

اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ اللَّهُمَّ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

# مدلسازی رفتار توامان هیدرومکانیکی سنگ با نگاه ویژه به طراحی پرده آب در مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام

نگارنده: محمد جواد نصری فخرداود

استاد راهنما

دکتر احمد رمضان‌زاده

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰  
 تاریخ: ۲۴ / ۷ / ۹۸  
 ویرایش:

باسمه تعالی



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمد حواد نصری فخر داود دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن-مکانیک سنگ به شماره دانشجویی ۹۲۱۶۶۶۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۹۸/۰۶/۲۵ از رساله خود با عنوان: مدل سازی رفتار توامان هیدرومکانیکی سنگ با نگاه ویژه به طراحی پرده آب در معارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام دفاع و با اخذ نمره ۱۷ به درجه ۱۷ رساله خود تائید گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۲۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر احمد رمضان زاده	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر مهدی نجفی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۳	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۴	دکتر مرتضی جوادی	استاد مدعو داخلی	استاد بار	
۵	دکتر فرهنگ سرشکی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استاد	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:  
 ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:  
 تاریخ و امضاء



تقدیم اثر

روح پدرم که اولین آموزگارم در عرصه زندگی بوده و

به مادرم که دعای خیرش، همواره سهل کننده زندگی ام بوده و

به همسرم بانم که در تمام طول تحصیل همراه و به کام من بود.

## شکر و قدردانی

شکر و سپاس پروردگاری که بزرگترین امید و یاور زندگی ام است و هر چه دارم از اوست. شایسته است از زحمات بی‌شائبه استاد راهنما فریخته و فرزانه جناب آقای جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده که در کمال سه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیج گلگی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و همواره راهنما و راه‌گشا در انجام این پایان‌نامه بوده‌اند، شکر و قدردانی نمایم و از نگاه خداوند منان برای ایشان سربلندی مسالت نمایم.

از جناب آقای مهندس هومن جانی که به‌کاری و تعامل دوستانه‌ای با این پژوهش داشت، کمال شکر و قدردانی را دارم. از شرکت پلایه نفتی ایران که از این پژوهش حمایت مالی کرده‌اند تا این پژوهش به سرانجام برسد و اگر حمایت‌شان نبود این رساله ناقص باقی می‌ماند، شکر و قدردانی می‌کردم.

## تعمیر نامه

اینجانب محمد جواد نصری فخر داود دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی معدن - مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی رفتار توامان هیدرومکانیکی سنگ با نگاه ویژه به طراحی پرده آب در مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان زاده متعهد می شوم.

