد.

۲-۴- روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها

ویژگی‌های ناپیوستگی مانند جهت‌داری، اندازه، فراوانی و هندسه سطح آن، از ویژگی‌های مهم هندسی آن بوده و باید اندازه‌گیری شوند. برداشت از روی مغزه‌های حفاری و برداشت از رخنمون‌های سنگی دو روش مرسوم در برداشت ناپیوستگی‌ها هستند.

۱-۲-۴- برداشت ناپیوستگی‌ها در مغزه‌های حفاری

در این روش می‌توان بعضی از ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها را از روی مغزه حفاری به‌دست آورد. مزیت مهم مغزه حفاری این است که به آسانی می‌توان از سنگ نمونه‌برداری کرده و آن را برای آزمایشات تغییرشکل‌پذیری و مقاومت سنگ به کار برد.

¹ Position Center fracture

۴-۲-۲- برداشت ناپیوستگی‌ها از روی رخنمون‌های سنگی

اندازه‌گیری از روی رخنمون‌های سنگی چه بر روی زمین و چه در داخل زمین، از این مزیت که از منطقه بیشتری برای برداشت استفاده می‌شود، برخوردار است. به طوری که می‌توان ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مانند جهت‌داری، اندازه و دیگر خصوصیات بزرگ مقیاس ناپیوستگی‌ها را برداشت نمود. رابطه زمین‌شناسی بین گروه ناپیوستگی‌ها را نیز می‌توان مشاهده نمود. تنها مشکل و یا عیب این روش در دسترس نبودن رخنمون‌ها و تحت تاثیر قرار گرفتن آن‌ها از انفجار و یا دگرشکلی آن‌ها بر اثر هوازدگی و پنهان ماندن در زیر گیاهان است. همچنین مهارت کافی برای اندازه‌گیری‌ها نیاز خواهد بود، هزینه تجهیزات و کارگر در مقایسه با هزینه مغزه حفاری ناچیز است. تا این اواخر، اندازه‌گیری‌ها بر روی رخنمون‌های سنگی به صورت دلخواه و قضاوت شخصی از برداشت‌های زمین‌شناسی تهیه می‌شد که این روش تنها برخی از داده‌های کمی را برای طراحی‌های مهندسی فراهم می‌کرد. اخیراً روش‌های بهتر و قوی‌آماری برای برداشت داده‌ها معرفی شده، که شامل دو روش خط برداشت و پنجره برداشت می‌باشند. این روش‌ها توسط محققین تشریح و معرفی شده‌اند (Priest et al., 1981; Baecher et al., 1978). در ادامه به بررسی هر یک از آنها پرداخته خواهد شد.

الف) روش خط برداشت

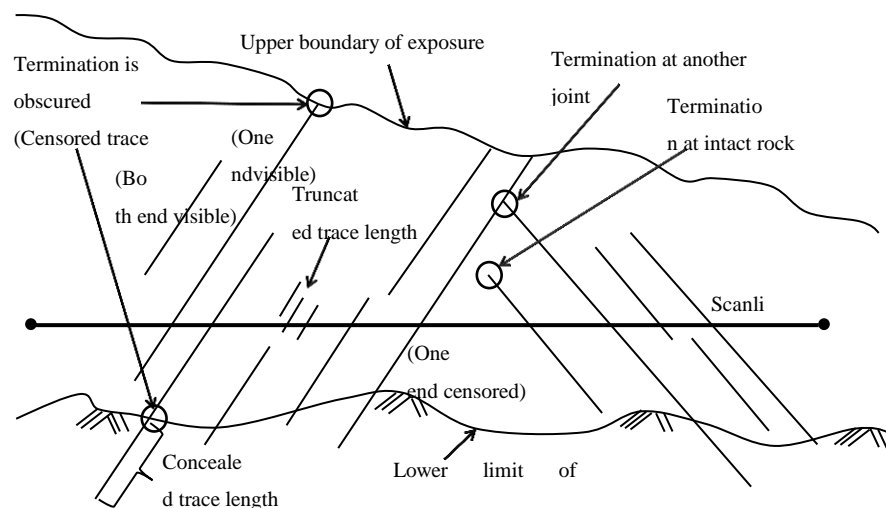
در مورد این روش نکته قابل توجه این است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش خط برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم را برای هدف مورد نظر جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی سنگ تطابق داد (Priest, 1993).

سطوح مسطح تمیز سنگی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله ناپیوستگی‌ها بزرگ باشند. با توجه به نظر محققین، باید رخنمون انتخابی شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتها از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد. چنین رخنمون‌هایی در پرتگاه‌های کنار ساحل، شیب‌های حاصل از احداث جاده‌ها، پیت‌های معدنی و یا تونل‌های دسترسی، یافت می‌شوند. باید در

انتخاب سایت دقت کرد که ناپیوستگی‌ها و مواد سنگ نمایانگر آن مکان و نیز رخنمون انتخابی برای کار برداشت ایمن باشد (زادهش، ۱۳۹۱).

فصل مشترک ناپیوستگی‌ها و رخنمون‌های سنگی به صورت خطواره‌هایی در سطح سنگ دیده شده و شبکه دوبعدی از ناپیوستگی را تشکیل می‌دهند. ابزار استفاده از خط برداشت متر نواری ۲ تا ۳۰ متر می‌باشد که توسط دو میخ در امتداد رخنمون و بیشترین شیب سنگی ثابت می‌شود (شکل ۴-۱). همچنین خط برداشت‌های ثانویه عمود بر خط برداشت اولیه، برای کم کردن خطای جهت‌داری برداشت می‌شوند. بهتر است که نقطه شروع خط برداشت از یک ناپیوستگی باشد، ولی رعایت این نکته چندان مهم نیست. موقعیت مکانی، جهت‌داری شرایط رخنمون سنگی همراه زاویه میل و امتداد خط برداشت در قسمت بالایی ورقه برداشت ثبت خواهد شد. نمونه‌ای از این ورقه‌ی که برای برداشت داده‌ها در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است، در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

در این روش به منظور برداشت ناپیوستگی‌ها از یک خط مشخص که دارای زاویه میل و امتداد معلوم است، استفاده می‌شود و تمام پارامترهای هر ناپیوستگی که خط برداشت را قطع کند، ثبت می‌شوند. تمام داده‌های مورد نیاز این تحقیق با این روش جمع‌آوری شده است.



شکل ۴-۱: نمای خط برداشت و معرفی انواع پایانه درزه‌ها (درزه‌هایی که هر دو انتهای آن دیده می‌شود،

درزه‌هایی که یک انتهای آن‌ها دیده می‌شوند و درزه‌هایی که هیچ انتهای آن دیده نمی‌شود) (بر گرفته از

((Priest, 1993)

تصادفی تولید می‌شود.

۴-۳- برداشت پارامترهای هندسی شکستگی

در توده‌سنگ، شکستگی‌ها به‌صورت دسته‌ای وجود دارند و شکستگی‌های موجود در هر یک از دسته‌ها، در زمان یکسان و با پروسه‌ای مشابه ایجاد شده‌اند و غالباً دارای خواص یکسانی هستند که توجه به این مطلب قبل از اندازه‌گیری‌های میدانی خیلی مهم است. رخنمون شکستگی‌ها در مقاطع دوبعدی معمولاً به‌صورت خط دیده می‌شود و نقشه‌های رخنمون شکستگی‌ها، توصیفی از شکل شکستگی را ارائه نمی‌کند. اگر توزیع طول رخنمون در مقاطع متعامد شبیه به هم باشند، ممکن است شکستگی‌ها دارای جهت‌داری با توزیع تصادفی باشند.

شکل شکستگی‌ها در حالت کلی به‌صورت پلی‌گون با نسبت طول به عرض متوسط می‌باشد (Pierre et al., 1999). همچنین در سنگ‌های متراکم، شکستگی‌ها به‌صورت بیضوی شکل می‌باشد (Min, 2004). به هر حال تعیین شکل دقیق شکستگی‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و در حالتی که شکل شکستگی‌ها وضوح نداشته باشد، شکستگی‌ها به‌صورت دیسکی فرض می‌شوند. شکستگی‌ها در اندازه‌ها، اشکال، موقعیت‌ها و جهت‌های مختلف وجود دارند که آنالیزهای دقیق فاکتورهای هندسی برای روش‌های ناپیوسته لازم است. تعداد شکستگی‌های موجود در هر دسته شکستگی معمولاً به‌صورت‌های مختلفی تعریف و اندازه‌گیری می‌شوند.

تعداد شکستگی‌ها در واحد طول تحت عنوان فراوانی خطی شکستگی‌داری شناخته می‌شوند که بایستی برای هر دسته درزه اندازه‌گیری شوند. طول مجموع خط اثر همه شکستگی‌های قطع شده روی صفحه‌ی برداشت تحت عنوان فراوانی صفحه‌ای شکستگی‌داری شناخته می‌شوند.

دانستن فراوانی شکستگی‌ها بدین معنی نیست که تعداد شکستگی‌ها در یک حجم مشخص است چون این دو مفهوم وابسته به‌شکل و اندازه شکستگی‌های موجود در حجم هستند (Min, 2004.; Jing and Stephansson, 2007).

بیشتر مطالعات انجام شده روی شبکه شکستگی و خواص شکستگی‌ها، بر روی طول رخنمون متمرکز شده است. با استفاده از تابع توزیع چگالی طول رخنمون برداشت شده و انجام تصحیحات بر روی آنها، می‌توان تابع توزیع چگالی برای هر دسته درزه را به دست آورد. با توجه مطالب ذکر شده در بالا، خواص هندسی ناپیوستگی‌ها معمولاً به صورت توزیع‌های آماری توصیف می‌شوند.

۴-۴- توصیف هندسی توده‌سنگ با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا (DFN)

هدف از ایجاد شبکه شکستگی تصادفی، ایجاد مدل هندسی و یا عددی از شکستگی‌هاست که در مقیاس دوبعدی و یا سه‌بعدی انجام می‌شود و نشان‌دهنده مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط می‌باشد. روش شکستگی مجزا (DFN¹) یک ابزار غیرقابل جایگزین برای مدل‌سازی جریان سیال است که در آن تسلط و غلبه هندسه شکستگی به‌طور صریح و با جزئیات تقریب زده می‌شود. در موقعیت میدان نزدیک، بیش از یک شکستگی در دامنه مسئله وجود دارد ولی این تعداد از شکستگی شرط لازم برای استفاده از محیط معادل را ایجاد نمی‌کند و بایستی از شبکه شکستگی استفاده کرد (Pierre et al., 1999).

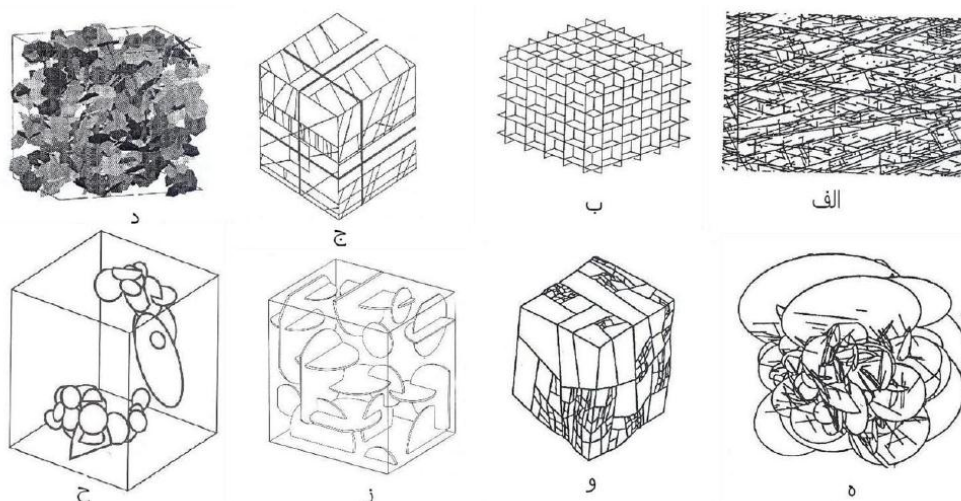
نکته کلیدی مدل‌سازی شبکه شکستگی در توده‌سنگ، برآورد مناسب پارامترهای هندسی حاصل از برداشت می‌باشد. همچنان که بیان شد اطلاعات لازم برای ایجاد یک شبکه شکستگی معمولاً از طریق نمونه‌برداری یا برداشت شکستگی از روی سطوح قابل دسترس مثل رخنمون‌ها و یا گمانه‌های حفاری به دست می‌آید.

در توزیع‌های دوبعدی اطلاعات برداشت‌شده بایستی مورد توجه قرار گیرند چون برداشت‌ها فقط به صورت دوبعدی انجام می‌شود و فقط تصویر دو بعدی شکستگی‌ها قابل مشاهده است که بایستی به

¹ Discrete Fracture Network

توزیع سه بعدی تعمیم داده شوند. همچنین تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده سنگ، لزوم استفاده از آنالیزهای آماری را نشان می‌دهد (Pierre et al, 1999).

به‌طور کلی شبکه شکستگی معمولاً در قالب مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند. شبکه شکستگی دوبعدی معمولاً برای تحلیل دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌صورت خطوط ناپیوستگی بر روی صفحه نمایش داده می‌شوند. برای ایجاد شبکه شکستگی معمولاً به توابع دوبعدی پارامترهایی مثل جهت‌داری و فاصله‌داری و اندازه شکستگی نیاز است. مدل‌های سه‌بعدی با انواع مختلفی از شکل‌های هندسی شکستگی ساخته می‌شوند که می‌توان صفحه‌ای از مدل سه‌بعدی را با شیب و جهت شیب، برش داد. شکل شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی با انواع مختلفی از شکل‌های هندسی شکستگی ساخته می‌شوند. شکل شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی ممکن است به‌صورت دیسک‌های دایره‌ای، صفحات بیضوی، صفحات پلی‌گون، صفحات متعامد مجزا، صفحات متعامد نامحدود و صفحات نامحدود باشد (شکل ۴-۴) (Itasca Consulting Group Inc, 2013).



شکل ۴-۴: انواع مدل‌های سه‌بعدی شبکه شکستگی مجزا DFN

۴-۵- نحوه تولید DFN برای توده‌سنگ درزه‌دار

یکی از روش‌های پرکاربرد شبیه‌سازی تصادفی، استفاده از روش مونت کارلو است. تعیین توابع توزیع حاکم بر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها برای شبیه‌سازی تصادفی توده‌سنگ با استفاده از این روش الزامی است. محققان مختلف برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها، توابع توزیع احتمالی که با انطباق واقعی پراکندگی پارامترهای هندسی، شکستگی‌های توده‌سنگ را توصیف می‌کنند، تعیین کرده‌اند. توزیع آماری این پارامترهای هندسی در جدول ۴-۱ درج شده است (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۹۱ الف).

جدول ۴-۱: توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی‌های توده‌سنگ

پارامتر هندس	تابع توزیع
اندازه شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
جهت شیب	توزیع فیشر، توزیع آرنولد
طول رخنمون	لاگ نرمال، نمایی منفی
فاصله‌داری شکستگی‌ها	لاگ نرمال، نمایی منفی، قانون توان
موقعیت مرکز شکستگی	توزیع پواسون

۴-۵-۱- تولید تصادفی محل شکستگی

با فرض تابع توزیع پواسون برای محل شکستگی‌ها در مدل هندسی، مرکز شکستگی‌ها با تولید اعداد تصادفی بر اساس الگوریتم بازگشتی تولید شده است که در آن بخش اعشاری اعداد محاسبه‌شده، با معادله برگشت‌پذیر ۴-۱ تولید می‌شود.

$$R_{i+1} = 27 \times R_i - INT(27 \times R_i) \quad (۴-۱)$$

که در آن R_i عدد تصادفی در بازه $0 \leq R_i \leq 1$ ، $INT()$ جزء صحیح عدد داخل پرانتز را تولید می‌کند. مقدار اولیه R_0 با استفاده از الگوریتم همنشتی افزایش یافته تولید می‌شود. اگر فضای تولید

برحسب بازه‌های در راستای مختصات محلی کارترین تعریف شده باشند
(معادله ۲-۴ و ۳-۴) (Baghbanan and Jing, 2007).

$$x_i = x_{g1} + R_i(x_{g2} - x_{g1}) \quad (۲-۴)$$

$$y_i = y_{g1} + (y_{g2} - y_{g1}) \quad (۳-۴)$$

با روش مذکور مختصات مرکز هندسی شکستگی‌ها در محدوده مدل هندسی دو بعدی مورد نظر تولید می‌گردد.

۴-۵-۲- تولید تصادفی شیب شکستگی

در شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم شکستگی‌ها، جهت‌داری هر شکستگی با دو پارامتر شیب و جهت شیب مشخص می‌شود، ولی در حالت دوبعدی شیب (شیب ظاهری) شکستگی کافی است تا وضعیت آن مشخص شود. در بیشتر مطالعات، فرض می‌شود که در محدوده دوبعدی، شیب واقعی (حداکثر شیب) نمایان است (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۹۱ الف).

در مطالعات مختلف، استفاده از تابع توزیع فیشر برای زاویه شیب شکستگی، عمومیت دارد (معادله ۴-۴). تابع توزیع فیشر، احتمال پیداکردن یک جهت در سطح زاویه‌ای با زاویه θ از میانگین واقعی واقع شده است، بیان می‌کند (میرزائی نصیرآباد، ۱۳۹۱ ب).

$$f(\theta) = \frac{Ke^{k \cos(\theta)}}{2\pi(e^k - e^{-k})} \quad (۴-۴)$$

ثابت فیشر (k حرف کوچک)، مقیاسی از پراکندگی حول میانگین زاویه شیب می‌باشد. این تابع، توزیع متقارن حول شیب میانگین دارد و همانطور که انتظار می‌رود، تابع توزیع دارای بیشترین مقدار میانگین واقعی ($\theta = 0$) است. مقدار بزرگتر K (حرف بزرگ)، تمرکز شدید حول میانگین واقعی را پیش‌بینی می‌کند. مقدار تیپیک K (حرف بزرگ) برای درزه‌های سنگ در یک دسته درزه، از ۲۰ تا ۳۰ تغییر می‌کند.

زاویه شیب هر شکستگی تصادفی با استفاده از توزیع فیشر از رابطه ۴-۵ به دست می‌آید.

$$\Delta\theta = \cos^{-1}\left[\frac{\text{Ln}(1 - \text{Random}(0,1))}{K} + 1\right] \quad (5-4)$$

که $\Delta\theta$ انحراف زاویه شیب شکستگی از زاویه میانگین می‌باشد و $\text{Random}(0,1)$ عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک است.

۴-۵-۳- تولید تصادفی طول خط اثر شکستگی‌ها

در مطالعات مختلف، برای شبیه‌سازی سیستم شکستگی‌ها، عموماً از توابع لاگ نرمال و نمایی منفی برای توصیف طول خط اثر شکستگی استفاده شده است. توابع توزیع استفاده‌شده توسط محققان مختلف برای طول خط اثر، در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

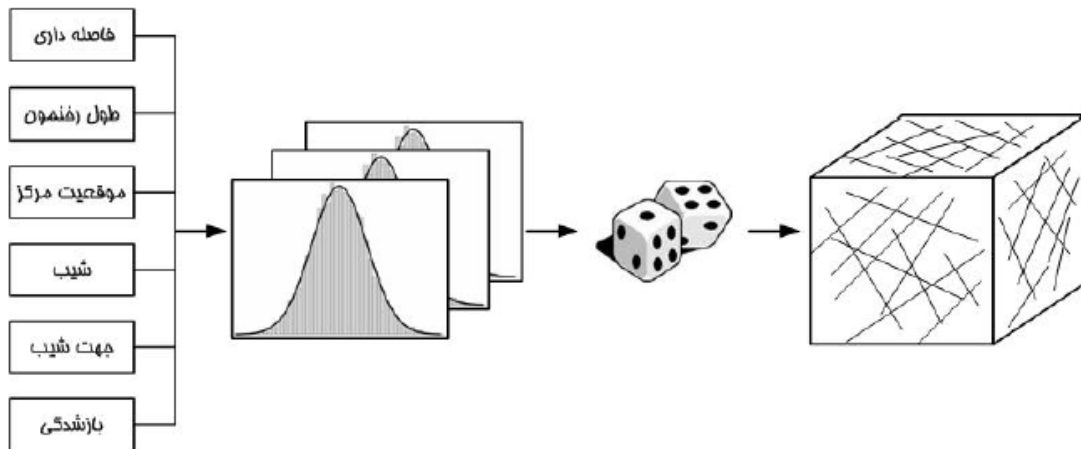
جدول ۴-۲: انواع توابع توزیع برای طول خط اثر (Ranjith, 2000)

نوع تابع توزیع	محقق
نمایی منفی	سامانیانو (۱۹۸۴) و وی و همکاران (۱۹۹۵)
نمایی	پریست و هادسون (۱۹۸۱)
لاگ نرمال	برایجز (۱۹۷۶) مس ماهون (۱۹۷۱)
گاما	درشویتز (۱۹۸۴)

۴-۶- شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی با روش مونت کارلو

در مطالعات مختلف مهندسی سنگ برای توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ، از شبیه‌سازی مونت کارلو بر پایه شبکه شکستی مجزا استفاده می‌شود. شبیه‌سازی مونت کارلو یک فرآیند تصادفی است که تصادفی بودن هندسه شکستگی‌ها را با نمایش خواص شکستگی نظیر موقعیت، اندازه، جهت‌داری و بازشدگی به صورت متغیرهای تصادفی که از توابع چگالی احتمال مخصوص تبعیت می‌کنند، بیان می‌نماید. شکل ۴-۵ مکانیزم تولید شکستگی‌های مختلف با روش مونت کارلو را به طور

شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ با روش مونت کارلو

(میرزائی نصیرآباد، ۱۳۹۱ الف)

شبیه‌سازی مونت کارلو، برای کاهش عدم قطعیتی که بواسطه ناشناخته بودن هندسه سیستم شکستگی‌ها بوجود می‌آید، یک ابزار کارآمد می‌باشد و کمی‌سازی تغییرات پارامترها را توسعه می‌دهد. این ابزار مخصوصاً برای مهندسی فضاهای زیرزمینی در سنگ درزه‌دار مفید می‌باشد. البته زمان محاسباتی زیادی لازم است تا تعداد زیادی "مدل تصادفی"^۱ (مدل مفهومی) تولید شده و به عنوان مدل‌های هندسی برای مطالعات بعدی نظیر مدل‌سازی عددی، استفاده می‌شود.

۴-۷- نرم‌افزار شبیه‌سازی تصادفی توده‌سنگ (3DEC)

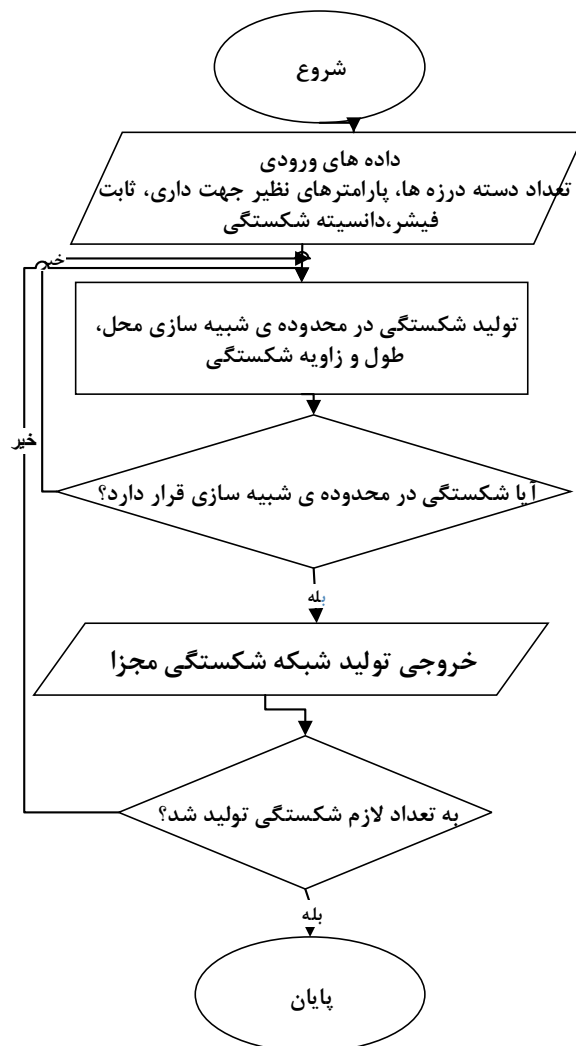
شکستگی‌های موجود در طبیعت با استفاده از سه پارامتر شیب، جهت شیب و موقعیت شکستگی برداشت می‌شوند و اگر در ابعاد مشخص تک‌تک شکستگی‌ها شبیه‌سازی شود بسیار مشکل و زمان‌بر خواهد بود.