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

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

## حکیده

شناخت رفتار جریان سیال در توده‌سنگ در فعالیت‌های مهندسی نظیر سدسازی، استحصال و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، زمین‌گرایی و ذخیره‌سازی زباله‌های اتمی از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار هیدرولیکی توده سنگ، ناپیوستگی‌های موجود در آن است. در پژوهش حاضر با انجام آزمایش جریان سیال به صورت توام با تنش جانبی در شکستگی طبیعی سنگ آهک رفتار هیدرومکانیکی شکستگی بررسی گردید. سه الگوی رفتاری رابطه خطی، رابطه غیرخطی مرسوم (اثر اینرسی مضاعف) و رابطه غیرخطی در اثر اتساع شکستگی در نتایج آزمایش مشاهده شده است. در سطوح پایین تنش جانبی و نرخ جریان‌های پایین، رفتار سیال به صورت خطی است. در سطوح بالاتر تنش و نرخ جریان با توجه به هندسه شکستگی (اندازه دهانه بازشدگی و زبری سطوح شکستگی) الگوی جریان تعیین می‌گردد. در نتایج آزمایشگاهی می‌توان مشاهده کرد که برای نمونه‌ای با کوچکترین دهانه بازشدگی و زبرترین سطح شکستگی الگوی رفتاری جریان غیرخطی در اثر اتساع رخ می‌دهد این در حالی است که اگر دهانه بازشدگی شکستگی بزرگ باشد جریان غیر خطی مرسوم صورت می‌پذیرد. با استفاده از برازش آماری بر روی نتایج آزمایشگاهی ضریب‌های دو رابطه فورچهمیر و ایزباش بدست آمد. این دو رابطه به خوبی رفتار غیرخطی را توصیف می‌کنند ولی ضریب‌های معادله فورچهمیر حساسیت بهتری نسبت به تغییر تنش از خود نشان می‌دهند. عدد رینولدز بحرانی برای نتایج آزمایشگاه محاسبه شد. این عدد به نسبت تنش جانبی به صورت کاهشی تغییر می‌کند که نشان‌دهنده آغاز زودتر رفتار غیرخطی در نمونه سنگ تحت تنش جانبی است. ضریب اصطکاک برای جریان سیال در شکستگی به صورت تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی شکستگی تعریف شده است. مقایسه نتایج آزمایش با روابط ارائه شده نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی به نسبت روابط قبلی تخمین بهتری از ضریب اصطکاک را بدست می‌دهد. با استفاده از نرم افزار Fluent یک مدل مرجع از نتایج آزمایشگاهی ساخته شد تا با کمک آن مطالعات تکمیلی در خصوص رفتار سیال در شکستگی انجام شود. این نرم افزار به خوبی رفتار غیرخطی جریان سیال را مدلسازی می‌نماید، نتایج نشان داد، که با افزایش مقدار دهانه بازشدگی ضریب‌های خطی و غیرخطی رابطه فورچهمیر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دهانه بازشدگی شکستگی تاثیر زبری سطح بر افت فشار کاسته می‌شود. برای بررسی رفتار سیال در مقیاس بزرگ‌تر از مقیاس آزمایشگاهی از نتایج آزمایش فشار آب در سد بختیاری استفاده شد. سه الگوی رفتاری مشاهده شده در نتایج آزمایشگاهی را می‌توان در نتایج آزمایش درجا هم ملاحظه کرد. عدد رینولدز بحرانی برای جریان سیال در توده سنگ هم بررسی شد. مقادیر عدد رینولدز بحرانی در مقیاس توده سنگ کمتر از مقیاس آزمایشگاهی است. در نهایت با استفاده از مدلسازی عددی به بررسی

رفتار اثر توامان هیدرومکانیک توده سنگ درزه دار پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از نرم افزار 3DEC و براساس داده‌های بدست آمده از برداشت صحرایی شبکه شکستگی مجزا (DFN) برای توده سنگ ساخته شده است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که بدون احداث سامانه پرده آب در مغار ذخیره‌سازی امکان کنترل نشت امکان پذیر نیست.

**کلمات کلیدی:** جریان سیال، شکستگی سنگ، جریان غیرخطی، عدد رینولدز، سامانه پرده آب، مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

نشریات علمی - پژوهشی

1-Nasri Fakherdavood, M.J., Ramezanzadeh, A., Jenabi, H., (2019), "Laboratory investigation nonlinear flow characteristics through natural rock fractures under confining pressure", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 52(4), (<http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2017-142>)

2- Nasri Fakherdavood, M.J., Ramezanzadeh, A., (2019), "Evaluate the Behavior of Fluid Flow in Rock Mass According to the Result of Water Pressure Tests in the Bakhtiari Dam Project", Journal of Geotechnical and geological Engineering, (<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01033-6>)

۳- محمد جواد نصری فخرداود، احمد رمضان زاده، هومن جنابی، "مدلسازی عددی اثر زبری بر رفتار جریان سیال در شکستگی طبیعی سنگ"، مجله ژئومکانیک نفت، (DOI:10.22107/JPG.2019.165915.1082)

نشریات کنفرانسی

۱- محمد جواد نصری فخرداود، احمد رمضان زاده، " تخمین زبری و بازشدگی شکستگی طبیعی در سنگ"، سومین کنفرانس ملی ژئو مکانیک نفت، تهران ۱۳۹۷.

۲- محمد جواد نصری فخرداود، احمد رمضان زاده، "مدلسازی عددی رفتار پرده آب بند در مغارهای

ذخیره سازی نفت خام"، سومین کنفرانس منطقه ای و دوازدهمین کنفرانس تونل ایران، تهران، ۱۳۹۶

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات	۱
۲	مقدمه	۱.۱
۳	ضرورت تحقیق	۲.۱
۴	فرضیات پژوهش حاضر	۳.۱
۵	اهداف تحقیق	۴.۱
۵	مراحل تحقیق	۵.۱
۶	ساختار رساله	۶.۱
۹	فصل دوم: مروری بر پیشینه موضوع	۲
۱۰	مقدمه	۱.۲
۱۰	رفتار هیدرومکانیک	۲.۲
۱۳	هندسه شکستگی	۳.۲
۱۳	زبری سطح ناپیوستگی	۱.۳.۲
۱۷	بازشدگی	۲.۳.۲
۱۸	سطح تماس	۳.۳.۲
۱۹	معادلات حاکم بر رفتار هیدرولیکی	۴.۲
۲۸	عدد رینولدز بحرانی	۵.۲
۳۰	مکانیسم افت فشار در جریان سیال در داخل شکستگی سنگی	۶.۲
۳۳	رفتار توامان هیدرومکانیک با تنش نرمال	۷.۲
۳۷	روش‌های محاسبات عددی برای مدل‌سازی جریان سیال در توده‌سنگ	۸.۲
۳۷	روش پیوسته معادل	۱.۸.۲
۳۹	روش شبکه شکستگی مجزا	۲.۸.۲
۴۰	پیشینه مغارهای بدون پوشش	۹.۲
۴۷	جمع بندی	۱۰.۲
۴۹	فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی	۳

۵۰.....	مقدمه	۱.۳
۵۰.....	تهیه نمونه سنگ	۲.۳
۵۱.....	برداشت زبری سطوح درزه	۳.۳
۵۵.....	کمی‌سازی زبری سطوح شکستگی	۴.۳
۵۹.....	اندازه‌گیری بازشدگی	۵.۳
۶۲.....	انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوره	۶.۳
۶۲.....	نمونه مغزه مورد آزمایش	۱.۶.۳
۶۴.....	انجام آزمایش سه محوره	۲.۶.۳
۶۵.....	نتایج آزمایش سه محوره	۳.۶.۳
۶۸.....	آزمایش جریان سیال	۷.۳
۶۹.....	آماده‌سازی نمونه تک درز طبیعی	۱.۷.۳
۷۱.....	تجهیزات مورد استفاده در آزمایش	۲.۷.۳
۷۳.....	نحوه انجام آزمایش	۳.۷.۳
۷۵.....	نتایج آزمایش‌ها	۴.۷.۳
۷۹.....	تحلیل نتایج آزمایش‌ها	۸.۳
۷۹.....	بررسی الگوی رفتاری جریان سیال	۱.۸.۳
۸۳.....	بررسی قانون فورچه‌یمر وایزباش	۲.۸.۳
۸۶.....	عدد رینولدز بحرانی	۳.۸.۳
۸۷.....	ضریب اصطکاک	۴.۸.۳
۹۴.....	بازشدگی هیدرولیکی	۵.۸.۳
۹۷.....	جمع بندی	۹.۳
۹۹.....	فصل چهارم: مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها	۴
۱۰۰.....	مقدمه	۱.۴
۱۰۰.....	انتخاب نرم‌افزار مدل‌سازی عددی	۲.۴
۱۰۱.....	ساخت هندسه مدل	۳.۴
۱۰۴.....	اعتبار سنجی مدل عددی	۴.۴
۱۰۵.....	تحلیل و بررسی نتایج	۵.۴

۱۰۹.....	جمع بندی	۶.۴
۱۱۱.....	فصل پنجم: ارزیابی رفتار جریان سیال در توده‌سنگ	۵
۱۱۲.....	مقدمه	۱.۵
۱۱۲.....	روش انجام آزمایش فشار آب	۲.۵
۱۱۵.....	تحلیل نتایج آزمایش‌های فشار ثابت	۳.۵
۱۱۶.....	تحلیل نتایج آزمایش	۴.۵
۱۱۹.....	معیار عدد رینولدز	۵.۵
۱۲۱.....	جمع بندی	۶.۵
۱۲۳.....	فصل ششم: مطالعات میدانی	۶
۱۲۴.....	مقدمه	۱.۶
۱۲۴.....	انتخاب ساختگاه مطالعه	۲.۶
۱۲۵.....	مشخصات زمین شناسی عمومی منطقه	۱.۲.۶
۱۲۶.....	برداشت صحرایی توده‌سنگ مورد نظر	۳.۶
۱۲۸.....	جهت داری شکستگی‌ها	۱.۳.۶
۱۲۹.....	اندازه شکستگی‌ها	۲.۳.۶
۱۳۱.....	بازشدگی ناپیوستگی‌ها	۳.۳.۶
۱۳۲.....	فراوانی ناپیوستگی	۴.۳.۶
۱۳۳.....	جمع بندی	۴.۶
۱۳۵.....	فصل هفتم: مدل‌سازی عددی سامانه پرده آب مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام	۷
۱۳۶.....	مقدمه	۱.۷
۱۳۷.....	رفتار توامان هیدرومکانیک	۲.۷
۱۳۸.....	ساخت هندسه مدل	۳.۷
۱۴۴.....	تخصیص خصوصیات مکانیکی	۴.۷
۱۴۵.....	فرآیند مدل‌سازی	۵.۷
۱۴۸.....	تخمین فشار منفذی درون شکستگی‌های موجود در توده سنگ	۶.۷
۱۴۹.....	تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار	۷.۷