در نرم‌افزار 3DEC، از روش‌های آماری برای نمایش شکستگی‌ها استفاده می‌شود. در این روش‌ها، پارامترهای آماری برای هر دسته از درزه‌ها تعریف و به‌عنوان ورودی‌های نرم‌افزار استفاده می‌شوند.

¹ Realization

شبکه شکستگی مجزا، مدل آماری درزه‌ها را ارائه می‌نماید. یک مدل DFN می‌تواند چند مدل تصادفی داشته باشد که می‌توان در 3DEC این مدل‌های تصادفی را تولید کرد. البته برای تولید مدل‌های DFN نرم‌افزارهای تجاری دیگر همچون FracMan، FRACA، NAPSاک و DFN- FRAC3D توسعه داده شده‌اند که در مطالعات مکانیک‌سنگ به کار می‌روند (Noroozi et al, 2015).

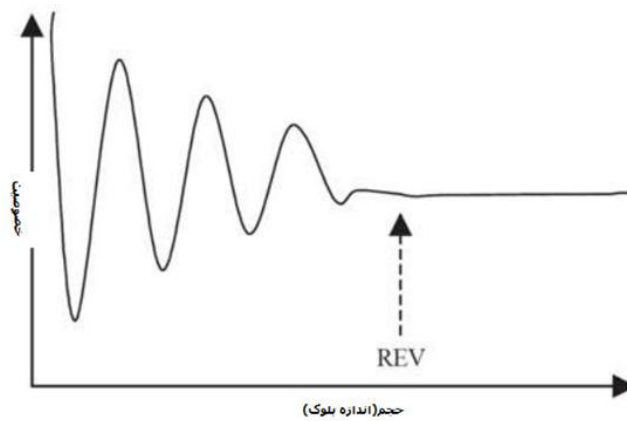
روش مدل‌سازی DFN تصادفی است و مشخصات هندسی یک مدل DFN تنها از طریق تعیین توزیع‌های آماری خواص هندسی توده‌سنگ به دست می‌آید. مشخصات هندسی DFN شامل: اندازه شکستگی (قطر)، توزیع جهت‌داری و موقعیت است. الگوریتم کلی شبیه‌سازی تصادفی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ بر پایه شبکه شکستگی مجزا در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: فلوچارت شبیه‌سازی شبکه شکستگی مجزا برای توده‌سنگ درزه‌دار (میرزائی، ۱۳۹۱ب)

۴-۸ - ابعاد مدل DFN

اولین گام در بررسی جریان در یک توده سنگ درزه و شکافدار، تهیه مدل شبکه شکستگی‌ها است که با استفاده روش‌های آماری^۱ و بر اساس خصوصیات هندسی درزه‌ها شامل جهت، فراوانی، طول اثر و بازشدگی درزه‌ها انجام می‌گیرد. این موضوع در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد نفوذپذیری معادل^۲ شبکه شکستگی‌ها، برای بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف، تعیین می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که تغییر مقدار نفوذپذیری محاسبه‌شده با افزایش اندازه قطعه انتخاب‌شده برای هر سیستم شبکه تا قبل از یک حد معین، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند که این اندازه به عنوان المان حجم معرف^۳ (REV) توده‌سنگی (شکل ۴-۷) مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود (Pariseau, 2008). در نهایت ضریب نفوذپذیری معادل REV به عنوان ابعاد نفوذپذیری معادل توده سنگ مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۴-۸ اندازه REV نفوذپذیری برای تونلی در امریکا نشان داده شده است (Wang et al., 2002).

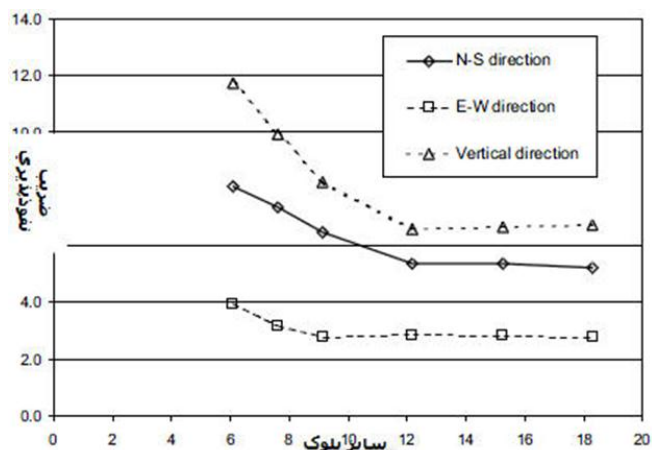


شکل ۴-۷: تعریف المان معرف حجم (Zhou, 2014)

¹ Stochastic

² Equivalent Permeability

³ Representative Element Volume



شکل ۴-۸: المان معرف حجم نفوذپذیری به دست آمده از تونلی در امریکا. (Wang et al., 2002)

پوری^۱ و پاریسوی^۲ بر اساس نتایج حاصل از تغییر ابعاد بلوک برای چندین مطالعه موردی دریافتند که المان معرف حجم، ۱۰ برابر ماکزیمم فاصله‌داری دسته درزه‌هاست (Pariseau, 2008). همچنین ویتراسیون^۳، با توجه به رابطه ۴-۶، مقدار ۱۰ تا ۲۰ برابر متوسط فاصله‌داری درزه‌ها (\bar{s}_a) را برای ابعاد REV نفوذپذیری (D_{REV}) پیشنهاد نمود (Long et al., 1982).

$$D_{REV} = [10,20] \bar{s}_a \quad (۴-۶)$$

برای محاسبه متوسط فاصله‌داری برای هر دسته درزه (\bar{S}) از رابطه ۴-۷ و برای محاسبه متوسط فاصله‌داری برای همه درزه‌ها (\bar{s}_a) از رابطه پالمسترم (رابطه ۴-۸) استفاده می‌شود (Priest, 1981; Palmstrom, 2001).

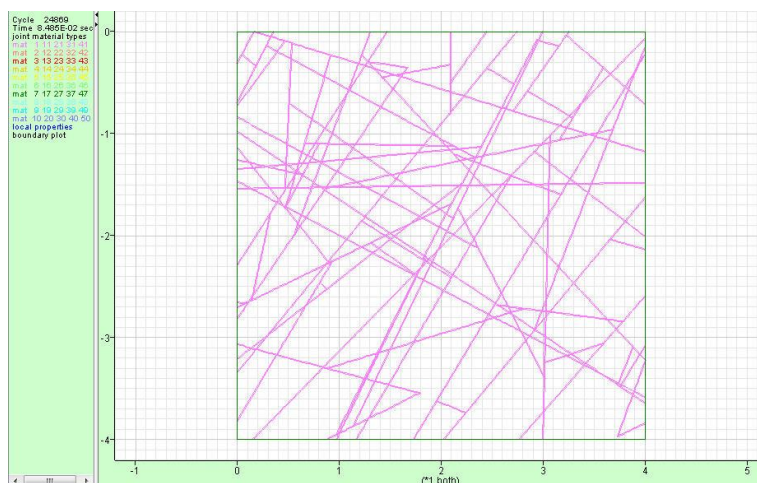
$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n s_i/n \quad (۴-۷)$$

$$1/\bar{s}_a = 1/\bar{s}_1 + 1/\bar{s}_2 + 1/\bar{s}_3 \quad (۴-۸)$$

¹ Puri
² Pariseau
³ Witherspoon

۹-۴ - مدل سازی دوبعدی DFN در UDEC

مدل سه بعدی DFN در راستای شیب و جهت شیب، خط برداشت مطالعه موردی برش زده می شود تا بتوان مدل DFN دو بعدی را تولید کرد. مدل دوبعدی DFN ساخته شده در نرم افزار UDEC وارد می شود تا پس از اعمال شرایط مرزی و همبستگی بین بازشدگی و طول خط اثر، اثر زبری سطح درزه بر جریان سیال بررسی شود. در شکل ۹-۴ نمونه مدل DFN دو بعدی ساخته در UDEC نشان داده شده است.



شکل ۹-۴: شبیه سازی مدل سازی دو بعدی DFN، در نرم افزار UDEC

۱۰-۴ - همبستگی بین طول خط اثر و بازشدگی

جهت وارد کردن مقدار بازشدگی درزه در نرم افزار UDEC، بررسی رابطه طول خط اثر و بازشدگی الزامی می باشد، چون از طریق طول خط اثر برای هر درزه می توان بازشدگی متناسب با آن درزه را وارد نرم افزار کرد. محققین بسیاری در این زمینه فعالیت کرده اند که در ادامه نتایج بررسی های تعدادی از آنان مرور شده و سپس رابطه مورد نظر جهت استفاده در این مطالعه، مورد بررسی قرار می گیرد.

استون^۱، هاتون^۲ و والمان^۳ برای توسعه رابطه بین طول خط اثر و بازشدگی تحقیقات گسترده‌ای بر روی نتایج برداشت شکستگی‌های زمین انجام دادند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که همبستگی بین این دو پارامتر از تابع توانی^۴ تبعیت می‌کند (Baghbanan, 2008; Dreuzy et al., 2001).

استون علت رابطه احتمالاتی بین بازشدگی و طول خطاثر درزه را، تغییرپذیری این دو پارامتر با هم بیان نمود، زیرا شرایط تشکیل، دگرگونی و دگرسانی این دو پارامتر شبیه به هم می‌باشد.

هاتون رابطه بین طول خط اثر و ماکزیمم بازشدگی شکستگی‌ها را مورد بررسی قرار داد و دریافت که همبستگی بین طول خط اثر و بازشدگی از تابع توانی پیروی می‌کند (Dreuzy et al, 2001).

والمان الگوی شکستگی‌های گسلیده را مورد بررسی قرار داد و رابطه‌ی جدیدی پیشنهاد داد که در آن بازشدگی دهانه درزه (h) تابعی از طول خط اثر (l) است و در نهایت رابطه ۴-۹ را ارائه کرد:

$$(1-\beta)/\beta \quad (9-4)$$

$$h \approx l$$

$$\beta = 0.68 \pm 0.03$$

تحقیقات تجربی توسط مارریت منجر به رابطه همبستگی بین بازشدگی و طول خط اثر شد (معادله ۴-۱۰) (Baghbanan, 2008):

$$h = gl^m \quad (10-4)$$

که m و g ثابت‌های تجربی مقیاس هستند.

ورملیا و همکارانش (Vermilye et al., 1995) پس از بررسی نتایج حاصل از رابطه بین بازشدگی A و طول خط اثر l ، مقدار توان طول خط اثر (m) را 0.5 در نظر گرفتند (رابطه ۴-۱۱).

$$A = c_2 l^{0.5} \quad (11-4)$$

جانستون و میکافری در سال ۱۹۹۶ رابطه ۴-۱۲ را ارائه دادند (Baghbanan, 2008):

¹Stone
² Hatton
³ Walmann
⁴ Power law

$$l = kh^a \quad (12-4)$$

$$0.6 < a < 1$$

$$20 < k < 200$$

که l طول خط اثر و h بازشدگی درزه بر حسب میلی‌متر می‌باشند و پارامتر a برای رگه‌های کوچک در بازه‌ی 0.7 تا 0.8 قرار می‌گیرد (Johnston et al., 1996).

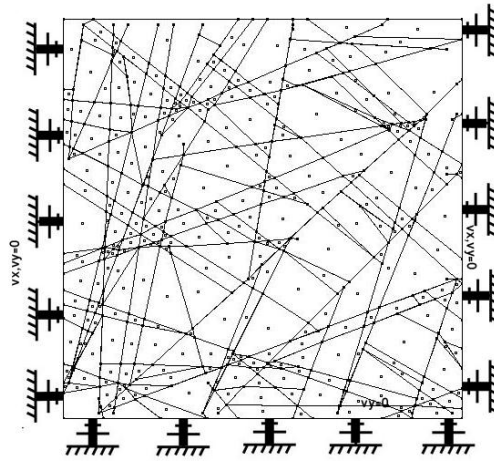
۱۱-۴- شرایط مرزی

روش‌های عددی با استفاده از جداسازی نواحی محدود از فضای اصلی، جهت طبیعی‌تر نمودن رفتار مدل، از شرایط مرزی استفاده می‌کنند. شرایط مرزی در یک مدل عددی عبارت است از متغیرهای میدانی (مثلاً تنش و جابجایی) که در مرز مدل تعریف می‌شوند. دو نوع شرایط مرزی که بر مرزها اعمال می‌شود، جابجایی و تنش هستند (Itasca Consulting Group Inc, 2000).

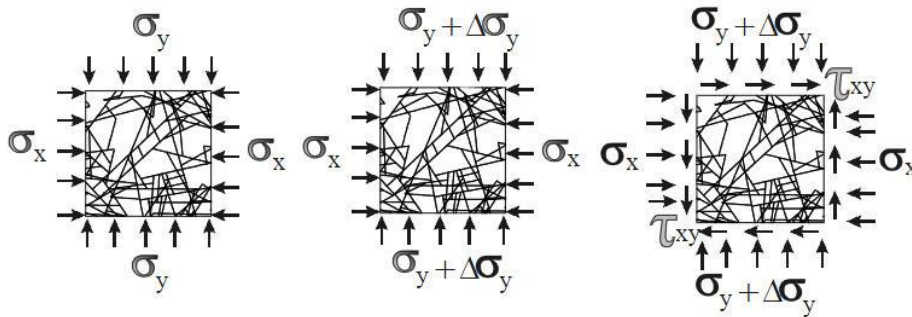
جابجایی‌های مرزی را نمی‌توان در UDEC به طور مستقیم کنترل کرد، لذا با انتخاب ابعاد مناسب مدل می‌توان تأثیر جابجایی‌های مرزها بر حفر سازه و بالعکس را به صفر رسانید و بدین‌منظور پس از انتخاب ابعاد مناسب، لازم است که مرزها را ثابت کرد (شکل ۴-۱۰).

مرزهای یک مدل در UDEC به‌طور پیش‌فرض، فاقد تنش و هرگونه محدودیتی هستند، لذا مقدار تنش‌ها توسط کاربر اعمال می‌شود (Itasca Consulting Group Inc, 2000). در شکل ۴-۱۱ شرایط مرزی برای بررسی خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار، شامل بارگذاری چندمحوره می‌باشد، نشان داده شده است که (Min, 2011; Jing and Stephansson, 2007; Baghbanan, 2008).

در مدل دوبعدی از بارگذاری تک‌محوره، امکان دارد نتایج نادرستی حاصل شود، لذا برای پرهیز از این مشکل در این پایان‌نامه از بارگذاری چند محوره جهت مدل‌سازی و بارگذاری استفاده می‌شود (Min, 2011).



شکل ۴-۱۰: نحوه‌ی ثابت کردن جابجایی مرزها (سرعت)، v_x, v_y سرعت در راستای x و y



شکل ۴-۱۱: شکل‌های مختلف از نحوه بارگذاری مدل (Min, 2011)

در شکل ۴-۱۲ نحوه‌ی بارگذاری بلوک نمایش داده شده است. تنش افقی و تنش قائم از طریق

معادلات زیر محاسبه می‌شوند (Hoek and Brown, 1978).

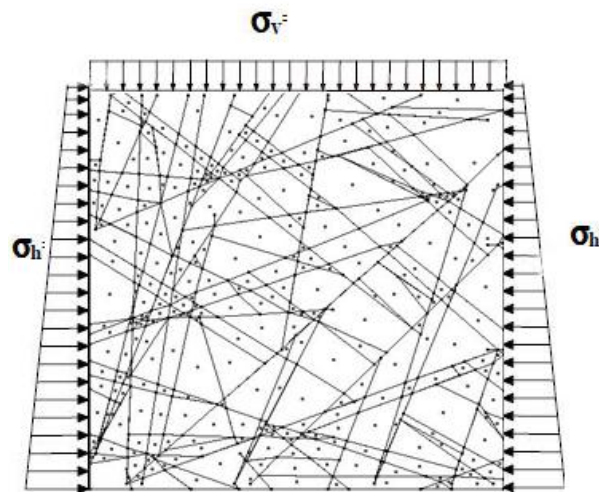
$$\sigma_h = \sigma_z = \rho gh \quad (13-4)$$

$$\sigma_v = \sigma_x = \sigma_y = k \sigma_h \quad (14-4)$$

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (15-4)$$

که σ_h تنش در راستای قائم، σ_v تنش در راستای افقی (صفحه عمود بر راستای قائم و مؤلفه‌های x و

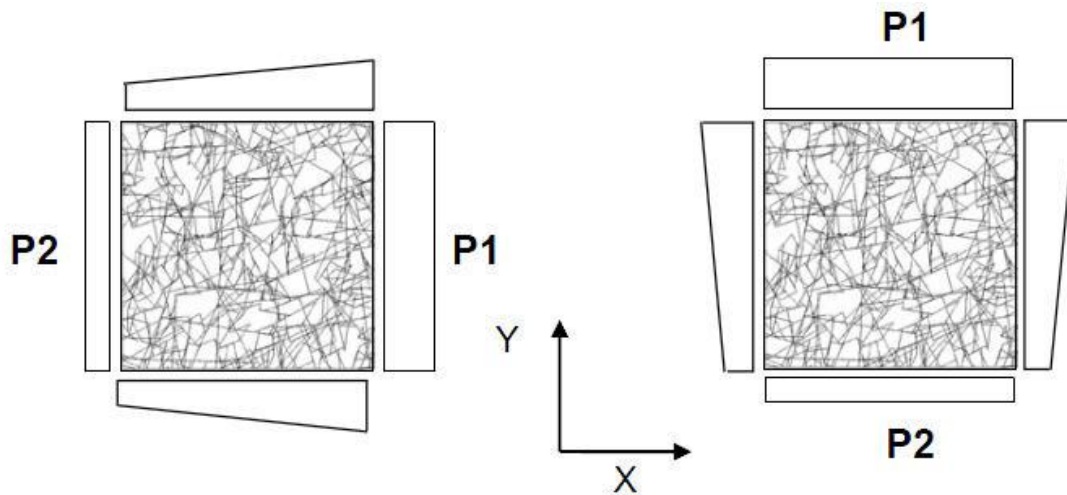
y)، ضریب پواسون، h عمق بلوک، g شتاب گرانشی و ρ چگالی سنگ می‌باشد.



شکل ۴-۱۲: نحوی بارگذاری مدل دو بعدی DFN

۴-۱۱-۱- شرایط مرزی برای اعمال فشار سیال

شرایط مرزی جریان سیال در نرم افزار UDEC، همانند شرایط اعمال تنش‌ها می‌باشد. ابتدا جابجایی مرزها ثابت و برابر صفر قرار داده می‌شود و سپس مطابق شکل ۴-۱۳ فشار سیال بر مرزها اعمال می‌شود (Oda, 1988; Baghbanan and Jing, 2007, Baghbanan, 2008).



شکل ۴-۱۳: نحوه‌ی اعمال فشار سیال بر مرزها (Oda, 1988)

۴-۱۲ - مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر زبری در قالب مدل‌های DFN

ناپیوستگی‌ها، تأثیر به‌سزایی بر روی انتقال سیال در فضاهاى زیرزمینی (مانند نقش شکستگی‌ها در ذخایر نفت و گاز یا سفره‌های آب زیرزمینی) دارند. جریان سیال یا انتقال سیال میان شکستگی‌ها را می‌توان به‌وسیله مدل‌های شبکه شکستگی مجزا (DFN) شبیه‌سازی کرد. مدل‌های DFN برپایه اطلاعات پارامترهای هندسی شکستگی‌ها در قالب توابع توزیع آماری و اغلب با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ساخته می‌شوند (Blum et al., 2005).

در زمینه بررسی تأثیر زبری در قالب مدل‌های DFN بر جریان سیال، تاکنون مطالعات انگشت‌شماری انجام گرفته و این پایان‌نامه نگرش جدید و مثبتی از تأثیر زبری در قالب مدل‌های DFN را ارائه می‌دهد و به‌وضوح نوآوری این پایان‌نامه در بررسی تأثیر پارامتر زبری سطح درزه بر جریان سیال در توده‌سنگ درزه‌دار مشاهده می‌شود.

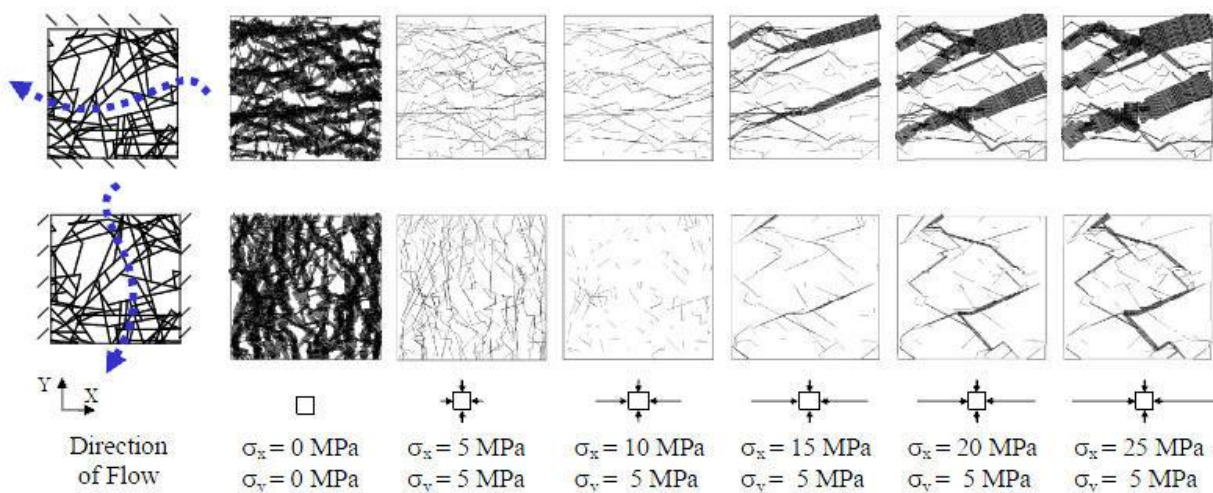
امروزه پس از برداشت پارامترهای هندسی شکستگی‌ها و تعیین دسته درزه‌های اصلی، تأثیر زبری درزه نادیده گرفته می‌شود و یا برای هر دسته درزه ثابت فرض می‌شود. همچنین پس از مدل‌سازی در نرم‌افزارهای دوبعدی و سه‌بعدی خصوصیات بازشدگی و زبری سطح درزه برای هر دسته درزه ثابت فرض می‌شود و با این ساده‌سازی، مدل را تحت فشار سیال مورد بررسی قرار می‌دهند. همچنین رویکرد آماری خصوصیات هندسه شکستگی‌ها بر جریان سیال مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و این مدل‌ها نمی‌توانند، مدلی واقعی از توده‌سنگ واقعی باشند (Saeidi et al, 2013). در ادامه دو مطالعه انجام گرفته در این زمینه ذکر خواهد شد که از مدل‌های DFN برای بررسی جریان سیال استفاده می‌کنند البته تأثیر زبری بر جریان سیال به‌صورت متغیر و آماری مورد بررسی قرار نگرفته است و این پارامتر ثابت فرض شده است.

باغبانان (Baghbanan, 2008) به‌منظور بررسی تأثیر بازشدگی هیدرولیکی از رویکرد^۱ DFN – DEM استفاده کرده است. ایشان با در نظر گرفتن همبستگی بین طول و بازشدگی دهانه درزه به بررسی

¹ Discrete Element Method

رفتار توأمان آب‌گذری - مکانیکی پرداخته است. ایشان یک رابطه مستقیم بین توزیع محدودشده‌ی لگاریتمی بازشدگی درزه‌ها و توزیع محدودشده توانی درزه‌ها، که از عملیات برداشت درزه به‌دست آمده را، ارائه داده‌اند. سپس REV نفوذپذیری توده‌سنگ را محاسبه و اندازه مدل را به‌دست آورده و شرایط مرزی را بر مدل اعمال کرده است. در نهایت نتایج آب‌گذری در مدل را برای بازشدگی درزه ثابت و بازشدگی متغیر بررسی نموده و نتایج را با هم مقایسه کرده است.

در مطالعه‌ای دیگر، کی‌بوکمین و استفانسون از رویکرد DEM - DFN برای بررسی تأثیر تنش بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ در فورسمارک سوئد پرداختند. بندیس برای بررسی تأثیر پارامترهای سطح شکستگی‌ها بر جریان سیال در مدل‌های واقعی DFN، از معیار بارتون - بندیس استفاده کردند. برای این منظور، با استفاده از روش پنجره برداشت، خصوصیات ناپیوستگی‌ها را برداشت کردند و سپس مدل‌های DFN واقعی منطقه را تولید کردند. برای هر دسته درزه مقدار $JRC=6$ را پیش‌بینی کردند و سپس جریان سیال را در مدل دوبعدی DFN تحت تنش‌های مختلف به‌دست آوردند که در شکل ۴-۱۴ یکی از نتایج آن نشان داده شده است (Min et al., 2011).