---

۱۵۱.....	جمع بندی.....	۸.۷
۱۵۲.....	فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات مطالعات آتی.....	۸
۱۵۳.....	مقدمه.....	۱.۸
۱۵۳.....	نتیجه‌گیری از پژوهش انجام شده.....	۲.۸
۱۵۸.....	پیشنهادات برای انجام پژوهش جدید.....	۳.۸
۱۶۱.....	منابع و مراجع.....	۹

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: فرآیند توامان هیدرومکانیکی؛ رفتار توامان مستقیم و غیرمستقیم (RUTQVIST AND STEPHANSSON, 2002) ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: روش‌های مختلف اندازه‌گیری زبری سطح درزه (شریف‌زاده و سیرانی ۱۳۹۱) ..... ۱۴
- شکل ۳-۲: پروفیل‌های استاندارد اندازه‌گیری JRC شکستگی (BARTON AND CHOUBEY, 1977) ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: تعریف بازشدگی منطقه‌ای و متوسط (IWANO 1995) ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: شماتیک نحوه حرکت سیال در داخل ناپیوستگی دارای سطح تماس (ZHANG ET AL., 2014) ..... ۱۹
- شکل ۶-۲: مدل صفحات موازی برای نمونه شکستگی ..... ۲۱
- شکل ۷-۲: مقالات چاپ شده و ارجاع داده شده با کلمات کلیدی "LINEAR FLOW AND ROCK MASS" و "NONLINEAR FLOW AND ROCK MASS" برای یک دوره بیست ساله ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ (YU ET AL., 2017) ..... ۲۳
- شکل ۸-۲: نیروهای وارده به حباب هیدروکربوری در درزه سنگ (LINDBLUM, 1977) ..... ۴۱
- شکل ۱-۳: جعبه نمونه سنگ جهت انجام آزمایش ..... ۵۱
- شکل ۲-۳: (الف) تجهیزات مورد استفاده برای برداشت هندسه شکستگی‌ها؛ (ب) نمونه واقعی و رقومی شده ..... ۵۳
- شکل ۳-۳: ابر نقاط برداشت شده از سطوح شکستگی نمونه‌ها ..... ۵۴
- شکل ۴-۳: توپوگرافی دیجیتالی شده سطوح شکستگی ..... ۵۵
- شکل ۵-۳: (الف) سطح رقومی شده از نمونه سنگ (ب) پروفیل تهیه شده از سطح نمونه سنگ F1 ..... ۵۵
- شکل ۶-۳: برازش خطی بر داده‌های لگاریتمی-اریوگرام ..... ۵۸
- شکل ۷-۳: نیازمندی‌ها برای تعیین بازشدگی شکستگی نمونه F1 ..... ۵۹
- شکل ۸-۳: نصب نقاط مرجع بر روی نمونه سنگ ..... ۶۰
- شکل ۹-۳: توزیع پراکندگی بازشدگی در نمونه F2, F1 ..... ۶۰
- شکل ۱۰-۳: توزیع پراکندگی بازشدگی در نمونه F3, F4 ..... ۶۱
- شکل ۱۱-۳: چهار نمونه سنگ انتخاب شده برای آزمایش مقاومت سه محوره ..... ۶۳
- شکل ۱۲-۳: (الف) آماده‌سازی دو انتهای نمونه (ب) پوشش پلاستیکی مورد استفاده برای اطراف نمونه ..... ۶۴
- شکل ۱۳-۳: (الف) دستگاه آزمایش فشار سه محوری؛ (ب) سلول آزمایش سه محوره ..... ۶۵
- شکل ۱۴-۳: نتایج آزمایش سه محوره ..... ۶۶