شکل ۴-۱۴: مدل دوبعدی DFN استفاده‌شده توسط کی‌بوکمین و استفانسون جهت بررسی تأثیر تنش بر جریان

سیال (Min et al., 2011).

۴-۱۳- جمع‌بندی

برای مدل‌سازی رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار، ابتدا لازم است که پارامترهای مؤثر هندسه شکستگی بر جریان سیال بررسی شود و نقش این عوامل در دبی جریان سیال لحاظ شود. در طبیعت توده‌سنگ شامل شکستگی‌های فراوان با خصوصیات متفاوت می‌باشد که باعث ناهمگنی شدید محیط می‌شود. در نتیجه جریان سیال در محیط‌های سنگی پیچیده می‌باشد. برای تحلیل عددی توده‌سنگ، ابتدا باید مدل واقعی آن را ساخته و سپس تأثیر پارامترهای هندسه شکستگی را بر جریان سیال بررسی کرد. با توجه به وجود عدم قطعیت در خواص ناپیوستگی در طبیعت، برای ساختن مدل واقعی و قابل اعتماد که در آن هندسه شکستگی‌ها همخوانی مناسبی با واقعیت داشته باشد، از توابع توزیع برای نمایش صریح این خواص استفاده می‌شود. با توجه به این نکات و طبیعت آماری هندسه شکستگی‌ها، استفاده از شبکه شکستگی مجزا (DFN)، برای تحلیل مناسب، غیر قابل اجتناب ناپذیر است. فرآیند تولید مدل‌های DFN با استفاده از پارامترهای آماری و توابع توزیع مربوط به برخی از خصوصیات شکستگی‌ها و با بهرمندی از شبیه‌ساز مونت کارلو تکمیل می‌شود.

پارامترهای مؤثر هندسه شکستگی‌ها برای تولید مدل‌های DFN شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، شکل، طول اثر، اندازه، دانسیته و موقعیت مرکز شکستگی می‌باشند که برای تولید این مدل‌ها، از نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر است با استفاده از پارامترهای هندسه شکستگی‌ها که از روش‌های مختلف خط برداشت، پنجره برداشت و .. برداشت می‌شود، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش گرافیکی از شبکه ناپیوستگی‌ها را در راستاهای مختلف ارائه دهد.

پس از ساختن مدلی واقعی از توده‌سنگ منطقه با استفاده از نرم‌افزار 3DEC، شرایط محیط شامل: تنش‌ها، شرایط آب زیرزمینی و ...، مدل‌سازی و بر مدل اعمال می‌شود. پس از شبیه‌سازی کامل توده‌سنگ منطقه و شرایط محیط، تأثیر پارامترهای مهمی همچون بازشدگی و زبری سطح درزه بر جریان سیال، بررسی می‌شود.

در فصل بعد پس از برداشت داده‌های شکستگی با استفاده از خط برداشت و پس از طی مراحل تولید

DFN در نرم‌افزار 3DEC، مدلی واقعی از منطقه مورد مطالعه ساخته می‌شود و مدل‌های مفهومی و

کمی از تأثیر زبری متغیر و بازشدگی متغیر بر دبی جریان سیال، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵- فصل پنجم

مدل سازی عددی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان

آب در سیستم شکستگی های توده سنگ - مطالعه

موردی توده سنگ محدوده ی سنندج

۵-۱- مقدمه

در حالت کلی ساخت شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی شکستگی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه و با استفاده از روش خط برداشت، جمع‌آوری گردیده‌اند. منطقه مورد مطالعه در مسیر جاده‌ی سنندج - همدان قرار دارد. پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی توده‌سنگ منطقه شامل: تعداد درزه، جهت‌داری، فاصله‌داری، طول خط اثر، زبری (JRC)، بازشدگی درزه، خصوصیات ماده‌سنگ و خصوصیات خط برداشت (طول و جهت‌داری) می‌باشد. در این تحقیق، داده‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه جهت تولید مدلی واقعی از توده‌سنگ استفاده شده است که در ادامه موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و چگونگی برداشت درزه‌ها تشریح شده است.

۵-۲- برداشت ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه و تحلیل آماری خصوصیات

هندسی شکستگی‌ها

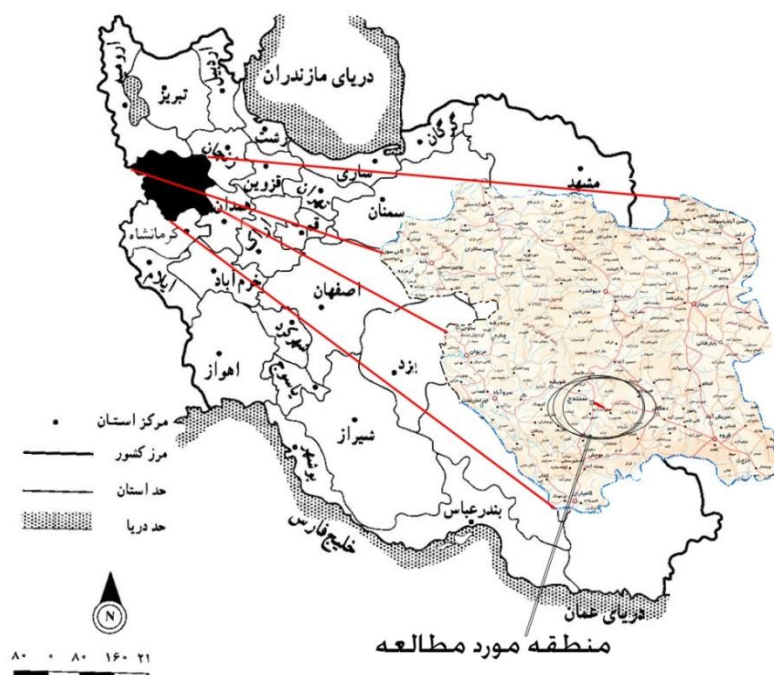
مسیر جاده‌ی سنندج - همدان ، یکی از مسیرهای پرتردد کشور می‌باشد. این مسیر به دلیل عبور از مناطق کوهستانی، به‌خصوص در منطقه‌ی صلوات‌آباد، مستعد انواع مختلف شکستگی‌ها می‌باشد و منطقه‌ای مناسب برای برداشت خصوصیات توده‌سنگ می‌باشد. در این منطقه، موقعیت ناپیوستگی‌ها، ژئومتری دامنه، سنگ‌شناسی (وجود لایه‌های متناوب نرم و مقاوم و هوازدگی آن‌ها)، وضعیت آب‌های زیرزمینی و سطحی، شرایط مناسبی را برای بررسی‌های مکانیک سنگی فراهم نموده است.

منطقه‌ی مورد مطالعه در ۲۴ کیلومتری شهر سنندج و در مسیر جاده‌ی سنندج- همدان (گردنه‌ی صلوات‌آباد) قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه در جدول ۵-۱ نشان داده شده است.

به لحاظ توپوگرافی، بیش‌ترین ارتفاع منطقه ۲۲۸۰ و کمترین آن ۲۰۹۸ متر می‌باشد. شکل ۵-۱ موقعیت جغرافیایی این منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱: مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مسیر سنندج - همدان)

طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		موقعیت جغرافیایی
تا	از	تا	از	
۳۵° ۲۰' ۰۰"	۳۵° ۱۵' ۰۰"	۰۸□ ۳۰□	۰۷□ ۳۰□	مختصات
		۴۷°	۴۷°	



شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، در شمال باختری فلات ایران، از لحاظ ساختاری در زون سنندج - سیرجان واقع شده است. کمر بند ساختاری سنندج - سیرجان در شمال شرق گسل اصلی معکوس زاگرس قرار گرفته است. این کمر بند در جنوب غربی‌ترین بخش ایران مرکزی و به موازات زاگرس از ارومیه و سنندج در شمال غرب تا سیرجان در جنوب شرق ادامه یافته است. این کمر بند در ادامه به کمر بندهای کوه‌زایی در ترکیه می‌پیوندد (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

سنگ‌شناسی منطقه شامل آهک‌های اوریتولین‌دار لایه‌ای و بعضاً توده‌ای، ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ با لایه‌های از سنگ آهک ماسه‌ای و سیلتی به سن کرتاسه و همچنین سنگ‌های آتشفشانی اواخر کرتاسه عموماً از نوع آندزیت می‌باشد که به صورت بینابین قرار گرفته‌اند. همچنین عملکرد نیروهای تکتونیکی در زمان‌های مختلف به ویژه در مزوزوئیک و ترشیاری باعث توسعه سیستم‌های ناپیوستگی شده‌اند. در جدول ۵-۲ خصوصیات ماده‌سنگ و شکستگی‌های توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه که به صورت اندازه‌گیری برجا و روابط تجربی به دست آمده‌اند، نشان داده شده است

(خانلری و همکاران، ۱۳۹۰). لازم به ذکر می باشد که سختی نرمال و برشی برای هر درزه در مدل دوبعدی از روابط مربوط به معیار بارتون - بندیس (بخش ۳-۲) به دست آمده است.

جدول ۵-۲: خصوصیات ماده سنگ و شکستگی های منطقه مورد مطالعه

مقدار	پارامتر (واحد اندازه گیری)	مقدار	پارامتر (واحد اندازه گیری)
۶	زاویه اتساع (درجه)	۴۳/۹	مدول الاستیسیته (GPa)
۱۰۶	مقاومت دیواره درزه، JCS (MPa)	۰/۲۲	ضریب پواسون
۲۶	زاویه اصطکاک باقی مانده (درجه)	۲۲۶	مقاومت تک محوره توده سنگ* (MPa)

* از طریق چکش اشمیت به دست آمده

۵-۲-۱- برداشت ناپیوستگی ها با روش خط برداشت

همان گونه که قبلاً اشاره شد، در روش خط برداشت به منظور برداشت ناپیوستگی ها از یک خط مشخص که دارای زاویه میل و امتداد معلوم است استفاده می شود و تمام پارامترهای هر ناپیوستگی که خط برداشت را قطع کند در برگه برداشت ثبت می شوند که در شکل ۵-۲ نمونه برگه برداشت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

DISCONTINUITIES		DISCONTINUITIES SURVEY DATA SHEET										
GENERAL INFORMATION		GENERAL INFORMATION										
Location Sanderaj	Station No. Sideraj road	Date	Day	Month	Year	Inspector	Discontinuity data sheet No.					
			17		1395	H. V. S.	3	7				
No.	Type	Dip	Dip direction	Persistence (Cm)	Termination	Aperture/width (mm)	Nature of filling	Spacing (Cm)	JRC	Remarks		
76	Joint	36	115	231								
77	Joint	52	215	581								
78	Joint	38	193	421								
79	Joint	73	58	129								
80	Joint	65	292	885								
81	Joint	70	53	115								
82	Joint	38	73	229								
83	Joint	72	63	82								
84	Joint	39	115	293								
85	Joint	73	281	179								
51	Joint	43	152	138	2	2	Washed	23	2-4			
52	Joint	67	215	235	1	0.5	Concrete	35	14-16			
53	Joint	75	115	139	2	0.5	Concrete	43	14-16			
54	Joint	63	65	385	1	1	clean	32	2-4			
55	Joint	52	102	432	1	1	clean	32	4-6			
56	Joint	33	82	125	1	3	clean	29	16-18			
57	Joint	79	128	218	1	4	Washed	163	14-16			
58	Joint	86	228	192	1	7	Washed	23	4-6			
59	Joint	53	119	1350	2	15	clean	56	10-12			
60	Joint	32	218	700	1	1	Concrete	63	10-12			

شکل ۵-۲: نمونه برگه ثبت ناپیوستگی ها با روش خط برداشت در منطقه مورد مطالعه

برداشت درزه صرفاً جهت بررسی الگوی درزه‌داری و شبیه‌سازی بلوک و ساختن DFN انجام گرفته است. طول خط برداشت درزه‌ها در منطقه ۹۳ متر انتخاب شده است و تعداد شکستگی‌های برداشت‌شده تقریباً ۱۷۰ درزه می‌باشد که در شکل ۳-۵-۳ نمایی از خط برداشت درزه نشان داده شده است.



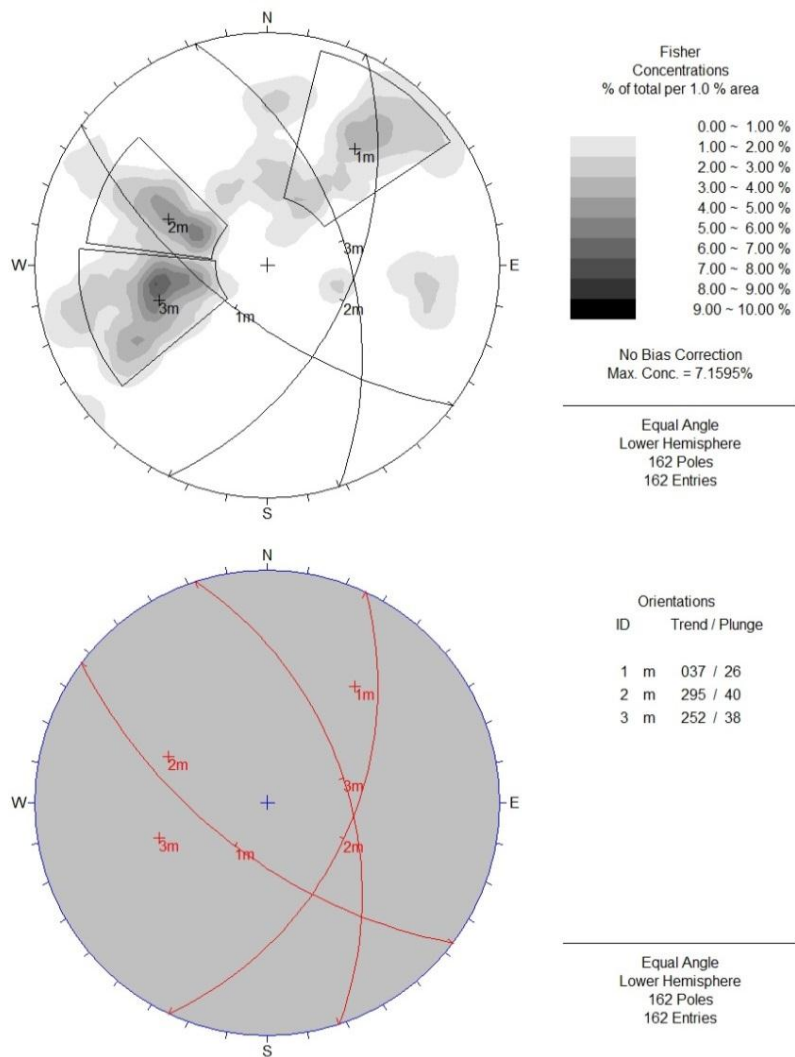
شکل ۳-۵: نمای از منطقه مورد مطالعه و روش برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از خط برداشت

برای تولید DFN در نرم‌افزار 3DEC باید خصوصیات درزه‌های برداشت‌شده در قالب دسته درزه‌های اصلی تفکیک و خصوصیات مورد نیاز برای هر دسته درزه محاسبه شوند. خصوصیات مورد نیاز برای هر دسته درزه شامل: تعداد دسته درزه‌های اصلی، تابع توزیع طول خط اثر، جهت‌داری متوسط، ضریب فیشر، دانسیته طول و بازشدگی دهانه می‌باشد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۵-۲-۲- جهت‌داری شکستگی‌ها

پس از برداشت خصوصیات درزه‌ها با روش خط برداشت، با استفاده از نرم‌افزار Dips تعداد دسته درزه‌های اصلی، ثابت فیشر و جهت‌داری تعیین گردیده که تصاویر استریونوت دسته درزه‌ها، در شکل

۴-۵ نشان داده شده است. با توجه به این تصاویر، منطقه مورد مطالعه شامل سه دسته درزه اصلی می‌باشد که در جدول ۳-۵ خصوصیات این دسته درزه‌ها شامل تعداد، جهت‌داری و ثابت فیشر برای هر دسته درزه به‌دست آمده است.



شکل ۴-۵: استریونوت دسته درزه‌های اصلی و جهت‌داری هر دسته درزه برای منطقه مورد مطالعه

جدول ۳-۵: خصوصیات دسته درزه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه

دسته درزه	شیب	جهت شیب	ثابت فیشر
۱	۶۴	۲۱۷	۲۰/۱
۲	۵۰	۱۱۵	۳۴/۳۵
۳	۵۲	۷۲	۲۶/۶۶

۵-۲-۳- اندازه شکستگی‌ها

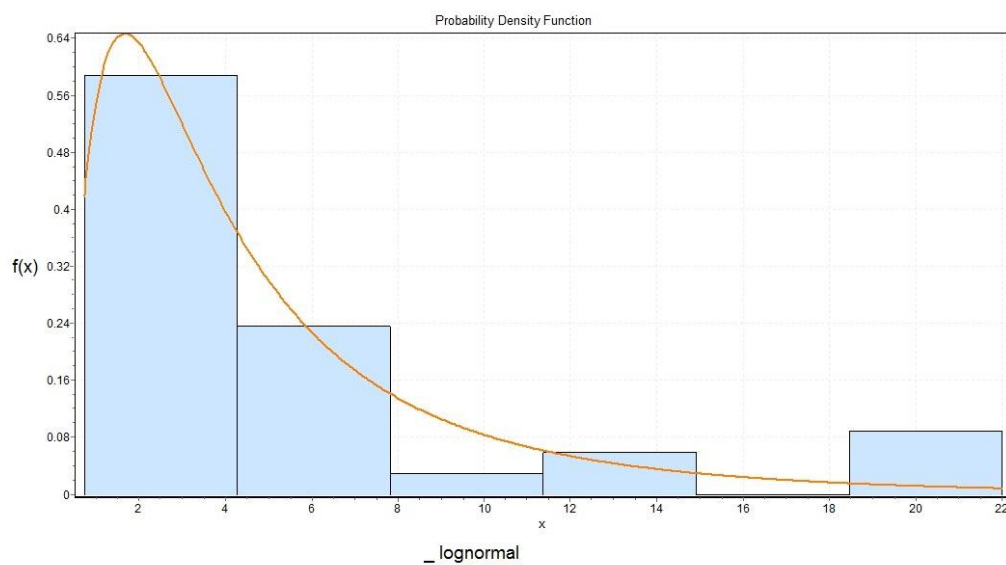
برای برآزش تابع توزیع‌های حاکم بر طول خط اثر برای هر دسته درزه از نرم‌افزار Easy Fit استفاده شده است. بر این اساس، توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر در جدول ۴-۵ اولویت‌بندی شده است و همچنین در جدول ۵-۵ مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر طول خط همراه با انحراف معیار و میانگین تابع توزیع نشان داده شده است. در شکل‌های ۵-۴، ۵-۵ و ۵-۶، تابع توزیع حاکم بر طول خط اثر برای هر دسته درزه نمایش داده شده است.

جدول ۴-۵: اولویت‌بندی تابع توزیع‌های حاکم بر طول خط اثر هر دسته درزه

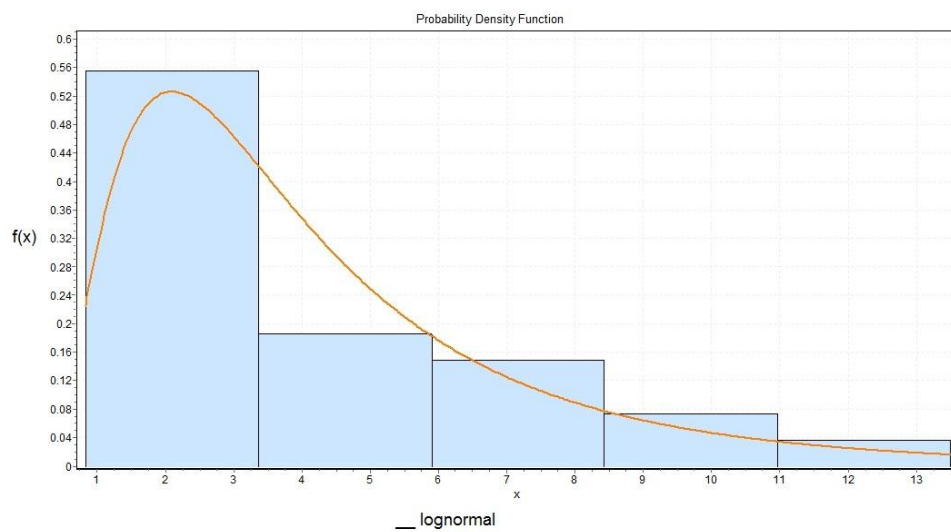
اولویت	۱	۲	۳	۴
دسته درزه	J ₁	نمایی	گاما	نرمال
	J ₂	نمایی	یکنواخت	نرمال
	J ₃	لاگ نرمال	نمایی	گاما

جدول ۵-۵: پارامترهای مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر اندازه شکستگی برای هر دسته درزه همراه با میانگین و انحراف معیار

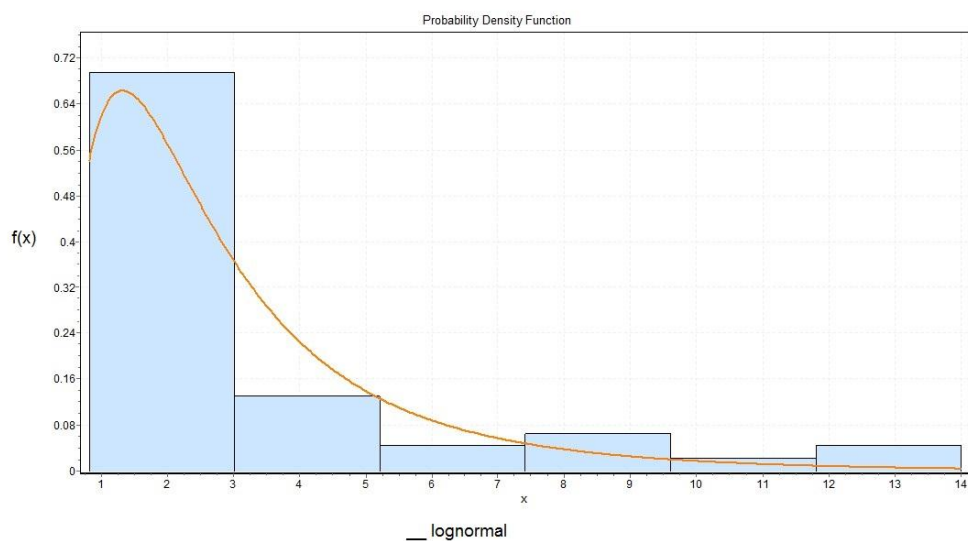
دسته درزه	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
J ₁	لاگ نرمال	۵/۸۹	۶/۸۲
J ₂	لاگ نرمال	۴/۷۵	۴/۱۹
J ₃	لاگ نرمال	۳/۰۹	۲/۶۹



شکل ۵-۵: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J₁



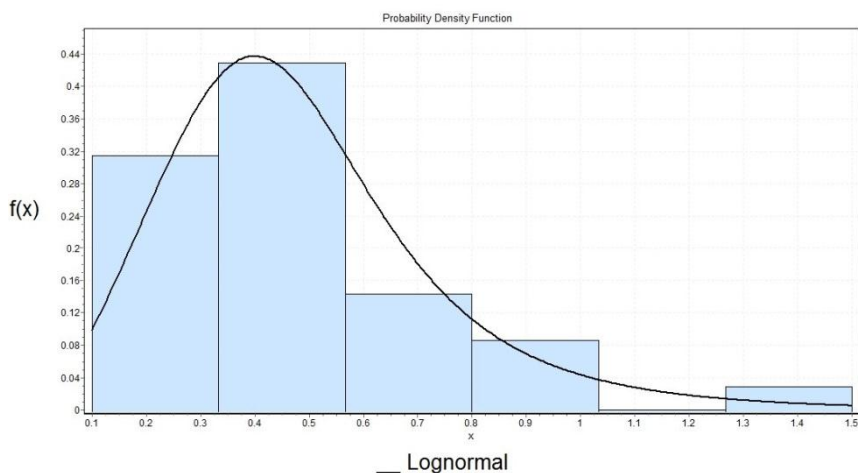
شکل ۵-۶: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J₂



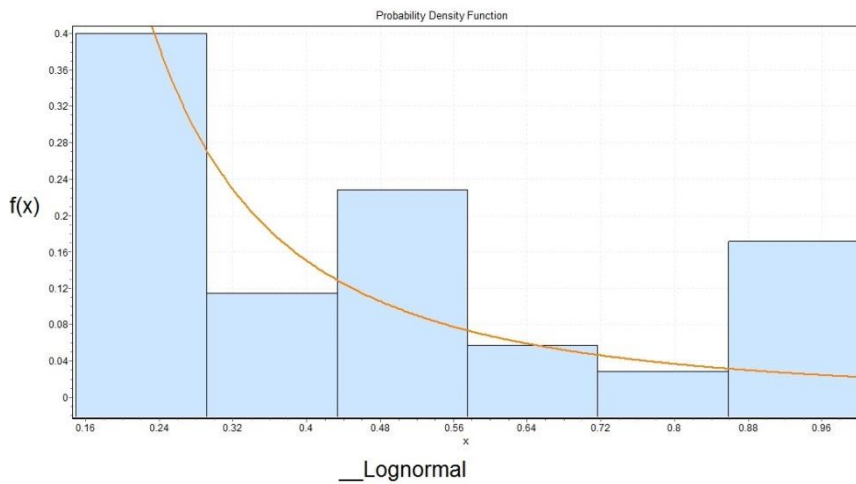
شکل ۵-۷: توزیع لاگ نرمال طول خط اثر دسته درزه J_3

۵-۲-۴- بازشدگی شکستگی‌ها

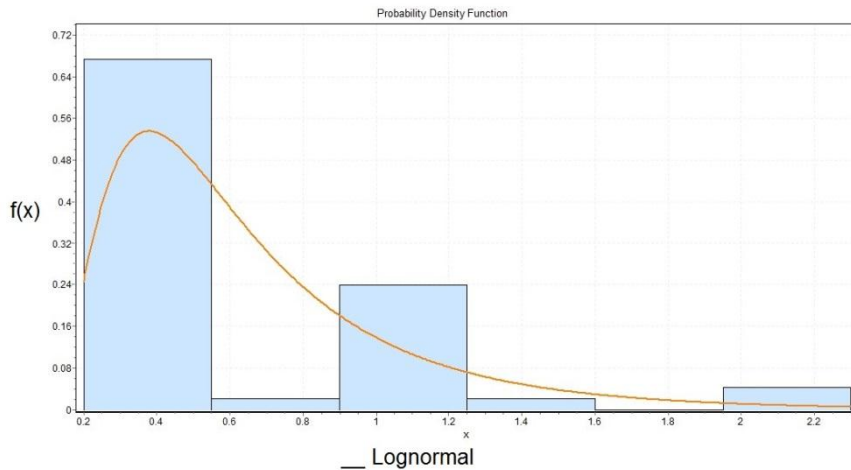
بازشدگی دهانه درزه همراه با زبری سطح درزه مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر جریان سیال عبوری از درزه می‌باشند. لذا برای ساخت DFN، لازم است تابع توزیع حاکم بر بازشدگی هر دسته درزه را محاسبه کرد. این تابع توزیع برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار EasyFit برازش شده و در شکل‌های ۵-۸، ۵-۹ و ۵-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۸: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_1



شکل ۵-۹: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_2



شکل ۵-۱۰: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه J_3

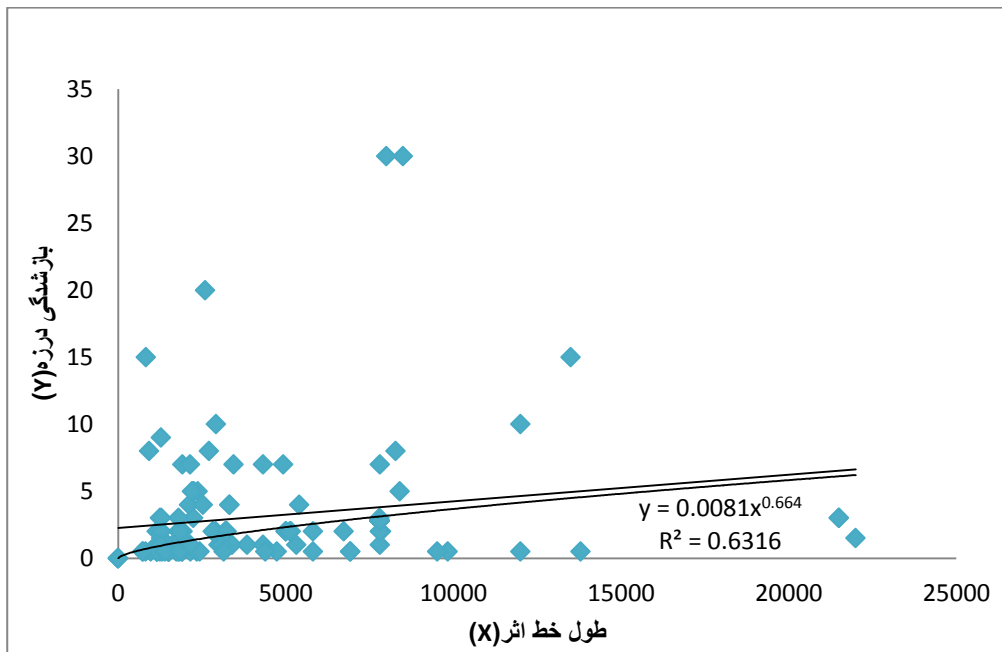
در ادامه، رابطه‌ی بین دهانه درزه و طول خط اثر درزه‌های برداشت‌شده، مورد بررسی قرار گرفته و همبستگی بین این دو پارامتر تعیین شده است (شکل ۵-۱۱). همچنین مناسب‌ترین نمودار حاکم بر رابطه بین این پارامترها، با استفاده از تابع توانی برازش شد که معادله‌ی آن در زیر آمده است (معادله ۵-۱):

$$y = 0.0081 X^{0.664} \quad (۵-۱)$$

که y بازشدگی درزه و X طول خط اثر درزه می‌باشد.

از رابطه ۵-۱ جهت تعیین بازشدگی برای طول خط اثر درزه در DFN استفاده می‌شود، بدین معنی

که برای هر طول خط اثر از DFN، طبق رابطه ۵-۱ یک بازشدگی تعریف می‌شود.



شکل ۵-۱۱: همبستگی و برازش تابع توانی مناسب حاکم بر بازشدگی درزه و طول خط اثر

۵-۲-۵- زبری سطح شکستگی‌ها

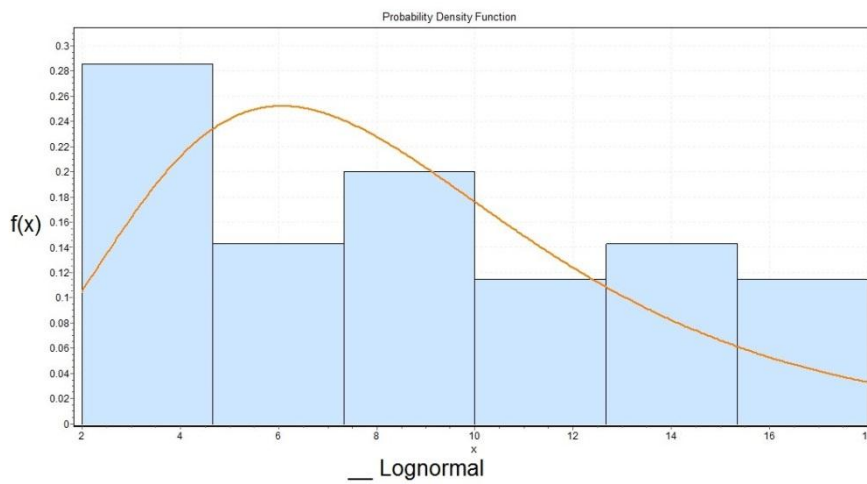
توابع توزیع حاکم بر زبری سطح درزه برای هر دسته درزه در جدول ۵-۶ الویت‌بندی شده است که با توجه به آن تابع توزیع لاگ نرمال برای بیان تأثیر زبری سطح درزه انتخاب شده و در شکل‌های ۵-۱۲، ۵-۱۳ و ۵-۱۴ به‌نمایش درآمده است. همچنین میانگین و انحراف معیار هر دسته درزه محاسبه شده و در جدول ۵-۷ آورده شده است.

جدول ۵-۶: اولویت‌بندی توابع توزیع حاکم بر زبری سطح هر دسته درزه

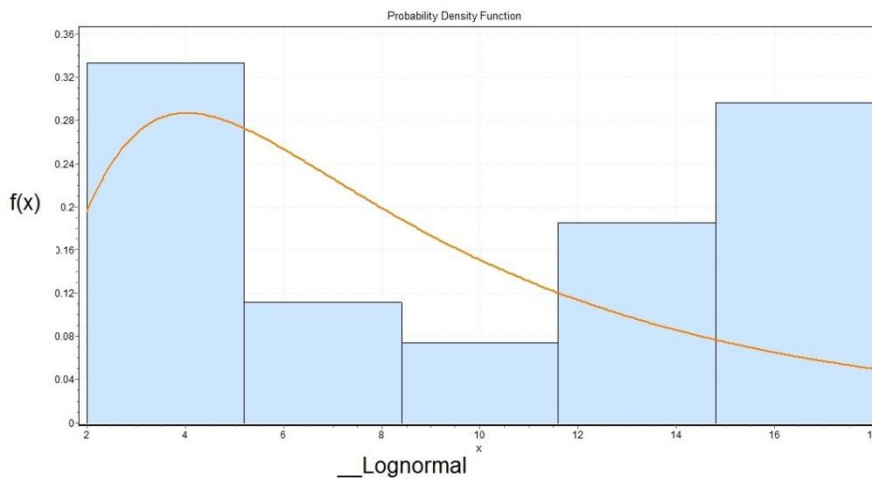
اولویت		۱	۲	۳
دسته درزه	J_1	لاگ نرمال	گاما	نرمال
	J_2	لاگ نرمال	نمایی	نرمال
	J_3	لاگ نرمال	گاما	نرمال

جدول ۵-۷: میانگین و انحراف معیار زبری دسته درزه‌ها همراه با مناسب‌ترین تابع توزیع

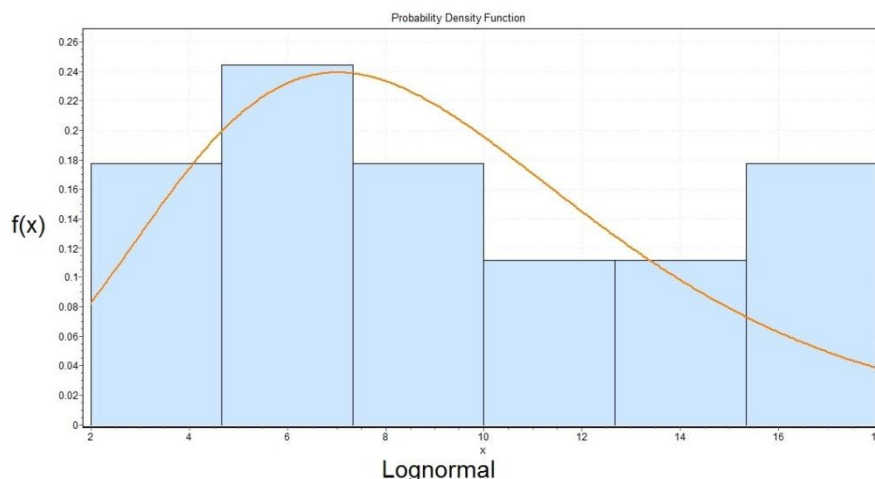
دسته درزه	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
J ₁	لاگ نرمال	۸/۶	۵/۱
J ₂	لاگ نرمال	۹/۹	۵/۸
J ₃	لاگ نرمال	۹/۰.۸	۵



شکل ۵-۱۲: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J₁



شکل ۵-۱۳: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J₂



شکل ۵-۱۴: تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر زبری سطح درزه در دسته درزه J_3

۵-۲-۶- دانسیته شکستگی‌ها

دانسیته نیز یکی از مهم‌ترین و معمول‌ترین ویژگی‌های هندسی درزه‌هاست که اندازه‌گیری می‌شود. محاسبه دانسیته برای ساختن DFN جهت مدل‌سازی درزه‌ها به صورت دوبعدی و سه‌بعدی لازم می‌باشد. لذا با روش خط برداشت دانسیته طولی درزه‌ها محاسبه شده و برای محاسبه دانسیته سطحی و حجمی از روابط ۵-۲، که توسط جینگ و همکاران (Jing, et al, 2007) معرفی گردیده، استفاده شده که نتایج آن در جدول ۵-۸ نشان داده شده است.

$$D_1 = \frac{D_3}{2}, \quad D_2 = \frac{\pi}{4} D_3 \quad (۲-۵)$$

جدول ۵-۸: دانسیته طولی، سطحی و حجمی برای منطقه مورد مطالعه

حجمی ($1/m^3$)	سطحی ($1/m^2$)	طولی ($1/m$)	دانسیته	دسته درزه
۰/۷۵۲	۰/۵۹	۰/۴۷	J_1	
۰/۵۸	۰/۴۵۵	۰/۳۶	J_2	
۰/۹۸	۰/۷۷	۰/۶۲	J_3	

۵-۳- توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه

مدل‌های DFN، طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از ارائه روشن سیستم درزه به صورت عناصری گسسته در فضا با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور مناسب تعریف شده‌اند، نمایش می‌دهد. با تعریف ویژگی‌های درزه (اندازه، جهت، فاصله‌داری و ...) بطور تصادفی و کاربرد روش مونت‌کارلو برای تولید نمونه‌های بیشتر از شبکه درزه، روش DFN می‌تواند نمونه‌هایی معتبر از لحاظ آماری از توده‌سنگ واقعی ارائه دهد.

در این تحقیق، پس از انجام محاسبات و استفاده از روابط ۴-۶ و رابطه تجربی پوری، اندازه بلوک در بازه‌ی [۲،۴] متر به دست آمده که به دلیل اینکه با افزایش ابعاد مدت زمان اجرای برنامه خیلی طولانی می‌شد، اندازه اضلاع بلوک ۲ متر انتخاب گردید.

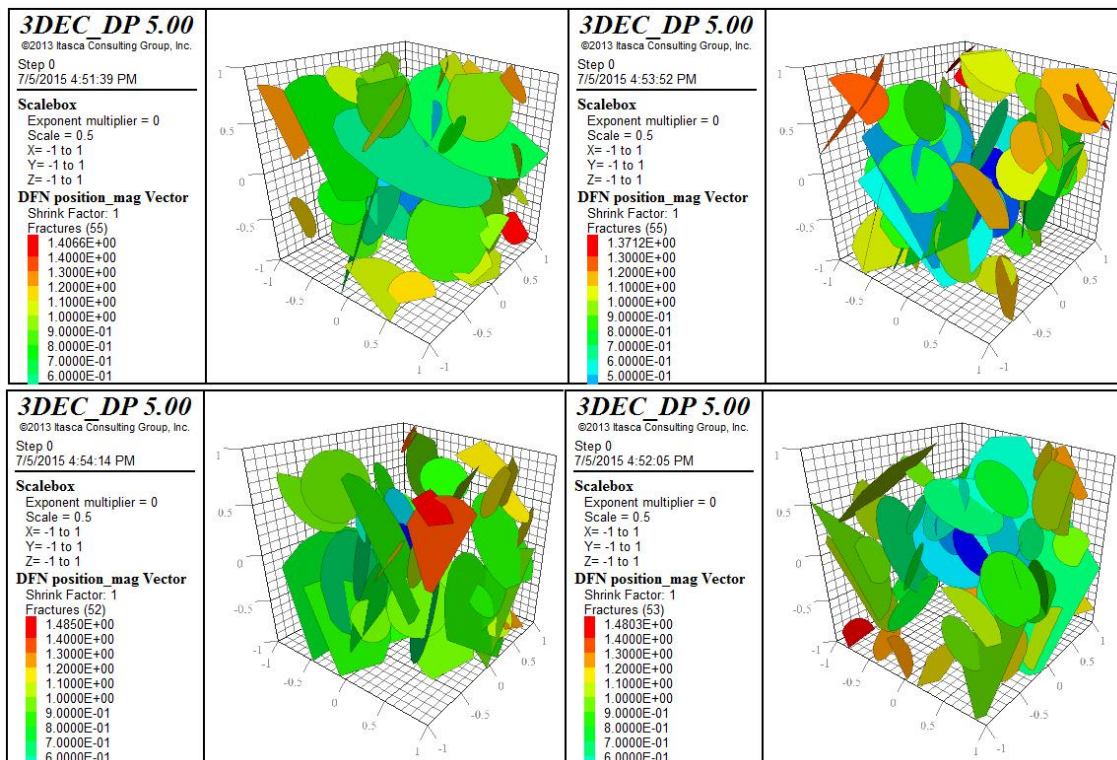
۵-۳-۱- تولید شبکه‌های شکستگی مجزای دو بعدی و سه بعدی

برای توصیف هندسی سیستم شکستگی‌های توده‌سنگ از شبیه‌سازی مونت کارلو بر پایه شبکه شکستی مجزا استفاده می‌شود. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک فرآیند تصادفی است که تصادفی بودن هندسه شکستگی‌ها را با نمایش خواص شکستگی نظیر موقعیت، اندازه، جهت‌داری و بازشدگی به صورت متغیرهای تصادفی که از توابع چگالی احتمال مخصوص تبعیت می‌کنند، بیان می‌کند. ورودی‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تولید شبکه شکستگی منطقه مورد مطالعه در جدول ۵-۹ نشان داده شده است.

جدول ۵-۹: ورودی‌های شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید شبکه شکستگی منطقه مورد مطالعه

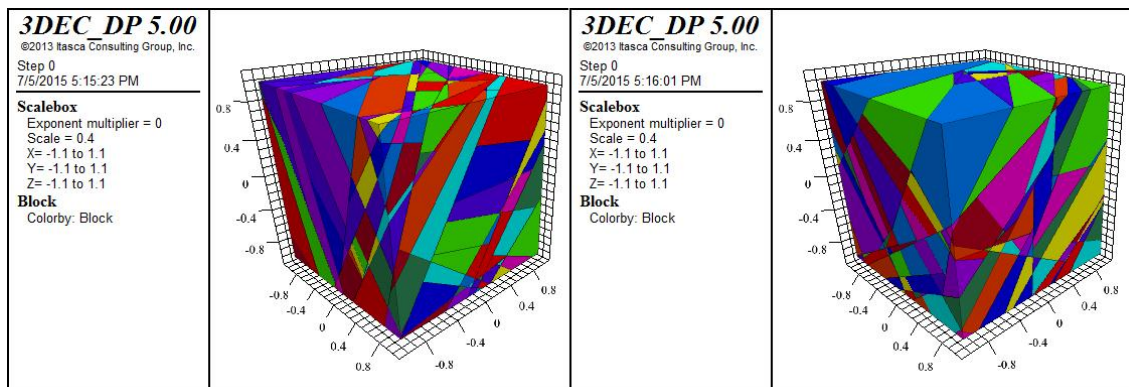
دسته درزه	جهت‌داری	ثابت فیشر	دانسیته ($1/m^3$)	تابع توزیع اندازه	تابع توزیع بازشدگی
J ₁	۲۱۷/۶۴	۲۰/۱	۰/۷۵۲	لاگ نرمال	لاگ نرمال
J ₂	۱۱۵/۵۰	۳۴/۳۵	۰/۵۸	لاگ نرمال	لاگ نرمال
J ₃	۰۷۲/۵۲	۲۶/۶۶	۰/۹۸	لاگ نرمال	لاگ نرمال

تولید مدل‌های سه‌بعدی DFN در نرم‌افزار 3DEC برگرفته از شبیه‌سازی مونت کارلو (شکل ۴-۵) می‌باشد. مدل‌های سه‌بعدی DFN توصیف آماری از موقعیت، تعداد درزه‌ها و ... را در توده‌سنگ شبیه‌سازی می‌کنند. یک مدل DFN می‌تواند چند مدل تصادفی داشته باشد و در نرم‌افزار 3DEC می‌توان این مدل تصادفی را تولید کرد که در نتیجه منجر به کدنویسی براساس توابع آماری می‌شود. ورودی‌های نرم‌افزار برای تولید مدل‌های سه‌بعدی DFN، برگرفته از داده‌های جدول ۵-۹ می‌باشد که براساس پارامترهای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمده است. پس از کدنویسی، چهار مدل سه‌بعدی DFN ساخته شد که در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده‌اند، همچنین دو مدل سه‌بعدی از شبیه‌سازی توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۵: شبیه‌سازی چهار مدل سه‌بعدی DFN منطقه مورد مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در

نرم‌افزار 3DEC

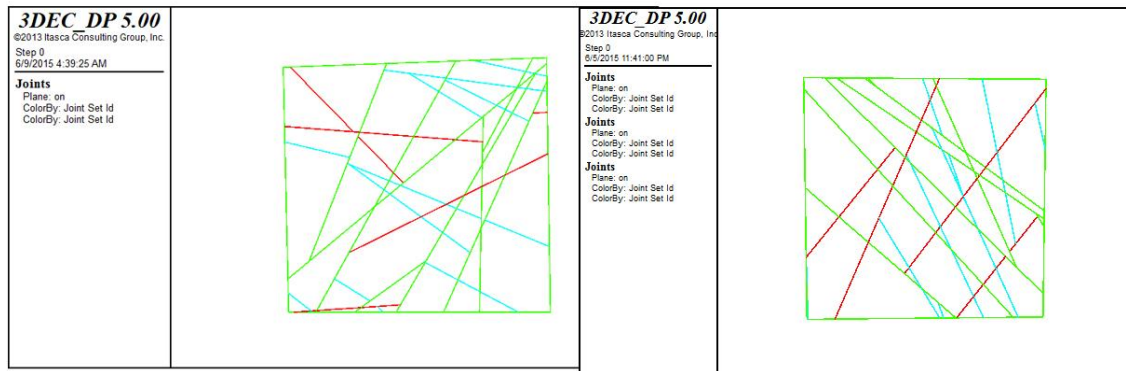


شکل ۵-۱۶: دو مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده از بلوک منطقه مورد مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

در نرم‌افزار 3DEC

برای مدل‌سازی جریان سیال در حالت دوبعدی لازم است مدل‌های دوبعدی DFN ساخته شود که برای تولید مدل‌های دوبعدی DFN، مدل‌های سه‌بعدی در راستای خط برداشت برش زده شده‌اند.

آزیموت خط برداشت منطقه مورد مطالعه ۱۰۹ درجه می‌باشد پس مقاطعی از مدل سه‌بعدی، در این راستا برش داده شده و دو مقطع از آنها در شکل ۵-۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۷: مدل‌های دوبعدی DFN برای منطقه مورد مطالعه در راستای خط برداشت

۵-۴- مدل‌سازی عددی جریان سیال در شبکه شکستگی‌های توده‌سنگ مورد مطالعه در حالت دو بعدی

۵-۴-۱- مقدمه

پس از برداشت ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه، جهت تعیین دسته‌درزه‌ها، جهت‌داری و ثابت فیشر از نرم‌افزار Dips استفاده شد و با استفاده از نرم‌افزارهای آماری تابع توزیع حاکم بر بازشدگی، زبری و طول خط اثر به این پارامترها برآزش شد. پارامترهای محاسبه شده، ورودی‌های الگوریتم شبیه‌ساز مونت‌کارلو می‌باشند که در نرم‌افزار 3DEC توسعه داده شده است. با انجام کدنویسی این نرم‌افزار قابلیت تولید مدل‌های DFN دوبعدی و سه‌بعدی را دارا می‌باشد که برای منطقه مورد مطالعه شکل‌های آن در بخش‌های قبلی به نمایش درآمد.

پس از تولید مدل دوبعدی DFN، برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن، این مدل‌ها باید تحت تأثیر شرایط تنش‌های محیط (مورد مطالعه) قرار گیرد و سپس در مدل

دوبعدی جریان برقرار گردد.