- شکل ۳-۱۵: نمونه سنگ‌ها پس از آزمایش ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۶: تعیین خواص توده‌سنگ با استفاده از معیار شکست هوک و براون و موهر-کولومب ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۷: مراحل آماده‌سازی نمونه سنگ برای آزمایش جریان سیال ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۸: نمونه مغزه‌های مورد آزمایش ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۹: نمایی کلی از تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش جریان سیال ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۰: (الف) پمپ تزریق روغن، (ب) پمپ فشار قوی و دقیق، (ج) مغزه نگهدار و المنت گرم‌کننده سیال، (د) محفظه پمپ سیال، (ه) مخزن گاز نیتروژن برای ایجاد فشار پشت مغزه (و) لاستیک نگهدارنده، مغزه و اسپیسر ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۱: تعبیه نمونه داخل غلاف لاستیک نگهدارنده و سلول آزمایش ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۲: شماتیک نحوه انجام آزمایش هیدرولیکی ..... ۷۵
- شکل ۳-۲۳: تغییرات گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال تحت تنش جانبی مختلف به همراه برازش آماری برای رابطه فورچهیمیر؛ نمودار (A) برای نمونه F1، نمودار (B) برای نمونه F2 ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۴: تغییرات گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال تحت تنش جانبی مختلف به همراه برازش آماری برای رابطه فورچهیمیر؛ نمودار (C) برای نمونه F3، نمودار (D) برای نمونه F4 ..... ۷۸
- شکل ۳-۲۵: تغییرات آب‌گذری نرمالیزه شده به نسبت عدد رینولدز- (A) نمونه F1، (B) نمونه F2؛ (C) نمونه F3، (D) نمونه F4 ..... ۸۰
- شکل ۳-۲۶: سه نوع الگوی رفتاری برای جریان سیال در شکستگی (نتایج نمونه شماره ۳ تنش جانبی ۵/۳۵-۰/۹۱؛ نتایج نمونه شماره ۴ تنش جانبی ۸/۱۵ مگاپاسکال) ..... ۸۲
- شکل ۳-۲۷: تغییرات پارامتر M با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت ..... ۸۴
- شکل ۳-۲۸: تغییرات پارامتر A معادله ایزباش با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت ..... ۸۴
- شکل ۳-۲۹: تغییرات پارامتر A معادله فورچهیمیر با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت ..... ۸۵
- شکل ۳-۳۰: تغییرات پارامتر B معادله فورچهیمیر با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت ..... ۸۵
- شکل ۳-۳۱: عدد رینولدز بحرانی در برابر تنش جانبی ..... ۸۷
- شکل ۳-۳۲: تغییرات ضریب اصطکاک برحسب دو مولفه عدد رینولدز و زبری نسبی ..... ۸۹
- شکل ۳-۳۳: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش‌بینی‌های مدل صفحات موازی، نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F1 ..... ۹۰

- شکل ۳-۳۴: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی، نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F2..... ۹۱
- شکل ۳-۳۵: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی، نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F3..... ۹۲
- شکل ۳-۳۶: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی، نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F4..... ۹۳
- شکل ۳-۳۷: تغییرات بازشدگی هیدرولیکی با تنش جانبی..... ۹۶
- شکل ۴-۱: ساخت مش برای نمونه شماره F۲..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲: هندسه شرایط مرزی و دامنه جریان سیال برای نمونه F1..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳: همگرا شدن معادلات و اتمام تحلیل..... ۱۰۳
- شکل ۴-۴: نتایج برای نمونه F3 تحت سرعت سیال ۰/۰۱ متر بر ثانیه..... ۱۰۳
- شکل ۴-۵: نتایج برای نمونه F2 برای دهانه بازشدگی ۰/۰۵ میلیمتر و سرعت ۰/۰۱ متر بر ثانیه..... ۱۰۴
- شکل ۴-۶: مقایسه بین افت فشار برای مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه F2..... ۱۰۵
- شکل ۴-۷: تغییرات افت فشار به نسبت تعداد المان به کار گرفته شده برای مدل‌سازی..... ۱۰۵
- شکل ۴-۸: توزیع فشار در طول نمونه F1 و بازشدگی ۰/۲ میلیمتر..... ۱۰۶
- شکل ۴-۹: تغییرات افت فشار به نسبت عدد رینولدز..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۰: خطای نسبی بین افت فشار تقریب زده شده به روش مدل‌سازی و برآورد شده با قانون مکعب برای اعداد مختلف رینولدز..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۱: روند تغییرات ضریب خطی و غیرخطی معادله فورچهمر به نسبت بازشدگی..... ۱۰۹
- شکل ۱-۵: شماتیکی از آزمایش فشار سیال به همراه نتایج (QUINN ET AL., 2013)..... ۱۱۴
- شکل ۲-۵: نتایج آزمایش فشار آب در گمانه B435 در دو مقطع (الف) ۲۰-۲۵ متر (ب) ۵۵-۶۰ متر..... ۱۱۶
- شکل ۳-۵: رابطه بین نرخ جریان با گرادیان فشار در گمانه‌ی GL402..... ۱۱۷
- شکل ۴-۴: محاسبه عرض شکستگی در دیواره گمانه (CHEN ET AL., 2015)..... ۱۲۰
- شکل ۱-۶: موقعیت جغرافیایی توده سنگ در محدوده سد شمیل..... ۱۲۵
- شکل ۲-۶: نمونه برگه ثبت ناپیوستگی‌ها با روش خط برداشت در منطقه مورد مطالعه..... ۱۲۷