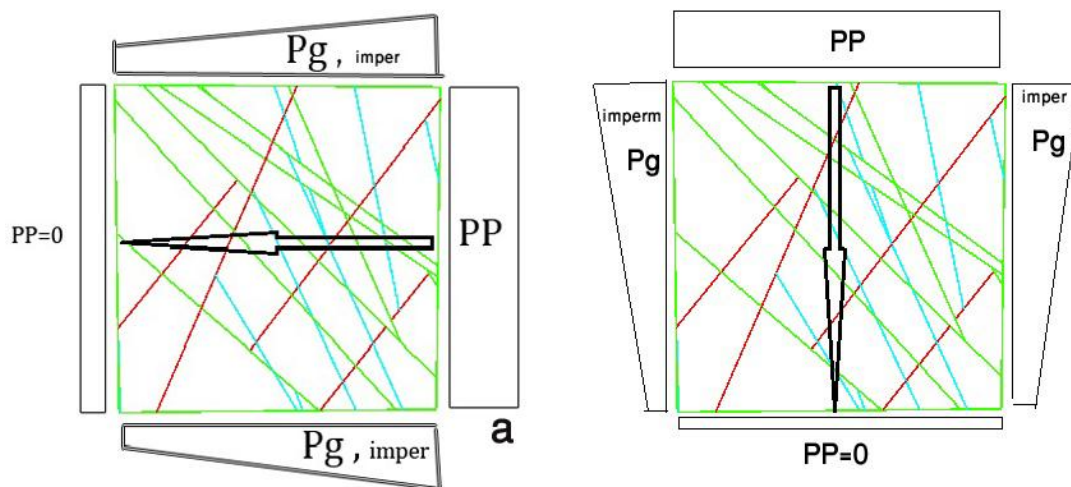
۵-۴-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرایط مرزی طبق روابط ۴-۱۳ تا ۴-۱۵ برای مدل در عمق فرضی ۱۰ متر محاسبه شده که در جدول ۵-۱۰ نشان داده شده است. همچنین فشار آب وارده بر مرزها، طبق همین رابطه ۰/۱ مگاپاسکال به دست آمده است.

جدول ۵-۱۰: اندازه تنش های اعمالی بر مرزهای مدل دوبعدی DFN

شرایط مرزی	$\sigma_z (\sigma_h)$ (MPa)	$\sigma_y (\sigma_v)$ (MPa)	$\sigma_z (\sigma_v)$ (MPa)	گرادین عمق (MPa/h)
تنش	۰/۱	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶	۰/۱

آب در توده سنگ درزه دار از نواحی پرفشار به نواحی کم فشار جریان پیدا می کند بدین منظور برای بررسی تأثیر زبری بر دبی جریان در جهات مختلف، مطابق شکل ۵-۱۸ مدل دوبعدی DFN را در دو جهت متفاوت (راست به چپ و از بالا به پایین) تحت فشار سیال قرار داده تا دبی جریان در جهات مختلف محاسبه شده و مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۵-۱۸: شرایط مرز بندی مدل دوبعدی DFN که در دو جهت مورد بررسی قرار گرفته است.

مسیر و حجم جریان در مدل دوبعدی برای سطوح صاف و زبر یکسان نیست لذا سه مدل دوبعدی برای بررسی تأثیر زبری بر دبی جریان عبوری ساخته شده که شامل: (۱) رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های صاف، (۲) رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های زبر با زبری متوسط یکسان و (۳) رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های زبر با زبری متغیر، می‌باشند، که در ادامه تشریح شده‌اند.

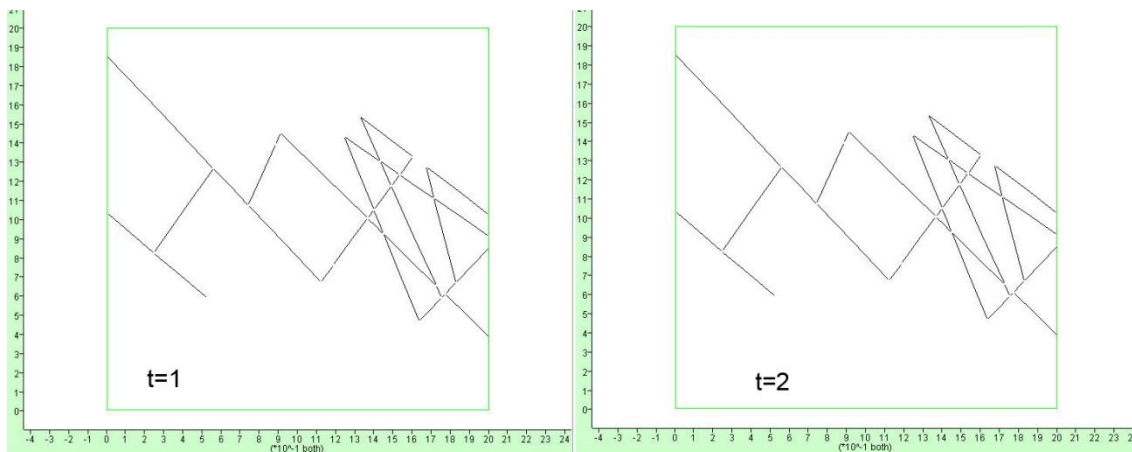
۵-۴-۳- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های صاف

طبق معیار بارتون - بندیس، برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه در میزان دبی آب عبوری از درزه‌ها، با استفاده از مفهوم JRC میزان پارامتر بازشدگی مؤثر درزه را در قانون کوپیک تغییر و زبری سطح درزه به صورت کاهش بازشدگی در قانون کوپیک تأثیر داده می‌شود. پس زمانی که درزه صاف در نظر گرفته شود، بازشدگی مؤثر نسبت به حالت زبر مقدار بیشتری را خواهد داشت که در ادامه اندازه تأثیر آن بررسی خواهد شد.

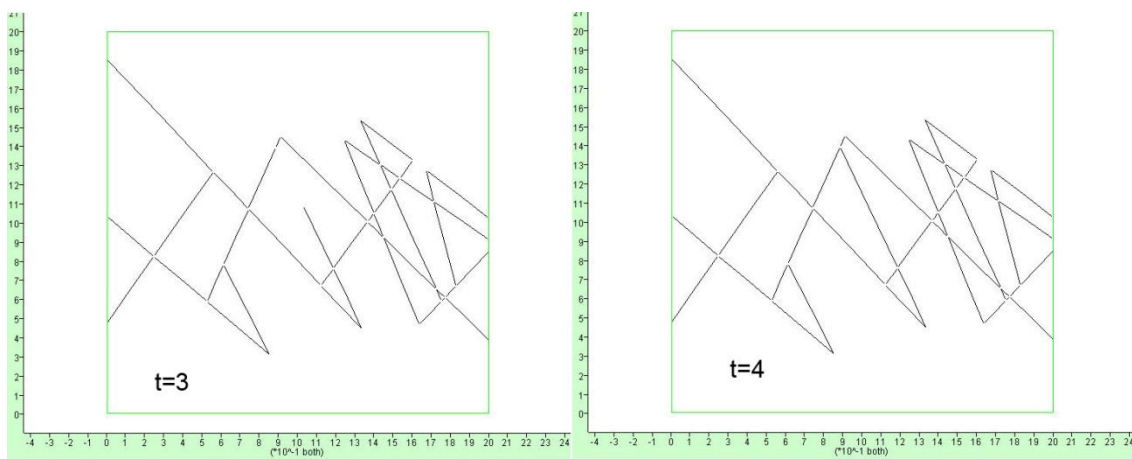
سیال از مسیرهای که مقاومت کمتری در برابر انتقال ایجاد می‌کنند، عبور می‌کند. بدیهی است که اگر بازشدگی درزه بیشتر باشد، حجم بیشتری از آب را منتقل می‌کند، لذا سیال از بازشدگی‌های بزرگ‌تر به علت مقاومت کمتر و سهولت بیشتر، عبور می‌کند. لذا زمانی که درزه‌ها صاف در نظر گرفته می‌شوند، بازشدگی مؤثر مقدار بیشتری نسبت به درزه‌های زبر دارد و به همین دلیل سیال به سهولت و در مدت زمان کمتری منتقل می‌گردد.

در این بخش سطوح درزه‌های مدل دوبعدی DFN صاف فرض شده اند و مسیرهای پیشینه جریان در سطح مدل دوبعدی در ۶ گام زمانی در شکل‌های ۵-۱۹، ۵-۲۰ و ۵-۲۱ نشان داده شده است. در شکل ۵-۱۹ (در زمان $t=1$) پیشینه شدت جریان با خطوط مشکی در طول درزه‌های مدل نشان داده شده است که در مدت زمان کوتاهی جریان از مرز سمت چپ خارج شده است. با افزایش زمان اعمال فشار منفذی بر سمت راست ($t=2$)، روند افزایش شدت جریان در طول درزه‌ها، افزایش اندکی داشته و

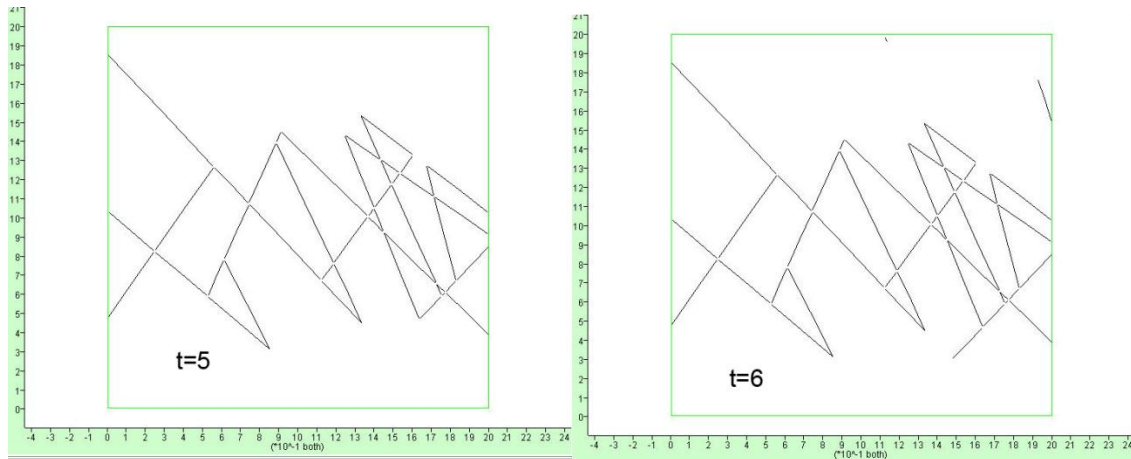
از زمان $t=3$ به بعد مسیرهای اصلی جریان (خطوط مشکی رنگ) دیگر تغییر نمی‌کند (ثابت می‌ماند) و خطوط بیشینه جریان از $t=3$ تا $t=6$ یکسان می‌باشد به عبارت دیگر دبی جریان از زمان $t=3$ به بعد به مقدار ثابتی میل می‌کند.



شکل ۵-۱۹: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=1$ و $t=2$

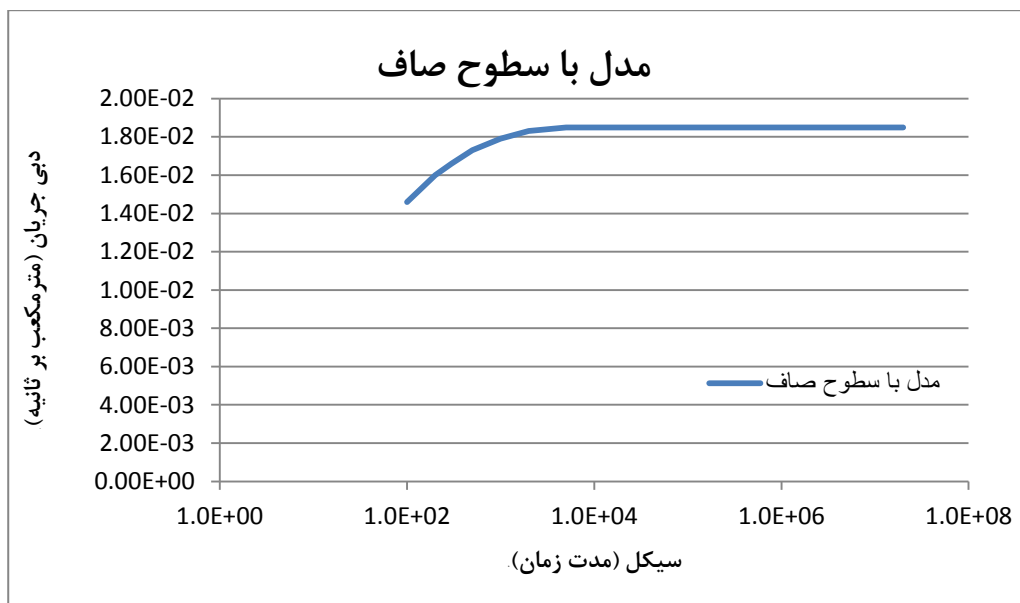


شکل ۵-۲۰: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=3$ و $t=4$



شکل ۵-۲۱: بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل در زمان $t=5$ و $t=6$

پس از بررسی نتایج کیفی دبی جریان برای درزه‌های صاف، دبی جریان برای زمان‌های مختلف (سیکل) در نمودار شکل ۵-۲۲ ترسیم شده است. همانند نتایج کیفی (شکل‌های ۵-۱۹، ۵-۲۰ و ۵-۲۱)، از این نمودار می‌توان دریافت که مدت زمان کمی طول کشیده است تا دبی جریان در مدل به مقدار ثابت $1/85 \times 10^{-2}$ میل کند.



شکل ۵-۲۲: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح صاف

همچنین برای انتقال جریان از بالا به پایین (شکل ۵-۱۸) دبی جریان و نمودارهای مسیرهای پیشنهادی جریان مشابه انتقال جریان از سمت راست به چپ می‌باشد که در پیوست آ بخش الف نشان داده است.

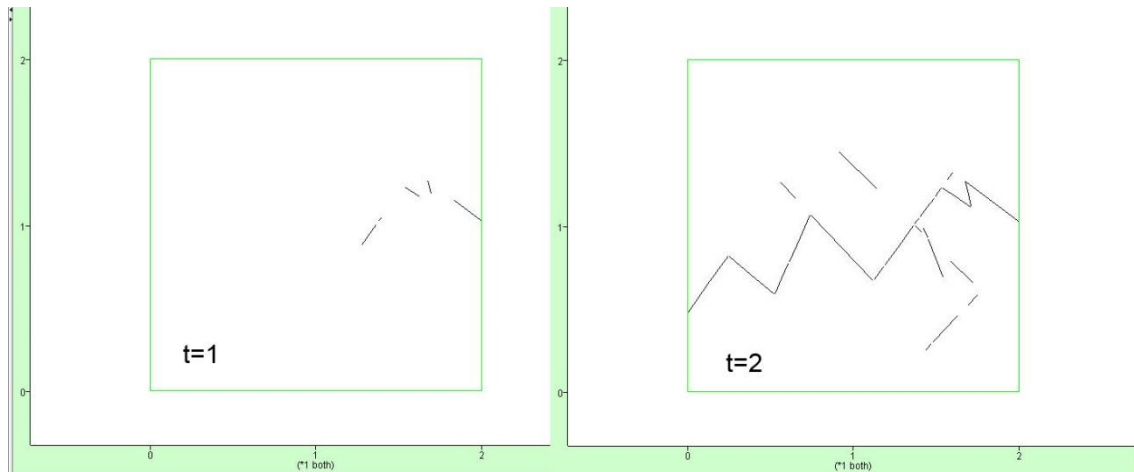
۵-۴-۴- رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه‌های زبر با

زبری متوسط یکسان

همچنان که در بخش قبلی ذکر گردید در معیار بارتون - بندیس اثر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن به صورت کاهش بازشدگی مؤثر در قانون کوبیک اعمال می‌شود.

زبری مدل دوبعدی، از میانگین JRC دسته درزه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه (جدول ۵-۶) به دست آمده است. شکل‌های ۵-۲۳، ۵-۲۴ و ۵-۲۵ مسیر پیشنهادی شدت جریان را برای مدل با سطوح زبری میانگین درزه نشان داده است.

زمانی که مدل (شکل ۵-۱۸) از سمت راست تحت فشار سیال قرار می‌گیرد، در زمان $t=1$ زبری سطح درزه باعث کاهش دبی جریان می‌شود و در این زمان سیال در طول درزه کمتری نسبت به حالت صاف (در زمان $t=1$) جریان پیدا می‌کند که زبری سطح درزه عامل اصلی این کاهش دبی جریان نسبت به حالت صاف می‌باشد. زبری سطح درزه باعث کاهش بازشدگی مؤثر دهانه درزه می‌شود و پس از طی زمان $t=2$ به تدریج جریان در سطح مدل پراکنده می‌شود ولی نسبت به حالت صاف (شکل ۵-۱۹ در زمان $t=2$) پیشنهاد شدت جریان در سطح مدل کمتر می‌باشد.

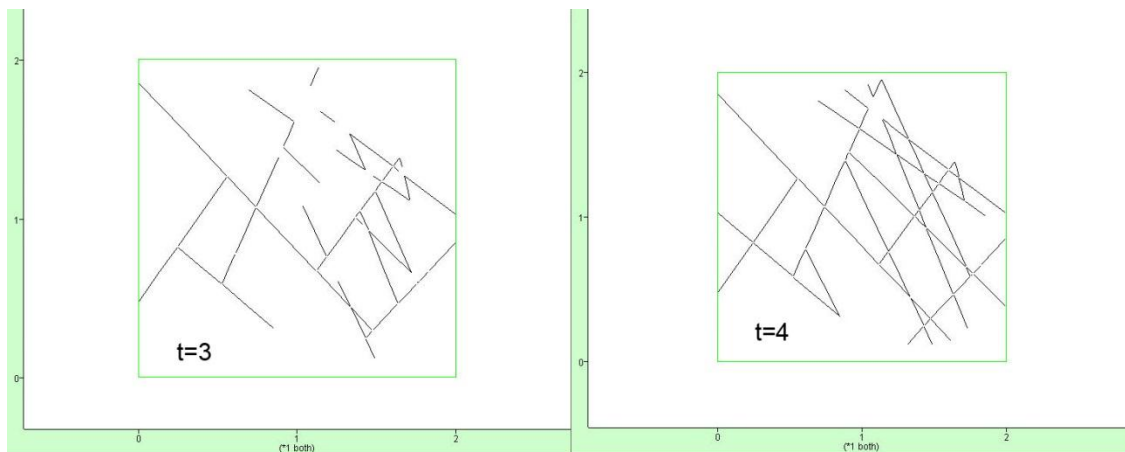


شکل ۵-۲۳: پیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=1$ و $t=2$.

در مدل صاف در زمان $t=3$ ، سیال از مرز سمت چپ خارج شده و مسیر اصلی جریان مشخص شده است اما برای مدل با زبری میانگین (برای هر دسته درزه) پس از زمان $t=5$ مسیرهای اصلی جریان ثابت شده است و مدت زمان بیشتری طول می کشد تا خطوط اصلی جریان دیگر تغییر نکنند.

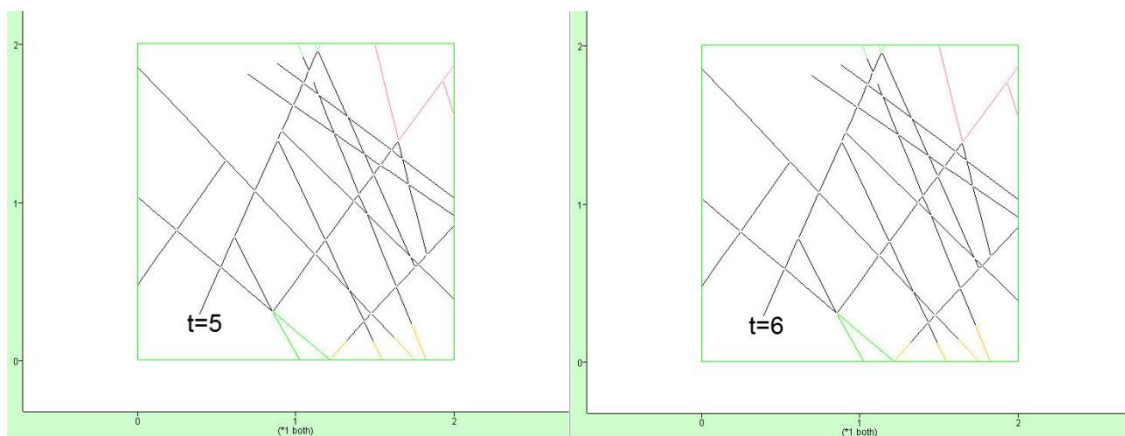
به عبارت دیگر، برای انتقال حجم ثابتی از مدل با زبری میانگین مدت زمان بیشتری نسبت به حالت سطوح صاف، لازم است تا جریان از سمت چپ خارج شود پس دبی جریان برای سطوح صاف بیشتر از سطوح زبر می باشد.

در معیار بارتون - بندیس زبری سطح درزه باعث کاهش بازشدگی مؤثر می شود و مجرای (بازشدگی) عبور سیال کاهش می یابد. بنابراین مدت زمان بیشتری نسبت به زمان لازم برای انتقال جریان از سطوح صاف لازم است تا حجم یکسانی از سیال، از مجرای با زبری متوسط منتقل شود.



شکل ۵-۲۴: پیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=3$ و $t=4$.

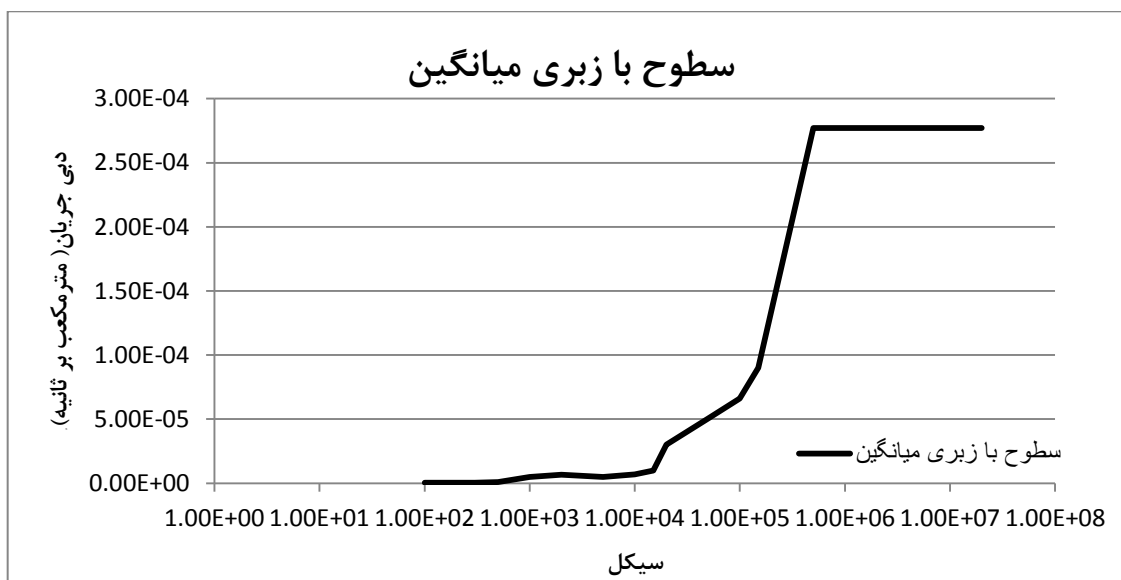
زمانی که مجرای عبور سیال به دلیل زبر بودن کوچک تر (تنگ تر) می شود، سیال طول درزه بیشتری را برای انتقال طی می کند به همین علت پراکندگی بیشتری در سطح مدل نسبت به مدل سطوح صاف مشاهده می شود که این موضوع در شکل ۵-۲۵ به صورت دوبعدی (خطوط سیاه رنگ) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۵: پیشینه جریان سیال برای سطوح زبر میانگین و مسیر عبور سیال در زمان $t=5$ و $t=6$.

نمودار شکل ۵-۲۶، دبی جریان در زمان های مختلف، را نشان می دهد. طبق خروجی های مدل با سطوح زبر میانگین، جریان پس از زمان $t=5$ به مقدار ثابتی رسیده است که از نمودار شکل ۵-۲۶ نیز این موضوع را می توان دریافت به طوری که دبی جریان برای مدل با سطوح زبر میانگین

$10^{-4} \times 2/77$ متر مکعب بر ثانیه می باشد که نسبت به مدل با سطوح صاف کاهش چشم گیری داشته است.