- شکل ۳-۶: برداشت صحرایی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ ..... ۱۲۷
- شکل ۴-۶: برداشت بازشدگی و مواد پرکننده شکستگی‌های موجود در رخنمون توده‌سنگ ..... ۱۲۸
- شکل ۵-۶: استریونت دسته درزه‌های اصلی و جهت داری هر دسته درزه برای توده‌سنگ مورد مطالعه ..... ۱۲۸
- شکل ۶-۶: برازش تابع توزیع نرمال بر روی داده‌های خط اثر شکستگی‌ها ..... ۱۳۰
- شکل ۷-۶: برازش تابع توزیع لاگ نرمال بر روی داده‌های بازشدگی شکستگی‌های دسته درزه ۱ ..... ۱۳۲
- شکل ۱-۷: شبکه شکستگی ناپیوستگی DFN ..... ۱۳۹
- شکل ۲-۷: ابعاد و اندازه در نظر گرفته شده برای مغار ..... ۱۴۰
- شکل ۳-۷: بلوک ساخته شده برای مدلسازی هندسه شکستگی ..... ۱۴۱
- شکل ۴-۷: شماتیکی از جانمایی پرده آب در اطراف مغار ..... ۱۴۲
- شکل ۵-۷: هندسه در نظر گرفته شده برای مغار، گمانه‌های پرده آب در مدل عددی (شیب گمانه‌های ۱۵،۰ و ۳۰ درجه نسبت به افق) ..... ۱۴۳
- شکل ۶-۷: پارامترهای موثر در طراحی پرده آب (LI ET AL., 2016) ..... ۱۴۴
- شکل ۷-۷: اشباع شدن مدل تا ارتفاع ۱۰ متر بالاتر از تاج مغار ..... ۱۴۶
- شکل ۸-۷: نمودارهای نامتعادل کننده و متادیر جابجایی در دیواره‌های اطراف مغار ..... ۱۴۷
- شکل ۹-۷: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب صفر درجه ..... ۱۴۸
- شکل ۱۰-۷: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب ۱۵ درجه ..... ۱۴۹
- شکل ۱۱-۷: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب ۳۰ درجه ..... ۱۴۹
- شکل ۱۳-۷: بردارهای نرخ جریان آب به داخل مغار در مدل عددی در مقطع طولی ..... ۱۵۰
- شکل ۱-۸: روند نما طراحی سامانه پرده آب ..... ۱۵۷
- شکل ۲-۸: نمودار کلی برای برآورد GSI از مشاهدات زمین شناسی (MARINOS ET AL., 2005) ..... ۱۶۰

### فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مروری بر اعداد رینولدز بحرانی ارائه شده در مطالعات انجام شده تاکنون..... ۲۹
- جدول ۲-۲: مقایسه مدل‌های هیدرومکانیکی درزه سنگ (JING AND STEPHANSSON 2007)..... ۳۶
- جدول ۳-۲: جزییات سیستم پرده آب برای مغار ذخیره‌سازی در کشورهای جهان..... ۴۷
- جدول ۱-۳: میانگین پارامترهای آماری بدست آمده پروفیل‌های هر سطح برای گام حرکت یک میلی‌متر..... ۵۶
- جدول ۲-۳: مقادیر تخمین‌زده شده برای زبری با استفاده از روش فرکتال..... ۵۸
- جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی چهار نمونه..... ۶۳
- جدول ۴-۳: نتایج آزمایش سه محوره برای چهار نمونه..... ۶۵
- جدول ۵-۳: خصوصیات ژئوتکنیکی معادل توده سنگ..... ۶۷
- جدول ۶-۳: مشخصات هندسی نمونه‌ها..... ۷۰
- جدول ۷-۳: ارزیابی مدل‌های اصطکاک با استفاده از معیار *NOF*..... ۹۴
- جدول ۱-۵: مشخصات گمانه‌های مورد مطالعه..... ۱۱۶
- جدول ۲-۵: مقادیر ضریب خطی و غیرخطی معادله فورچپیمر..... ۱۱۹
- جدول ۳-۵: اعداد رینولدز بحرانی..... ۱۲۰
- جدول ۱-۶: خصوصیات دسته درزه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه..... ۱۲۹
- جدول ۲-۶: اولویت‌بندی تابع توزیع‌های حاکم بر طول خط اثر هر دسته درزه..... ۱۲۹
- جدول ۳-۶: پارامترهای تابع توزیع نرمال بر اندازه شکستگی برای هر دسته درزه..... ۱۳۱
- جدول ۴-۶: اولویت‌بندی تابع توزیع‌های حاکم بر بازشدگی شکستگی در هر دسته درزه..... ۱۳۱
- جدول ۵-۶: پارامترهای تابع توزیع لاگ نرمال بر بازشدگی شکستگی همراه با میانگین و انحراف از معیار..... ۱۳۲
- جدول ۶-۶: فراوانی طولی، سطحی و حجمی درزه‌ها در منطقه مورد مطالعه..... ۱۳۳
- جدول ۱-۷: مقادیر نهایی پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ..... ۱۴۴
- جدول ۲-۷: نرخ آب ورودی به مغار بر حسب *LIT/SEC* ناشی از سفره آب زیرزمینی (بدون پرده آب)..... ۱۵۰



## فصل اول: کلیات

## ۱.۱ مقدمه

فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی<sup>۱</sup> در توده‌سنگ طی نیم قرن اخیر در مباحث مربوط به مهندسی سنگ، مهندسی عمران، مهندسی نفت و محیط زیست مورد مطالعه قرار گرفته است. به طوری که بسیاری از پدیده‌ها نظیر شکست سدها، زمین لغزش‌ها با در نظر گرفتن این نوع رفتار در توده‌سنگ مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به ناشناخته بودن ماهیت این پدیده حوادث و رویدادهایی فاجعه‌باری در گذشته اتفاق افتاده است. برای جلوگیری از تکرار این رویدادهای، بررسی و شناخت فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی در بسیاری از فعالیت‌های مرتبط با مباحث مهندسی مکانیک سنگ از قبیل سدسازی، تونل‌سازی، مخازن دفن زباله‌های هسته‌ای، مغارهای ذخیره‌سازی مواد هیدرکربوری، چاه‌های نفت، انرژی زمین گرمایی و غیره ضروری است.

ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ دارند. در واقع درزه‌ها مسیر اصلی جریان سیال در توده‌سنگ را تشکیل می‌دهند که در نهایت پایداری فضاهای زیرزمینی را تحت تاثیر قرار خواهند داد. از سوی دیگر تنش‌های القایی ناشی از حفاری موجب تغییر در رفتار هیدرولیکی ناپیوستگی می‌گردد. بنابراین رفتار مکانیکی و هیدرولیکی ناپیوستگی در توده‌سنگ با یکدیگر مرتبط هستند.

رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار در دو مقیاس تک درزه سنگ و توده‌سنگ درزه‌دار که شامل تعداد زیادی درزه است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با این وجود برای شناخت اندرکنش‌های هیدرومکانیکی توده‌سنگ، در ابتدا نیاز به شناخت دقیقی از رفتار توامان یک شکستگی منفرد سنگی است. در نتیجه بدون دانستن رفتار یک شکستگی، هرگونه تلاش برای شناخت نفوذپذیری وابسته به تنش توده‌سنگ درزه‌دار بی‌سرانجام خواهد ماند. در ادامه کلیات مرتبط با موضوع رساله تشریح می‌شود.