شکل ۵-۲۶: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح زبر میانگین

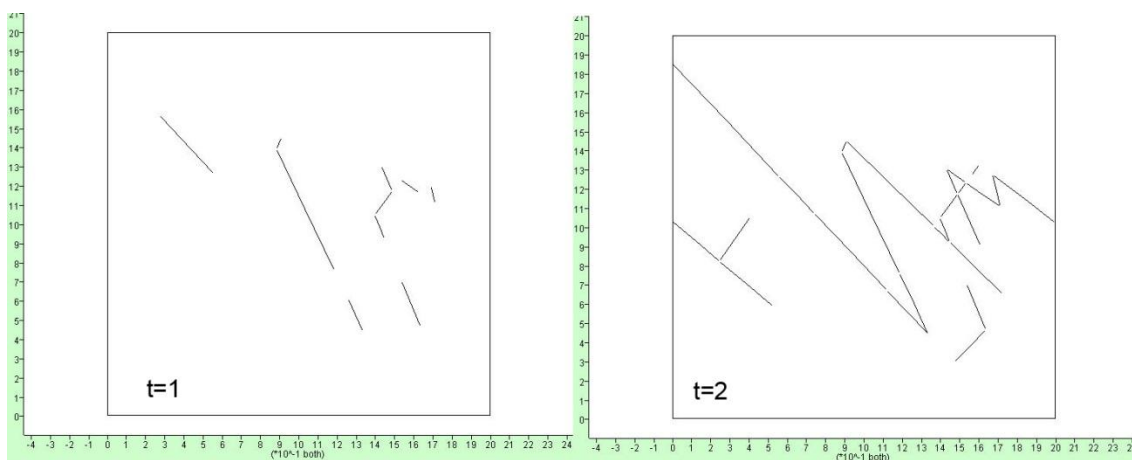
همچنین برای انتقال جریان از بالا به پایین (شکل ۵-۱۸) دبی جریان و نمودارهای مسیرهای بیشینه جریان مشابه انتقال جریان از سمت راست به چپ می باشد که در پیوست آ بخش ب نشان داده شده است.

۵-۴-۵- رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ و دبی جریان عبوری برای درزه های زبر با زبری متغیر

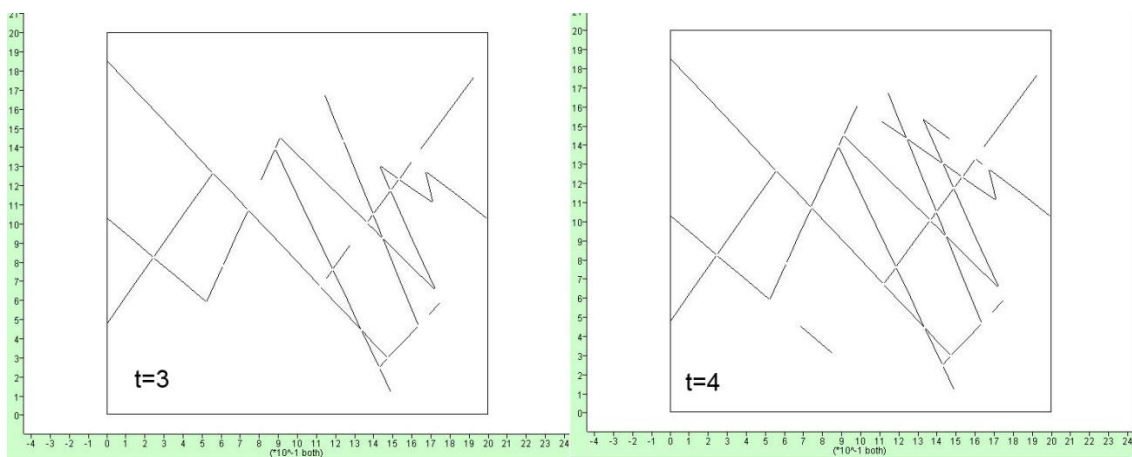
توابع توزیع حاکم بر زبری سطح درزه برای هر دسته درزه، جهت مدل سازی درزه های زبر با زبری متغیر، با توجه به جدول ۵-۶ و ۵-۷ انتخاب گردیده است.

در ادامه پس از اعمال فشار سیال طبق شکل ۵-۱۸، خروجی های نرم افزار برای زمان های $t=1$ تا $t=6$

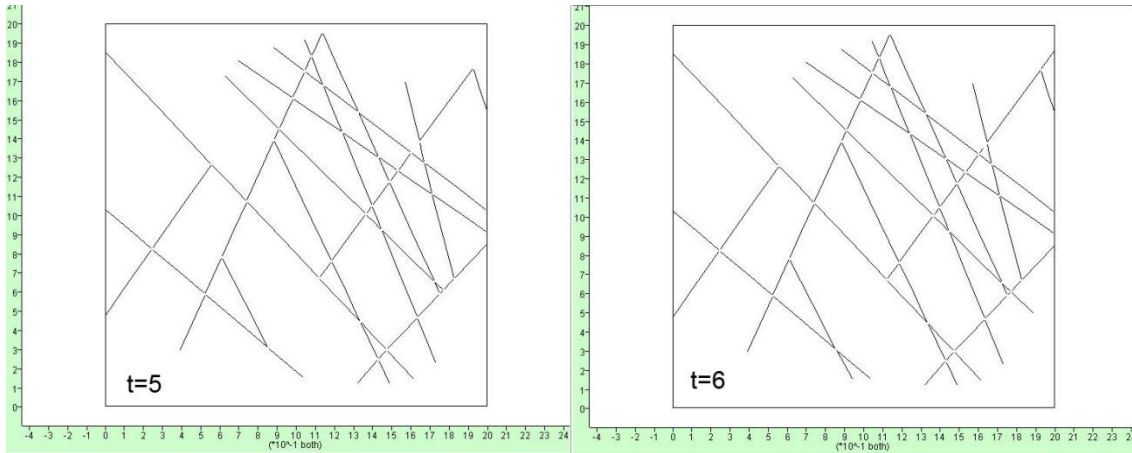
در شکل‌های ۲۷-۵، ۲۸-۵ و ۲۹-۵ نمایش داده شده است. نتایج، مشابه مدل با زبری میانگین می‌باشد، با این تفاوت که درزه‌های که JRC کمتری نسبت به میانگین زبری برای آن دسته درزه دارند، جریان بیشتری از خود عبور می‌دهند و مسیر اصلی جریان را تشکیل می‌دهند. پس می‌توان دریافت سطوح با زبری (JRC) کمتر مسیر پیشینه جریان را تشکیل می‌دهند و باعث افزایش دبی جریان نسبت به سطوح با زبری میانگین می‌شوند.



شکل ۲۷-۵: پیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=1$ و $t=2$

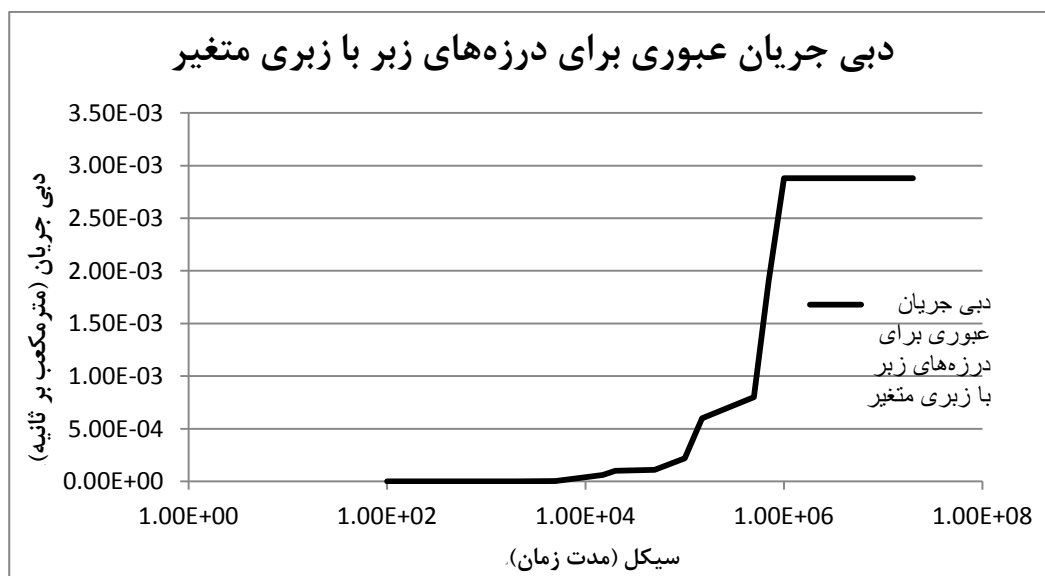


شکل ۲۸-۵: پیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=3$ و $t=4$



شکل ۵-۲۹: بیشینه جریان سیال برای مدل با تابع توزیع حاکم بر زبری در زمان $t=5$ و $t=6$

گام‌های زمانی دبی جریان برای درزه‌های زبر با زبری متغیر شبیه مدل با سطوح زبر میانگین می‌باشد و در گام زمانی $t=6$ دیگر مسیر اصلی جریان مشخص و پراکندگی و مسیره‌های بیشینه تغییر نمی‌کند. دبی جریان برای این مدل $2/88 \times 10^{-3}$ می‌باشد که به دلیل اینکه سیال از مسیره‌های با زبری کمتر (کمتر از مقدار میانگین) در مدت زمان کمتر عبور می‌کند پس دبی جریان نسبت به حالت مدل با زبری میانگین بیشتر است.



شکل ۵-۳۰: اندازه دبی جریان آب برای مدل دوبعدی با سطوح زبر متغیر

همچنین برای انتقال جریان از بالا به پایین (شکل ۵-۱۸) دبی جریان و نمودارهای مسیرهای پیشنهادی
جریان مشابه انتقال جریان از سمت راست به چپ می‌باشد که در پیوست آ بخش ج نشان داده شده
است.

۵-۵ - بحث و نتیجه‌گیری

ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار جریان سیال درون شکستگی، فرض صفحات موازی به عنوان
دیواره‌های شکستگی می‌باشد که با حل معادله ناویر- استوکس برای جریان آرام بین صفحات موازی
تحت عنوان قانون کوبیک شناخته شده است و در ادامه دبی جریان سیال را برای این مدل محاسبه
کرد.

فرض دیواره‌های موازی برای شکستگی، کاربرد قانون کوبیک را برای شکستگی‌های طبیعی محدود
می‌کند. از آنجا که در قانون کوبیک، بازشدگی به توان سه می‌رسد لذا این پارامتر حساس‌ترین و
مهم‌ترین پارامتر محسوب می‌شود. زبری سطح درزه باعث تغییرات دهانه شکستگی در بعضی نواحی از
شکستگی می‌شود و در صورتی که سطح صاف فرض شود و یا دقیق محاسبه نشود باعث ایجاد خطا در
محاسبه سرعت و دبی جریان می‌شود.

امکان استفاده از قانون کوبیک برای شکستگی‌های زبر توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار
گرفته است ولی تاکنون معیارهای انگشت شماری برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه توسعه داده
شده است که معیار بارتون - بندیس مهم‌ترین معیار در این زمینه به حساب می‌آید. نتایج برای معیار
بارتون - بندیس نشان می‌دهد که اگر مقدار دهانه بازشدگی مورد استفاده در قانون کوبیک به‌طور
مناسب و دقیقی انتخاب شده باشد، قانون کوبیک رفتار هیدرومکانیکی شکستگی را برای حالت جریان
آرام به‌طور مناسبی برآورد می‌کند. در معیار بارتون - بندیس تأثیر زبری سطح درزه به‌صورت کاهش
بازشدگی مؤثر مورد بررسی قرار می‌گیرد به همین دلیل برای بیان تأثیر زبری سطح درزه بر دبی
جریان سه مدل DFN دوبعدی در منطقه مورد مطالعه ساخته شده است. دبی جریان خروجی از

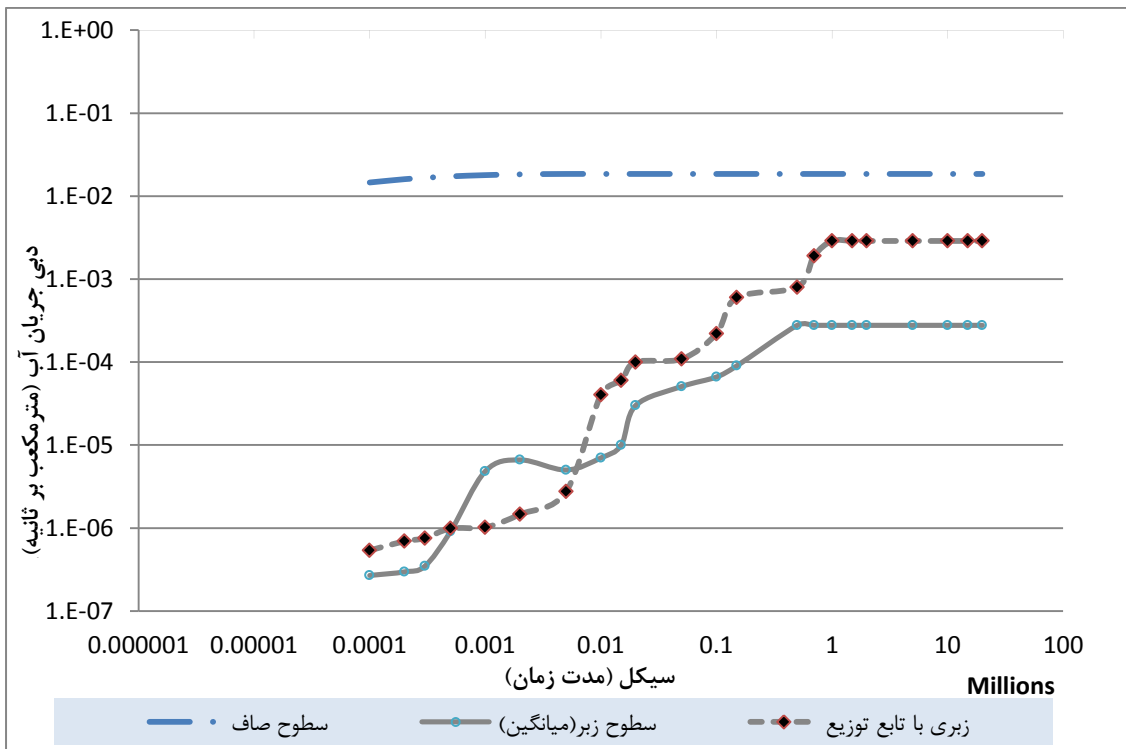
مدل‌ها در جدول ۵-۱۱ نشان داده شده است و همچنین نتایج دبی جریان در طی سیکل‌های مختلف در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۱: اندازه دبی جریان برای سه مدل دوبعدی DFN

دبی جریان	سطوح صاف	سطوح با زبر میانگین	سطوح زبر با تابع توزیع
مترمکعب بر ثانیه	$1/85 \times 10^{-2}$	$2/77 \times 10^{-4}$	$2/88 \times 10^{-3}$

نتایج کیفی مدل با سطوح زبر میانگین و متغیر نشان می‌دهد که جریان سیال در سطح درزه پراکنده می‌شود و طول درزه بیشتری را برای انتقال طی می‌کند به همین دلیل مدت زمان انتقال افزایش می‌یابد و دبی جریان نسبت به مدل با سطوح صاف کاهش می‌یابد.

دبی جریان برای مدل با سطوح صاف $1/85 \times 10^{-2}$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد و برای مدل با زبری میانگین و متغیر به ترتیب به $2/88 \times 10^{-3}$ و $2/77 \times 10^{-4}$ کاهش یافته است. بازشدگی دهانه درزه به‌عنوان مؤثرترین پارامتر تأثیرگذار بر دبی جریان می‌باشد که کاهش ناچیز آن باعث افت زیادی در دبی جریان می‌شود به همین دلیل است که اندازه دبی جریان برای مدل سطوح صاف با مدل سطوح زبر تفاوت بالایی دارد.



شکل ۵-۳۱: نمودار دبی آب بر حسب زمان (سیکل) برای سطوح زبر و سطوح صاف مدل دوبعدی

برای مدل با سطوح زبر متغیر، زمانی که زبری درزه‌ها کمتر از مقدار میانگین است جریان به راحتی عبور می‌کند و حجم سیال بیشتری را منتقل می‌کنند. لذا دبی جریان برای سطوح زبر متغیر بیشتر از سطوح زبر میانگین می‌باشد که این موضوع در نمودار شکل ۵-۳۱ نمایان است.

برای بیان اهمیت غیرقابل چشم‌پوشی زبری سطح درزه و اینکه نمی‌توان از آن صرف نظر کرد در جدول ۵-۱۲ دبی جریان در سطح سه مدل و برای درزه با موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. هر بازشدگی مکانیکی مقدار منحصر بفردی نسبت به بازشدگی درزه‌ی دیگری دارد پس براساس معیار بارتون - بندیس با احتساب زبری سطح درزه‌ها، بازشدگی هیدرولیکی برای هر درزه متفاوت از درزه دیگری است. پس طبق نتایج بالا و جدول ۵-۱۲ می‌توان دریافت که هر چه بازشدگی هیدرولیکی بزرگ‌تر باشد دبی جریان در طول درزه بیشتر می‌باشد. مثلاً برای موقعیت درزه ۷۴۲۴، بازشدگی هیدرولیکی مدل با سطوح صاف بیشتر از مدل با سطوح زبر متغیر می‌باشد و این مدل نیز بیشتر از

بازشدگی مؤثر مدل با زبری میانگین می‌باشد در نتیجه دبی جریان در این درزه برای مدل با سطوح صاف بیشتر از مدل با سطوح زبر متغیر می‌باشد و مدل با سطوح متغیر بیشتر از مدل با سطوح زبر میانگین می‌باشد.

جدول ۵-۱۲: دبی جریان محاسبه شده در سطح مدل‌های مختلف شبیه‌سازی شده.

موقعیت	ID	هیدرولیکی (متر)		بازشدگی زبری متغیر	بر نائیه (متر مکعب میانگین زبری)		دبی جریان زبری متغیر	
		سطوح صاف	میانگین زبری		سطوح صاف	میانگین زبری		
contact	7424	1	1.20E-04	3.28E-06	8.44E-05	6.89E-03	6.21E-09	1.39E-08
	7512	1	8.88E-05	7.19E-06	1.77E-05	3.99E-03	1.06E-09	6.81E-12
	15712	12	6.53E-05	9.00E-05	2.50E-05	3.06E-04	9.72E-11	1.22E-06
	15624	12	1.53E-05	1.14E-05	5.75E-07	3.06E-04	3.00E-10	1.00E-06
	18282	6	2.74E-05	1.05E-05	3.64E-07	1.42E-16	2.01E-18	4.02E-18
	18194	6	7.02E-05	4.48E-06	4.35E-08	1.96E-15	2.91E-19	6.11E-18
	2461	3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	18135	15	1.79E-05	3.38E-07	2.82E-05	1.99E-15	9.71E-23	0.00E+00
	18093	15	1.81E-05	5.63E-07	2.98E-05	1.98E-15	1.49E-22	1.49E-22
	17876	6	4.47E-05	3.91E-05	4.94E-06	1.19E-18	1.19E-14	1.74E-09
	17788	3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	17700	12	7.62E-05	6.14E-05	1.27E-04	3.77E-06	2.71E-07	6.37E-07
	17612	12	5.65E-05	1.31E-05	7.11E-05	3.17E-06	2.71E-07	6.23E-07
	17570	14	8.45E-05	2.45E-05	1.44E-04	6.02E-07	2.55E-11	4.19E-10
	3514	14	8.13E-05	3.76E-05	3.84E-05	6.02E-07	2.55E-11	2.09E-09
	17381	3	1.43E-04	4.41E-05	6.34E-09	0.00E+00	1.74E-17	0.00E+00
	17264	14	4.27E-07	1.49E-04	5.66E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	17000	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	16941	13	2.27E-05	3.43E-05	9.13E-06	8.64E-08	5.97E-10	1.02E-09
	16899	13	2.57E-05	7.19E-05	8.11E-05	8.64E-08	5.97E-10	1.67E-08
	16688	1	2.52E-05	3.12E-05	6.85E-05	8.10E-17	3.19E-10	2.67E-11
	16600	1	5.79E-05	3.77E-06	9.55E-05	8.64E-08	5.97E-10	5.16E-10
	16541	13	1.03E-05	5.28E-05	3.55E-05	4.38E-17	2.14E-09	2.67E-11
	16499	13	4.15E-05	1.19E-06	3.60E-05	6.61E-17	6.56E-10	2.67E-11
	16288	7	3.55E-05	2.70E-06	8.29E-06	1.66E-15	7.64E-09	5.61E-08
	16200	7	6.63E-05	3.99E-07	1.24E-06	1.05E-15	2.33E-14	6.86E-14
	16141	13	1.24E-06	7.40E-05	6.37E-05	0.00E+00	0.00E+00	5.61E-08
	16099	13	1.86E-05	3.60E-05	5.19E-05	4.71E-18	3.63E-09	5.61E-08
	15888	6	7.15E-05	1.09E-05	1.22E-07	6.59E-03	2.77E-07	2.40E-07
	15800	6	6.36E-05	3.12E-06	1.96E-07	6.59E-03	2.77E-07	2.19E-07
	15565	13	8.97E-07	1.66E-06	1.10E-05	1.34E-08	2.03E-10	1.05E-08
	15523	13	3.26E-05	2.70E-05	1.56E-05	1.34E-08	2.03E-10	1.08E-08
	15335	12	1.85E-05	6.35E-06	4.25E-05	3.06E-04	3.00E-10	1.00E-06
	15293	12	6.70E-05	9.84E-05	1.80E-05	3.06E-04	9.86E-11	1.68E-06
	15082	2	3.31E-05	1.13E-05	8.79E-05	1.37E-17	7.05E-17	2.35E-11
	14994	2	1.11E-04	3.08E-08	1.32E-04	3.06E-04	5.89E-11	4.66E-11
	14935	12	1.29E-05	8.00E-07	6.28E-06	2.33E-16	4.05E-11	1.94E-06
	14893	12	3.13E-06	2.39E-06	6.03E-06	2.33E-16	4.05E-11	1.94E-06
	14682	4	7.91E-05	3.44E-07	3.43E-05	3.42E-17	3.28E-11	2.25E-11
	14594	4	8.58E-05	3.47E-05	4.93E-05	7.41E-17	1.75E-12	1.25E-12
	14535	12	8.39E-06	1.18E-05	1.02E-05	9.25E-17	4.46E-12	1.94E-06
	14493	12	1.39E-05	1.66E-05	1.25E-05	9.22E-17	4.03E-12	1.94E-06
	14282	5	4.53E-05	1.74E-05	6.31E-05	2.74E-18	3.58E-12	1.94E-06
	14194	5	9.06E-06	1.28E-06	8.98E-06	9.98E-18	3.46E-15	1.11E-15
	14047	12	2.18E-05	2.99E-06	8.84E-06	7.40E-17	4.35E-15	1.40E-15

صرف نظر کردن از زبری سطح درزه باعث ایجاد خطا در محاسبه دبی جریان می‌شود و برای فضاهای زیرزمینی، تونل‌های انتقال آب، صنعت نفت و ... این درصد خطا غیرقابل قبول می‌باشد و مراحل طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی و معدنی را با اختلال مواجه می‌کند. بدین منظور با احتساب زبری سطح درزه همراه با دیگر پارامترهای هندسه شکستگی همچون بازشدگی متغیر، جهت‌داری و ... در مدل‌های دوبعدی DFN و بر مبنای معیار بارتون - بندیس، دبی جریان سیال ورودی به سازه‌های زیرزمینی را دقیق‌تر پیش‌بینی نمود.

۵-۶- مدل‌سازی عددی سه‌بعدی جریان سیال در شبکه شکستگی‌های

توده‌سنگ

۵-۶-۱- مقدمه

برای مدل‌سازی سه‌بعدی توده‌سنگ جهت بررسی تأثیر زبری بر جریان سیال لازم است بازشدگی هیدرولیکی هر درزه از مدل دوبعدی استخراج شود. بدین معنی که دو مدل سه‌بعدی ساخته خواهد شد: (۱) مدل سه بعدی با بازشدگی بدون احتساب زبری سطح درزه (بازشدگی مکانیکی) و (۲) مدل سه‌بعدی با بازشدگی هیدرولیکی (سطوح زبر). در مدل سه‌بعدی با بازشدگی هیدرولیکی، زبری سطح درزه طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس در بازشدگی تأثیر داده شده است.

تابع توزیع حاکم بر بازشدگی هیدرولیکی برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزارهای آماری به دست آمده‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد که بازشدگی هیدرولیکی از تابع توزیع لاگ نرمال و توانی تبعیت می‌کند (Baghbanan, 2008). در جدول ۵-۱۳ تابع توزیع مناسب همراه با میانگین و انحراف معیار بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی برای هر دسته درزه نشان داده شده است.

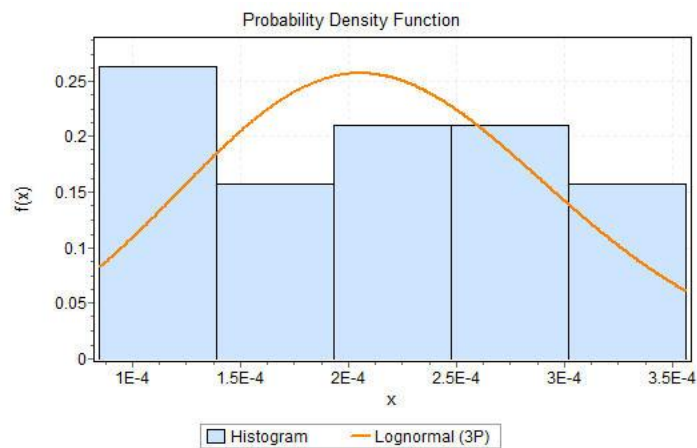
جدول ۵-۱۳: پارامترهای مناسب‌ترین تابع توزیع حاکم بر اندازه بازشدگی دهانه شکستگی برای هر دسته

درزه

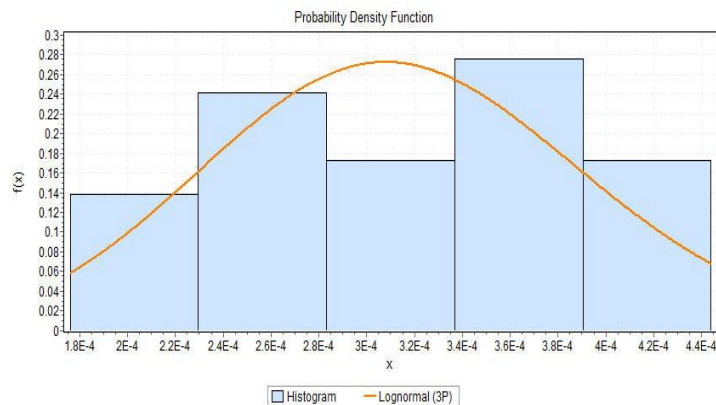
دسته درزه	بازشدگی	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
J ₁	هیدرولیکی	لاگ نرمال	$2/14 \times 10^{-4}$	$8/46 \times 10^{-5}$
	مکانیکی	لاگ نرمال	$2/85 \times 10^{-4}$	$9/6 \times 10^{-5}$
J ₂	هیدرولیکی	لاگ نرمال	$2/28 \times 10^{-4}$	$1/1 \times 10^{-4}$
	مکانیکی	لاگ نرمال	$3/13 \times 10^{-4}$	$7/9 \times 10^{-4}$
J ₃	هیدرولیکی	لاگ نرمال	$1/75 \times 10^{-4}$	$9/80 \times 10^{-4}$
	مکانیکی	لاگ نرمال	$2/64 \times 10^{-4}$	7×10^{-5}

تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده به بازشدگی هیدرولیکی هر دسته درزه در شکل‌های ۵-۳۱، ۵-۳۲ و

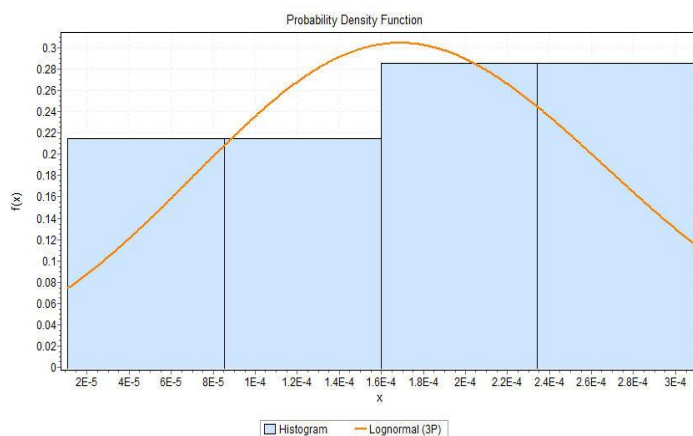
و ۵-۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۲: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه ۱



شکل ۵-۳۳: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه ۲

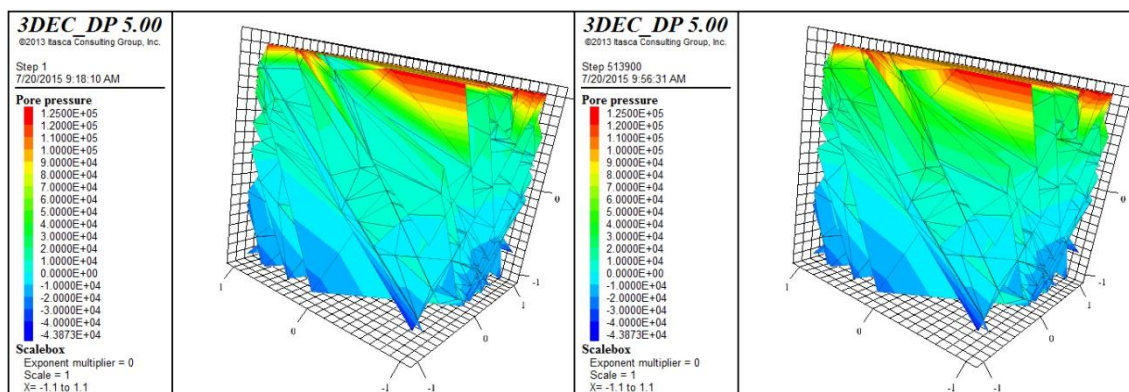


شکل ۵-۳۴: تابع توزیع لاگ نرمال برای بازشدگی هیدرولیکی دسته درزه ۳

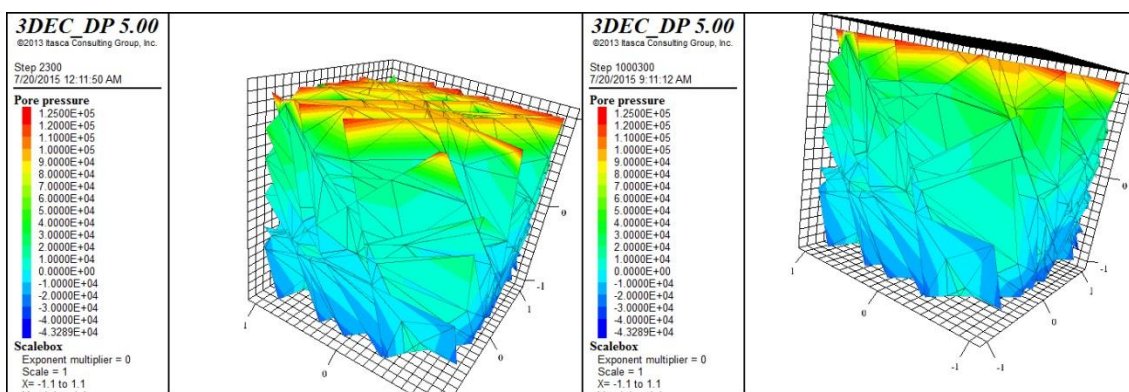
۵-۶-۲- تأثیر زبری بر جریان سیال عبوری از توده سنگ

پس از تولید مدل سه بعدی DFN برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن، این مدل‌ها باید تحت تأثیر شرایط تنش‌های محیط قرار گیرند و سپس در مدل‌های سه بعدی جریان برقرار گردد.

شرایط مرزی مدل سه بعدی همانند مدل دوبعدی محاسبه و اعمال شده است و فشار سیال بر مرزها مطابق شکل ۵-۱۸ از بالا به پایین اعمال شده است. در شکل‌های ۵-۳۵ و ۵-۳۶ فشار سیال وارده بر مدل‌های سه بعدی به ترتیب برای مدل با بازشدگی مکانیکی و مدل با بازشدگی هیدرولیکی نشان داده شده است.

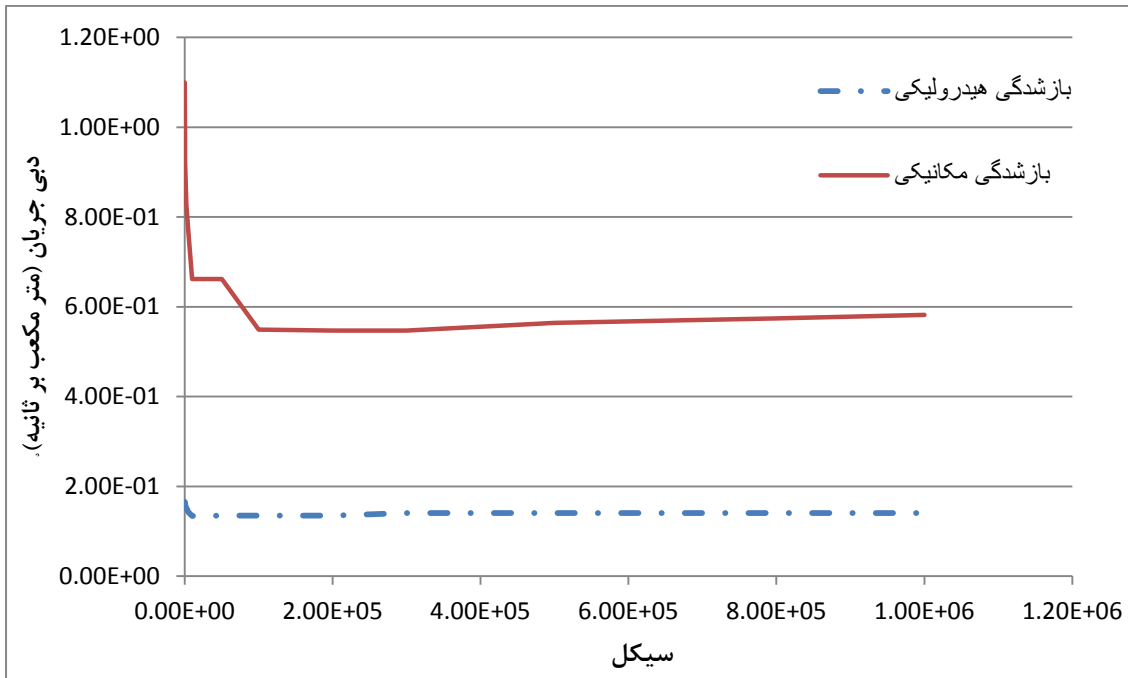


شکل ۵-۳۵: اعمال فشار سیال از بالا به پایین بر مدل سه‌بعدی برای بازشدگی بدون احتساب زبری سطح درزه (مکانیکی).



شکل ۵-۳۶: اعمال فشار سیال از بالا به پایین بر مدل سه‌بعدی برای بازشدگی هیدرولیکی (سطوح زبر)

نمودار دبی جریان برای هر دو مدل سه‌بعدی در شکل ۵-۳۷ نشان داده شده است. اندازه دبی جریان برای مدل با بازشدگی مکانیکی و مدل با بازشدگی هیدرولیکی به ترتیب $0/59$ و $0/99$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. دلیل کاهش چشم‌گیر دبی جریان به میزان ۸۰ درصد، زبری سطح درزه می‌باشد که طبق معیار بارتون – بندیس باعث کاهش بازشدگی دهانه درزه (بازشدگی هیدرولیکی) و در نهایت کاهش چشم‌گیر دبی جریان می‌شود.



شکل ۵-۳۷: اندازه دبی جریان آب در دو مدل سه بعدی

۵-۷- بحث و نتیجه گیری

حضور آب زیرزمینی علاوه بر ایجاد مشکلات اجرایی، اقتصادی، ایمنی و محیط زیستی، باعث کاهش شدید پایداری توده سنگ اطراف حفاریات زیرزمینی می شود. اتخاذ راه کار مناسب برای به حداقل رساندن تأثیر این مخاطرات، نیازمند مطالعه و بررسی همه جانبه مسئله است. برای رسیدن به این هدف بایستی پارامترهای مؤثر با دقت برآورد شوند که پارامترهای هندسی شکستگی ها موجود در توده سنگ مانند: بازشدگی دهانه درزه و زبری سطح درزه، مهمترین پارامترهای تأثیرگذار هستند.

در این بخش، ضمن تشریح نقش زبری سطح درزه بر جریان سیال عبوری از آن، مدل سازی جریان سیال در محیط های سنگی با تکیه بر مفهوم شبکه شکستگی مجزا (DFN) مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا مدل با بازشدگی مکانیکی، بدون احتساب زبری سطح درزه و با استفاده از نرم افزار 3DEC ساخته شد و سپس مدلی با بازشدگی هیدرولیکی که طبق مدل رفتاری بارتون - بندیس زبری سطح درزه را به صورت کاهش بازشدگی تأثیر می دهد، ساخته شد. شرایط مرزی تنش همانند مدل های

دوبعدی DFN اعمال شد و جریان سیال از بالا به پایین در مدل برقرار شد.

اختلاف دبی جریان برای هر دو مدل همانند مدل‌های دوبعدی DFN زیاد می‌باشد. طبق قانون کوبیک بازشدگی دهانه درزه به‌عنوان مؤثرترین پارامتر تأثیرگذار بر دبی جریان می‌باشد که کاهش ناچیز آن باعث افت زیادی در دبی جریان می‌شود. لذا طبق جدول ۵-۱۳ و نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که علت اختلاف شدید اندازه دبی جریان به میزان ۸۰ درصد برای سطوح زبر نسبت به مدل با سطوح صاف، زبری سطح درزه می‌باشد که طبق معیار بارتون - بندیس باعث کاهش بازشدگی دهانه درزه می‌شود. پس زبری همراه با بازشدگی دهانه درزه مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر دبی جریان عبوری می‌باشند که در مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی چشم‌پوشی از آن اجتناب‌ناپذیر می‌باشد و باید در مراحل طراحی و اجرای پروژه‌های معدنی و عمرانی مورد بررسی قرار گیرند تا از خطا در محاسبه دبی جریان ورودی به سازه جلوگیری شود.

۶- فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه

بررسی خواص هیدرومکانیکی توده‌سنگ در فعالیت‌های عمرانی، معدنی، محیط زیستی مثل دفن زباله‌های خطرناک و باطله، فعالیت‌های هسته‌ای و انواع انرژی‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. مطالعه رفتار جریان سیال درون شکستگی منفرد و شبکه شکستگی با هدف کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی در سازه‌های زیرزمینی و روباز به عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی مطرح است که با به‌کارگیری مدل مناسب برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ اطراف سازه مثل تونل، مخازن دفن زباله‌های هسته‌ای و ... می‌توان دقت مطالعات طراحی و ایمنی را افزایش داد.

ساده‌سازی و کاربردی‌سازی مسائل پیچیده عموماً با استفاده از روش‌های مدل‌سازی انجام می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار پیچیده هیدرومکانیکی توده‌سنگ ابتدا لازم است که پارامترها و عوامل مؤثر در رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ بررسی شود. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی نفوذپذیری ماتریکس سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بسیار ناچیز است. شکستگی‌ها

مسیر اصلی جریان سیال را تشکیل می‌دهند. در این حالت رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ به وسیله شکستگی و شبکه شکستگی‌ها کنترل می‌شود.

رفتار هیدرولیکی شکستگی منفرد به عنوان شروعی برای بررسی رفتار توده‌سنگ، یکی از مباحث پایه در مکانیک‌سنگ به حساب می‌آید. مطالعه رفتار هیدرومکانیکی شکستگی منفرد در آزمایشگاه و یا توسط مدل‌سازی از تست آزمایشگاهی انجام می‌گیرد که جریان سیال در مدل‌های عددی بر پایه معادلات ناویر - استوکس در شکستگی برقرار می‌شود. از ساده‌سازی معادلات ناویر - استوکس، قانون کوبیک به دست می‌آید، که بازشدگی دهانه درزه از پارامترهای مهم در این رابطه می‌باشد. در دهه‌ی اخیر محققین بازشدگی درزه را صاف و تأثیر ناهمواری سطح درزه را در نظر نمی‌گرفتند ولی به دلیل عدم تطابق نتایج دبی جریان سیال با نمونه‌های واقعی، به دنبال راه‌کاری برای رفع این مشکل و اعمال تأثیر زبری سطح درزه رادر قانون کوبیک گشتند که منجر به اصلاح قانون کوبیک با استفاده از روابط تجربی گردید. محققان از طریق روابط تجربی، به سه شیوه تأثیر زبری سطح درزه را در قانون کوبیک گنجانند، که شامل موارد زیر می‌باشد.

۱. روابط تجربی بر مبنای کاهش توان بازشدگی

۲. روابط تجربی بر مبنای کاهش بازشدگی

۳. روابط تجربی بر مبنای اعمال ضریب به معادله کوبیک

همچنین تاکنون معیارهای انگشت‌شماری برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه توسعه داده شده است که معیار بارتون - بندیس مهم‌ترین معیار در این زمینه به حساب می‌آید. در این معیار اگر مقدار دهانه بازشدگی مورد استفاده در قانون کوبیک به‌طور مناسب و دقیق انتخاب شود، قانون کوبیک رفتار هیدرومکانیکی شکستگی را برای حالت جریان آرام به‌طور مناسبی برآورد می‌کند.

در فصل سه این پایان‌نامه برای اعتبارسنجی معیار بارتون - بندیس (نرم‌افزار UDEC) و مدل عددی، مدلی مطابق با خصوصیات تست آزمایشگاهی ساخته شد که در آن زبری سطح شکستگی نمونه آزمایشگاهی $JRC=6/2$ می‌باشد. همچنین برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه، مدلی مطابق با

خصوصیات تست آزمایشگاهی ولی با سطح شکستگی صاف ساخته شد و با مدل عددی زبر ($JRC=6/2$) و تست آزمایشگاهی مقایسه شده و برای بررسی قابلیت معیار بارتون - بندیس نتایج مدل سازی و تست آزمایشگاهی با روابط تجربی (بخش ۳-۵) مقایسه شده است.

همچنان که اشاره شد در زمینه شکستگی منفرد، مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی فراوانی از تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان عبوری از آن، انجام گرفته ولی تاکنون مطالعات انگشت شماری برای شبیه سازی تأثیر این پارامتر بر دبی جریان در قالب توده سنگ انجام گرفته است.

برای شبیه سازی توده سنگ دو روش پیوسته و ناپیوسته وجود دارد که در روش پیوسته یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی توده سنگ ارائه می شود و در روش ناپیوسته پارامترهای ناپیوستگی در توده سنگ که در رفتار هیدرولیکی مؤثرند، مدل سازی می شوند که در حال حاضر، روش شبکه شکستگی مجزا یک ابزار غیرقابل جایگزین برای مدل سازی جریان سیال می باشد. در این پایان نامه به منظور ساخت مدل های واقعی از توده سنگ منطقه مورد مطالعه (محور سندانج - همدان) و سپس تحلیل جریان سیال در آن، از نرم افزارهای گروه ITSCA شامل 3DEC و UDEC، استفاده شده است.

در حالت کلی شبکه شکستگی مجزا با استفاده از پارامترهای هندسی شکستگی های موجود در خط برداشت و استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو ساخته می شود. در این تحقیق پس از برداشت داده های هندسه شکستگی های منطقه مورد مطالعه، جهت داری و ثابت فیشر دسته درزه های اصلی با استفاده از نرم افزار Dips مشخص شده و با استفاده از نرم افزارهای آماری توابع توزیع پارامترهای طول خط اثر و بازشدگی دهانه درزه به آنها برازش شده و به همراه دانسیته دسته درزه های اصلی، به عنوان پارامترهای ورودی شبیه ساز مونت کارلو و نرم افزار 3DEC، جهت تولید مدل های واقعی از توده سنگ مورد مطالعه، به کار گرفته شده است.

آخرین مرحله در تولید مدل های سه بعدی DFN، محاسبه ابعاد مدل می باشد که از طریق المان معرف حجم و با استفاده از روابط تجربی می توان بعد نفوذپذیری معادل را به دست آورد که مقدار آن برای منطقه مورد مطالعه ۲ متر، به دست آمده است.

بعد از ساخت مدل‌های سه‌بعدی DFN منطقه مورد مطالعه، برای اعمال مدل رفتاری بارتون - بندیس لازم است که مدل‌های دوبعدی DFN ساخته شود. بدین منظور، در راستای آزمون خط برداشت، مقاطع مختلفی از مدل سه‌بعدی برش زده می‌شود و سپس مدل‌های دوبعدی DFN، در نرم‌افزار UDEC شبیه‌سازی می‌شود. مقدار بازشدگی برای هر درزه، از طریق طول خط‌اثر به‌دست می‌آید و می‌توان برای هر طول خط‌اثر درزه، یک بازشدگی منحصر بفرد به‌دست آورد و همراه با زبری سطح درزه در مدل اعمال کرد.

در ادامه این تحقیق، برای بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال در مدل دوبعدی DFN، سه مدل دوبعدی ساخته شده است که شامل: (۱) مدل با درزه‌های صاف، (۲) مدل با درزه‌های زیر میانگین و (۳) مدل با درزه‌های زبر متغیر می‌باشد.

پس از شبیه‌سازی توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه، نوبت به شبیه‌سازی محیط اطراف توده‌سنگ می‌رسد که از طریق اعمال تنش بر مرزهای مدل انجام می‌پذیرد. در نهایت جریان سیال در مدل‌ها برقرار شده و اشکال و نمودارهای مربوط به مدل دوبعدی DFN و خروجی نرم‌افزار UDEC تفسیر شده و تأثیر زبری سطح درزه بر دبی جریان سیال تشریح می‌شود.

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر زبری بر دبی جریان در قالب مدل سه‌بعدی DFN، دو مدل با بازشدگی متفاوت ساخته شده است.

۱. مدلی با بازشدگی مکانیکی که توابع توزیع آن برای هر دسته درزه از بازشدگی درزه‌های برداشت شده به‌دست آمده است.

۲. مدل با بازشدگی هیدرولیکی که توابع توزیع آن از طریق معیار بارتون - بندیس و مدل‌های دوبعدی DFN در نرم‌افزار UDEC به‌دست آمده است.

مدل با بازشدگی مکانیکی، بدون احتساب زبری سطح درزه می‌باشد و مدل با بازشدگی هیدرولیکی طبق معیار بارتون - بندیس، زبری سطح درزه را به‌صورت کاهش بازشدگی در نظر می‌گیرد. پس در واقع مدل با بازشدگی مکانیکی بیانگر سطوح صاف و مدل با بازشدگی هیدرولیکی نماینده سطوح زبر

می‌باشد. پس از اعمال تنش‌های مرزی، مرزهای مدل‌ها تحت فشار آب قرار می‌گیرد و نتایج بررسی می‌شود.

نتایج برای شبکه شکستگی مشابه با شکستگی منفرد می‌باشد و کاهش چشم‌گیر دبی جریان سیال در مدل‌های زبر نسبت به مدل‌های صاف، حاکی از آن است که جریان سیال در توده‌سنگ تحت تأثیر زبری سطح درزه قرار می‌گیرد و چشم‌پوشی از تأثیر این پارامتر موجب خطا و اختلال در پروژهای عمرانی و معدنی می‌شود.

۲-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج کلی از بررسی تأثیر زبری سطح درزه بر جریان آب در توده‌سنگ درزه‌دار برای شکستگی منفرد و شبکه شکستگی (مدل دوبعدی و سه‌بعدی) در زیر ارائه شده است:

(۱) پارامترهای تأثیرگذار بر دبی جریان در شکستگی منفرد شامل بازشدگی متغیر، زبری سطح درزه، تنش نرمال و برشی و رفتار بارگذاری و باربرداری می‌باشد که در معیار بارتون - بندیس تأثیر و نقش آنها کاملاً مورد بررسی قرار گرفته است. به‌همین دلیل این معیار در چهارچوب نرم‌افزار UDEC، می‌تواند در زمینه تأثیر زبری سطح درزه بر جریان سیال در شکستگی، بسیار توانمند عمل کند.

(۲) قانون کوپیک از ساده‌سازی معادلات ناویر - استوکس و با فرض صاف بودن دیواره شکستگی به‌دست آمده است و برای سطوح زبر کارایی چندانی ندارد و طبق نتایج به‌دست آمده هرچه زبری سطح درزه افزایش یابد درصد خطای این قانون بیشتر می‌شود.

(۳) اصلاح قانون کوپیک توسط روابط تجربی جهت بررسی تأثیر زبری سطح درزه به‌تنهایی با اعمال یک ضریب به قانون کوپیک و یا کاهش توان بازشدگی دهانه درزه کافی نمی‌باشد و طبق نتایج به‌دست آمده، این روابط نمی‌توانند تأثیر و نقش زبری را به‌طور کامل پوشش دهند. به‌همین دلیل در محاسبه دقیق جریان در سطوح زبر، به‌عنوان رویکرد

کارآمد محسوب نمی‌شوند، ولی در معیار بارتون- بندیس پارامترهای تأثیرگذار و تأثیرپذیر بر زبری همچون سختی نرمال و برشی، گنجانده شده است.

(۴) در قانون کوبیک، مهمترین پارامتر بازشدگی دهانه درزه می‌باشد و به توان سه می‌رسد و به‌همین دلیل تغییر ناچیز در بازشدگی دهانه درزه، باعث تغییرات محسوس در دبی جریان سیال محاسبه شده توسط این قانون می‌شود. معیار بارتون - بندیس تغییرات پارامترهای بازشدگی و زبری سطح درزه در گام‌های زمانی را محاسبه می‌کند و برآورد مناسبی از رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ ارائه می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده، اختلاف دبی جریان سیال برای مدل‌های زبر نسبت به مدل‌های صاف زیاد می‌باشد که البته از دیدگاه قانون کوبیک نیز قابل توجیه است، زیرا زبری باعث کاهش بازشدگی و در نتیجه کاهش شدید دبی جریان سیال می‌شود. لذا نادیده گرفتن تأثیر زبری بر دبی جریان سیال غیر قابل قبول می‌باشد.

(۵) در توده‌سنگ درزه‌دار، سیال از مجاری با بازشدگی دهانه بیشتر جریان پیدا می‌کند و هرچه بازشدگی بیشتر باشد سهولت انتقال محسوس تر می‌شود، به‌همین دلیل زمانی که سطوح شکستگی‌ها صاف فرض می‌شود، بیشینه جریان سیال در طول درزه‌های کمتری پراکنده می‌شود و مدت زمان انتقال حجم مشخصی از سیال، کاهش می‌یابد و در نتیجه دبی جریان عبوری افزایش می‌یابد، ولی زمانی که زبری سطح درزه بر مبنای شرایط طبیعی درزه مدل‌سازی می‌شود، بازشدگی دهانه درزه کاهش می‌یابد و سیال باید طول درزه بیشتری را طی کند و در سطح مدل پراکنده شده و مدت زمان انتقال حجم معین از سیال افزایش می‌یابد. در نتیجه این امر باعث کاهش چشم‌گیر دبی جریان سیال نسبت به مدل با سطوح صاف می‌شود.

(۶) روش شبکه شکستگی مجزا (DFN)، روشی قابل اطمینان برای آنالیز جریان در حالت دوبعدی و سه‌بعدی، می‌باشد و نتایج کمی و کیفی مناسبی از تأثیر زبری بر دبی سیال

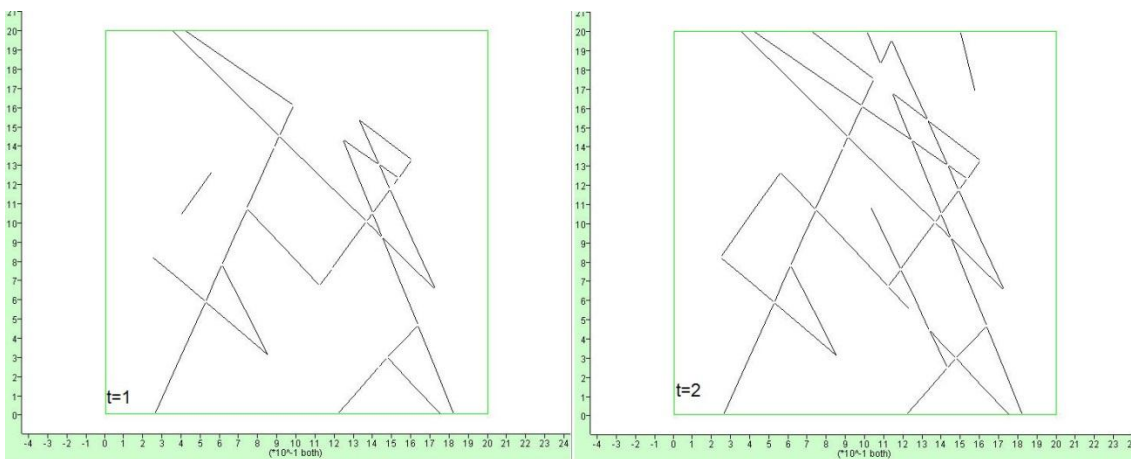
عبوری برای مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی را ارائه می‌دهد که نتایج در هر دو حالت شبیه

به هم می‌باشند.

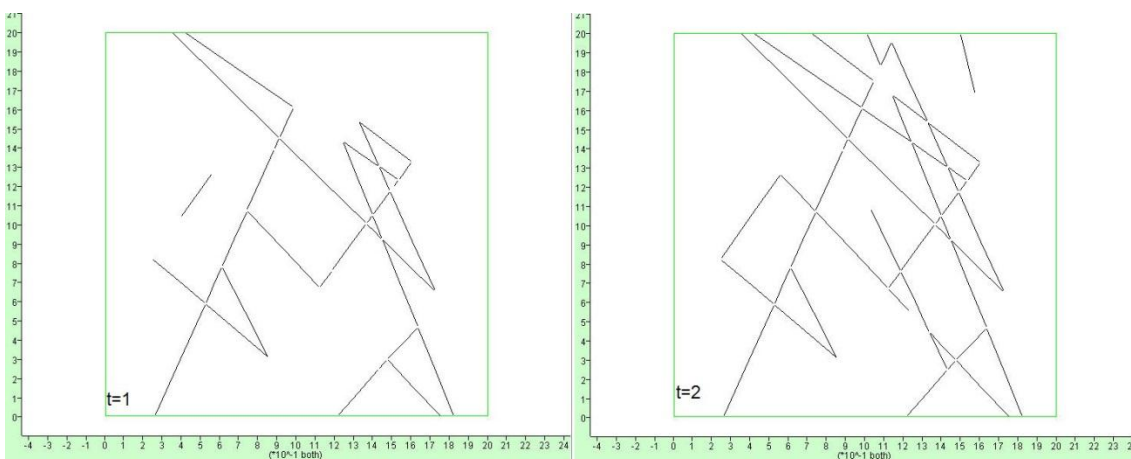
پیوست‌ها

پیوست آ

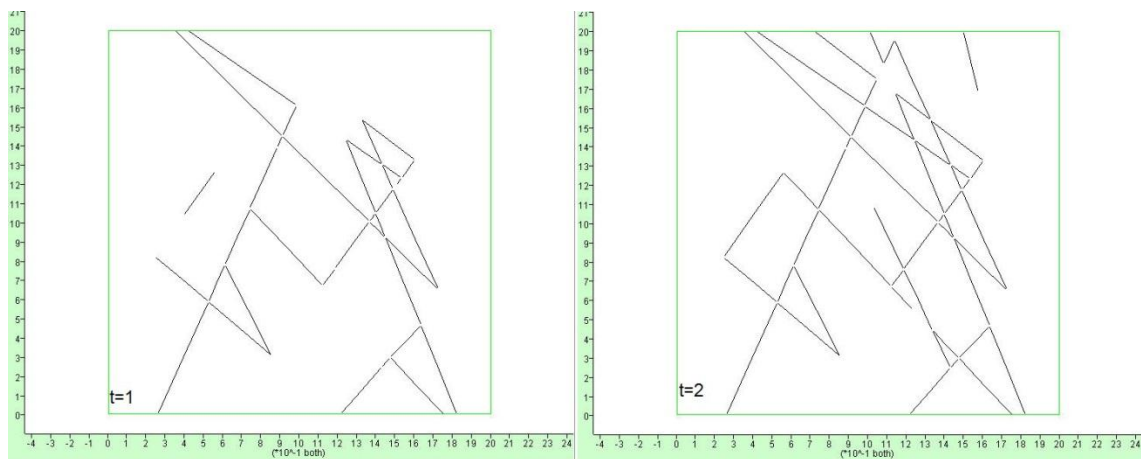
الف) شکل‌های مسیرهای پیشینه جریان برای مدل با سطوح صاف در حالت بارگذاری از بالا



بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح صاف در زمان $t=1$ و $t=2$



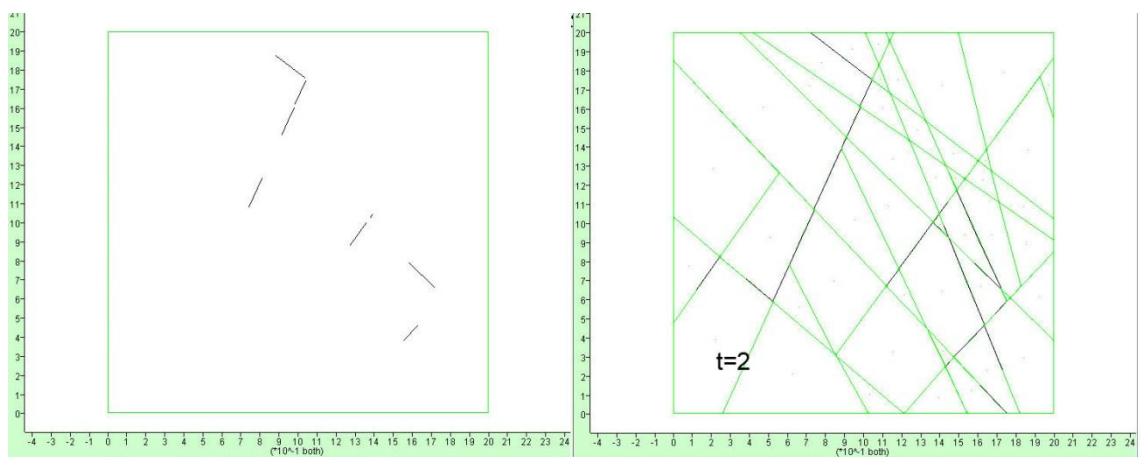
بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح صاف در زمان $t=3$ و $t=4$



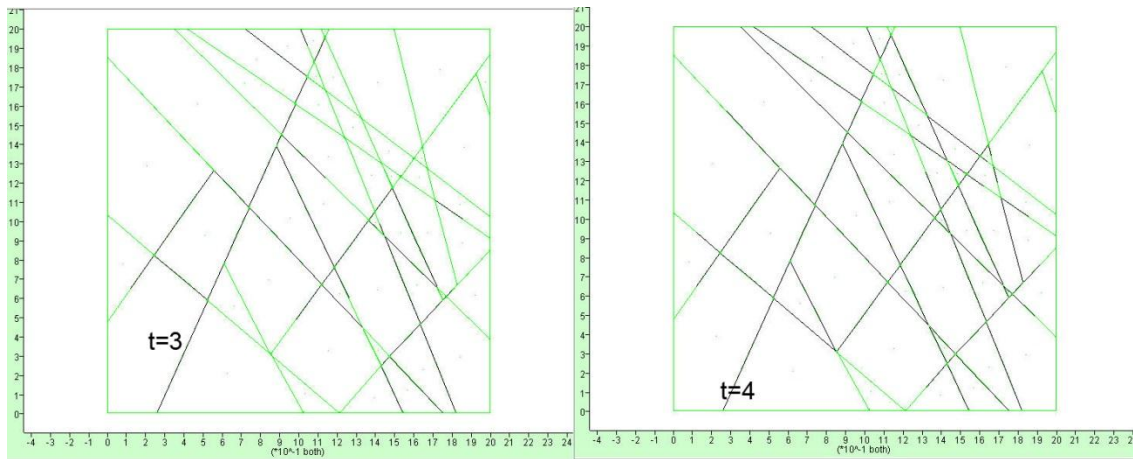
بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح صاف در زمان $t=5$ و $t=6$

ب) شکل‌های مسیرهای بیشینه جریان برای مدل با سطوح زبری میانگین هر دسته درزه در

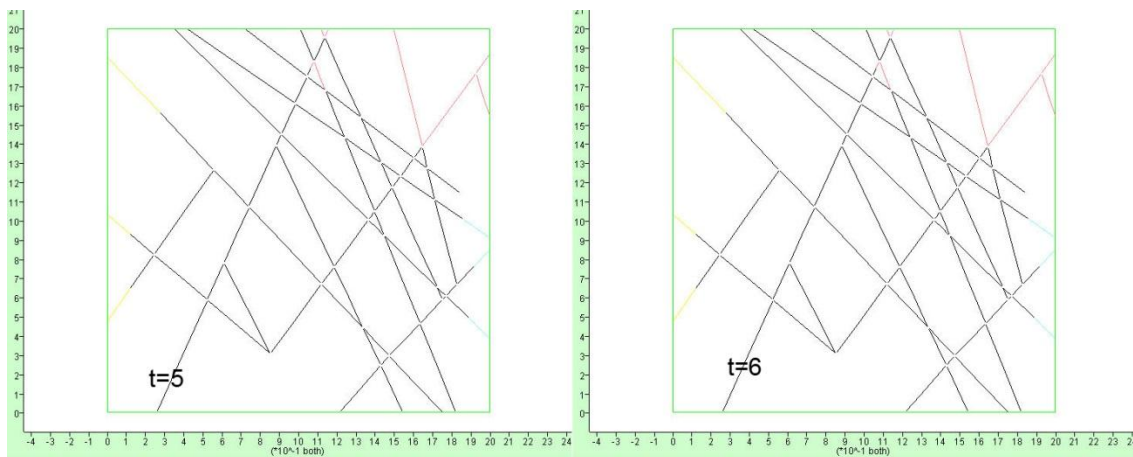
حالت بارگذاری از بالا



بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح زبری میانگین در زمان $t=1$ و $t=2$



بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح زبری میانگین در زمان $t=3$ و $t=4$



بیشینه جریان سیال و مسیر عبور سیال از مدل با سطوح زبری میانگین در زمان $t=5$ و $t=6$

فهرست منابع

خانلری، غ.، فریدونی، د.، (۱۳۹۰)، "ارائه روابط تجربی به منظور محاسبه مقاومت فشاری و مدول

الاستیسیته سنگ‌های سخت با استفاده از نتایج چکش اشمیت"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی،

جلد پنجم، شماره ۱.

جوادی اصطهباناتی، م.، (۱۳۸۸)، "برآورد تراوایی مغارهای طرح تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه با استفاده

از مفهوم شبکه شکستگی مجزا"، پایان نامه دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی

امیرکبیر.

درویش‌زاده، ع.، (۱۳۷۰)، "زمین‌شناسی ایران"، نشر دانش امروز، دانشگاه امیرکبیر، ۸۷۱ ص.،

زادهش، ج.، (۱۳۹۱)، "مدل‌سازی تداوم درزه‌ها و بررسی تاثیر آن بر مقاومت توده‌سنگ‌های

درزه‌دار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

میرزائی نصیرآباد، ح.، (۱۳۹۱الف)، "توصیف هندسی توده‌سنگ معدن سونگون با استفاده از مدل‌های

شبکه شکستگی مجزا"، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.

میرزائی نصیرآباد، ح.، (۱۳۹۱ب)، "تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه‌های شکستگی مجزای

توده‌سنگ درزه‌دار"، اولین همایش زمین‌شناسی فلات ایران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی

و فناوری پیشرفته.

- Adler, Pierre M., and J-F. Thovert. "Fractures and fracture networks". Vol. 15. Springer Science & Business Media, (1999).
- Baecher, G.B, and N.A Lanney. "trace length biases in joint surveys", Proc. 19th Rock Mech., Nevada." (1978). 56-65.
- Baghbanan, A., "Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses" (2008).
- Baghbanan, A., and Jing, L., "Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44.5 (2007): 704-719.
- Barton, N., "Review of a new shear-strength criterion for rock joints." Engineering geology 7.4 (1973): 287-332.
- Barton, N.R., Bandis, S.. and Bakhtar, K. "Strength deformation and conductivity coupling of rock joints" Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr. 22(3), 121–140 (1985).
- Barton, N., and Eda F. de Quadros. "Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 34.3 (1997): 252-e1.
- Blum, Philipp, Rae Mackay, and Michael S. Riley. "Stochastic simulations of regional scale advective transport in fractured rock masses using block upscaled hydro-mechanical rock property data." Journal of Hydrology 369.3 (2009): 318-325.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1994) Rock Mechanics for Underground Mining, 2nd edn, Chapman &Hall.
- Brown, E. T., and E. Hoek. "Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 15. No. 4. Pergamon, (1978).

- Brown, S.R. "Fluid flow through rock joints: effects of surface roughness". *J. of Geophysical Research* 92(B2), 1337–1347(1987).
- Cheng, M.Y. "Advancements and improvement, in discontinuous deformation analysis." *Computer and Geotechnics* 22, no. 2 (1998): 153-163.
- Cundall, P.A. "A computer model for simulatin progressive large scale movements in blocky rock system." *Proc. Int. Soc. of Rock Mechanics Nancy, France.* (1971).
- De Dreuzy, Jean-Raynald, Philippe Davy, and Olivier Bour. "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 2. Permeability of networks based on lognormal distribution of apertures." *Water Resources Research* 37 (2001): 2079-2095.
- Dimadis, G., A. Dimadi, and I. Bacasis. "Influence of Fracture Roughness on Aperture Fracture Surface and in Fluid Flow on Coarse-Grained Marble, Experimental Results." *Journal of Geoscience and Environment Protection* 2.05 (2014):
- Gamage, Ranjith. "Analytical and experimental modelling of coupled water and air flow through rock joints." (2000).
- Hoek, Evert, and Jonathan D. Bray. *Rock slope engineering.* CRC Press, (1981).
- Indraratna, B., P. G. Ranjith, and W. Gale. "Single phase water flow through rock fractures." *Geotechnical & Geological Engineering* 17.3-4 (1999): 211-240.
- ISRM, International Society for Rock Mechanics. "Commission on Standardization of Laboratory andField Tests: Suggested methods for the quantitative description of dis-continuities in rock masses." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomechanics Abstract* 15 (1978): 319-368.

- Itasca Consulting Group, Inc., "UDEC, Universal distinct element code, Version 4.00, Vol 1&2: User Manual." (2000).
- , Itasca Consulting Group, Inc., "3 Dimensional Distinct Element Code", Version 5.00, Vol 1&2: User Manual." (2013).
- Iwai, K., "Fluid flow in simulated fractures.", American Institute of Chemical Engineering Journal, (1976);2:259–263.
- Javadi. M, Sharifzadeh. M., Shahriar. K., " A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures", Journal of Hydrology 389 18–30. (2010).
- Jing, L., Stephansson, O., "Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering Theory and Applications", Volume 85 (2007).
- Johnston JD, McCaffrey KJW. "Fractal geometries of vein systems and the variation of scaling relationships with mechanism.", J Struct Geol (1996);18(2-3):349-358.
- Lomitze, G. Fluid flow in fissured formation, 1951 (In Russian). Cited from Louis (1969).
- Long, J. C. S., et al., "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures.", Water Resources Research 18.3 (1982): 645-658.
- Louis, C., " A study of groundwater flow in fractured rock and its influence on the stability of rock masses ", Rock Mechanics Research Report No. 10, Imperial College, University of London, september, (1969).
- Min, Ki-Bok. "Fractured Rock Masses as Equivalent Continua-A Numerical Study." (2004).
- Min K.-B., Stephansson, O., "The DFN-DEM Approach Applied to Investigate the Effects of Stress on Mechanical and Hydraulic Rock Mass Properties at Forsmark, Sweden "TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 21, No. 2, (2011), pp. 117-127.

- Noroozi, M., R. Kakaie, and S. E. Jalali. "3D Geometrical-Stochastical Modeling of Rock mass joint networks: Case study of the Right Bank of Rudbar Lorestan Dam plant." *Journal of Geology and Mining Research* 7.1 (2015): 1-10.
- Oda, Masanobu. "A method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses." *Canadian Geotechnical Journal* 25.3 (1988): 440-447.
- Palmström, Arild. "Measurement and characterization of rock mass jointing." In *situ characterization of rocks.* AA Balkema Publishers, Lise/Abingdon/Exton/Tokyo (2001).
- Pariseau, William G., Saurabh Puri, and Steve C. Schmelter. "A new model for effects of impersistent joint sets on rock slope stability." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45.2 (2008): 122-131.
- Priest, D Stephen. "Discontinuity analysis for rock engineering", London, Chapman & Hall. (1993).
- Priest, S. D., and J. A. Hudson. "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys.", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 18. No. 3. Pergamon, (1981).
- Ranjith, P. G., Sing-Ki Choi, and Mostafa Fourar. "Characterization of two-phase flow in a single rock joint." *International journal of rock mechanics and mining sciences* 43.2 (2006): 216-223.
- Roozali, M., Hossaini, M F., Moosavi, M., and Beiki, M., "A Laboratory Study on Stress Dependency of Joint Transmissivity and its Modeling with Neural Networks, Fuzzy Method and Regression Analysis." *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering* 46.1 (2014): 57-66.

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

Sean N . Sterling "Hydraulic Aperture Determinations From Borehole Information In the Chatsworth Formation at the Santa Susana Field Laboratory (SSFL)" University of Waterloo (2000).

Sharma, V.M, K.R Saxena, and R.D Woods. "Distinct element modeling in geomechanics." *Ballcema/Rotterdam*, (1999): 823-829.

Thiel, K. *Rock Mechanics in HydroEngineering*, Elsevier (1989).

Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A., Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress, *Journal of Geophysical Research*, (1981);86(B10):9287–9298.

Singhal, B. B. S., and R. P. Gupta. "Fractures and discontinuities." *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer Netherlands, (2010). 13-33.

Stephen R. Brown, "Fluid Flow Through Rock Joints' The Effect of Surface Roughness", *Journal of Geophysical research*, Vol.92, No. B2, pp. 1337-1347, February, (1987).

Yang, Z. Y., C. C. Di, and K. C. Yen. "The effect of asperity order on the roughness of rock joints." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38.5 745-752. (2001).

Vermilye, Jan M., and Christopher H. Scholz. "Relation between vein length and aperture." *Journal of Structural Geology* 17.3 (1995): 423-434.

- Wang, M., et al., "Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling.", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39.7 (2002): 887-904.
- Witherspoon P. A., J.S.Y. "Wang, K. Iwai, & J. Gale "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture." *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 6 pp.1016-1024. (1980).
- Zhang, L., and H.H Einstein. "Estimating the mean trace length of rock discontinuities.", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 31, no. 4 (1998): 217-235.
- Zhang, Xing, and David J. Sanderson, eds. "Numerical modelling and analysis of fluid flow and deformation of fractured rock masses", Elsevier, (2002).
- Zhou, Pin. "The Use of the Continuity Factor as a Tool to Represent Representative Elementary Volume in Rock Engineering Design." (2014).
- Zhu, W, Li Shucai, Shuchen Li, Weizhong Chen, and C.F Lee. "Systematic numerical simulation of rock tunnel stability considering different rock conditions and construction effects." *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, no. 5 (2003): 531-536.
- Zimmerman, Robert W., and Gudmundur S. Bodvarsson. "Hydraulic conductivity of rock fractures." *Transport in porous media* 23.1 (1996): 1-30.

Abstract

A rock mass consists of intact rock and various forms of discontinuity. Fluid flow through rock mass, transfers in the fractures and porous medium. In hard rock, the discrete approach is favoured in which the flow is assumed to be mainly through an interconnected fracture network. Fracture geometry includes Opening, roughness, orientation and..., is the determinative factor in the fluid flow rate through the fractures. In this research work, the effect of joint surface roughness has been evaluated.

In different studies, joint surface roughness considered to be as the coefficient cubic law, changing the opening exponent of the cubic law or change the value of opening of the joint. In this dissertation for study the effect of joint roughness surface (JRC) Barton-Bandis joint model has been used which is computed to the effect of roughness as the reduce of opening of fracture. In this regard, in first step, the effect of roughness on flow rate through single joint has been studied and results have been compared with the parallel plate model and it also is assessed with the results of experimental studies.

In the following,, numerical analysis has been investigated for evaluation the effect of surface roughness on the flow rate through the joints in both two-dimensional and three-dimensional cases. Also, two-dimensional and three-dimensional actual models of rock masses, situated in the Sanandaj-Hamadan road, have been created using the concept of discrete fracture network (DFN), in the 3DEC software.

The flow rate through two-dimensional DFN models have been calculated for three cases including smooth joints, an average roughness joints and an variable roughness joints using UDEC software and then they are compared together in the quality and quantity point of view. Furthermore flow rates in both mechanical and hydraulic opening modeling cases have been modeled for three-dimensional model, by using of 3DEC software.

The results show that the effect of surface roughness is significant on the fluid flow rate through the joints and the joint surface roughness, caused the changes in velocity and flow rate. Since in cubic law the exponent of opening is 3, so it is considered as the most important parameter and if the effective opening (hydraulic openings) doesn't calculate and it doesn't taken into account, the cubic law will be deviated and rough surfaces caused more reduces in the flow rate fluid than the smooth surfaces of the rock mass.

Key word: Fluid flow through jointed rock mass, Barton-Bandis joint model, Roughness, Discrete Fracture Network (DFN), UDEC software, 3DEC software



University of Shahrood

Faculty of Mining, petrolume and geophysics engineering

**Numerrical analysis of joint surface roughness effect on water flow within
jointed rock mass**

Heresh Mahmoodpoor

Supervisor:

Dr. Hossein Mirzaei

Dr. Seyed Rahman Torabi

September 2015