---

1- Hydro-Mechanical coupling

## ۲.۱ ضرورت تحقیق

کشور ایران به‌عنوان یکی از کشورهای عمده تولیدکننده نفت خام در جهان از جنبه‌های گوناگونی نظیر تنظیم بازار عرضه و تقاضا، مسایل استراتژیک و اقتصادی به مخازن ذخیره‌سازی نفت خام نیاز دارد. از سوی دیگر ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی به‌صورت زیرسطحی در دهه‌های اخیر از دیدگاه‌های مختلفی اهمیت پیدا کرده است. فناوری ذخیره‌سازی نفت خام در مغار بدون پوشش به‌عنوان روشی با هزینه اجرای کم و انعطاف‌پذیری بالا در ساخت نسبت به سایر روش‌ها، مورد توجه قرار گرفته است.

پایداری مکانیکی مغار و کنترل نشت مواد هیدروکربنی دو چالش اصلی در ساخت این گونه مغارها است. فایق آمدن بر این چالش‌ها مستلزم انتخاب توده‌سنگ مناسب و طراحی سیستم کنترل نشت بهینه است. خوشبختانه تجربیات خوبی در زمینه ساخت مغارهای بزرگ سنگی در کشور وجود دارد از این رو دانش فنی این فناوری بومی‌شده و نگرانی در خصوص پایداری مغار را کاسته است. مرسوم‌ترین روش برای کنترل نشت مواد هیدروکربنی در این گونه مغارها استفاده از سامانه پرده آب<sup>۱</sup> است. در خصوص طراحی پرده آب علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه، به دلیل پراکندگی پژوهش‌ها و بررسی نشدن موضوع به‌طور کامل، فقدان دانش فنی مدون و جامع در کشور احساس می‌شود و نیاز برای رفع این کمبود ضرورت انجام تحقیق در این حوزه را دو چندان می‌کند.

طراحی مناسب پرده آب، مستلزم شناخت رفتار توامان هیدرومکانیکی توده‌سنگ است. نفوذپذیری توده‌سنگ که نقشی کلیدی در نحوه حرکت آب در توده‌سنگ دارد، خود تابعی از دو عامل ویژگی‌های ناپیوستگی توده‌سنگ و رژیم تنش‌های برجا است. البته این دو عامل (نفوذپذیری و تنش) به‌صورت توامان بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند.

---

1- Water curtain

در این تحقیق تلاش بر این است که در ابتدا منابع مختلف و تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گیرد و سپس با انجام مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، رفتار توامان هیدرومکانیکی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. در نهایت با استفاده از یافته‌های این تحقیق، معیارها و الزامات پایه‌ای برای طراحی سیستم پرده آب در مغار بدون پوشش پیشنهاد شود.

### ۳.۱ فرضیات پژوهش حاضر

هر تحقیقی با محدودیت‌هایی مواجه است که این تحقیق نیز از آن مستثنی نیست. برای برطرف کردن این محدودیت فرضیات لحاظ شده است. مهمترین محدودیت و فرضیات در نظر گرفته شده در این تحقیق عبارتند از:

۱. انجام آزمایش جریان سیال در نمونه سنگ نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی خاص است در این تحقیق پیگیری‌هایی برای ساخت این تجهیزات آزمایشگاهی انجام شد ولی متأسفانه ساخت و یا دسترسی به آن مستلزم صرف هزینه فراوان بود. بنابراین از دستگاه سیلاب زنی موجود در آزمایشگاه سنگ سیال دانشگاه استفاده شد.

۲. به‌طور کلی دو دامنه برای جریان سیال در توده‌سنگ شکسته وجود دارد: جریان سیال در داخل شکستگی‌ها و جریان سیال در محیط متخلخل ماده سنگ. در این تحقیق تنها به بررسی رفتار سیال در شکستگی پرداخته شده است. بر اساس این که ماده سنگ ناتراوا یا با تراوایی بسیار پایین در نظر گرفته شده است بنابراین تمام جریان آب از شکستگی، عبور خواهد کرد.

۳. باتوجه به محدودیت‌هایی که شرکت پایانه‌های نفتی در ارائه اطلاعات دارد و با عنایت به این که تمرکز این پژوهش بر شناخت رفتار هیدرومکانیکی شکستگی است، طراحی مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی برای یک مطالعه موردی مشخص در دستور کار این تحقیق نیست. با لحاظ این که

امکان برداشت تمامی اطلاعات از یک توده سنگ وجود ندارد در این تحقیق به جای بکارگیری از داده‌های فرضی از داده‌های واقعی در محل‌های مختلف استفاده شده است.

#### ۴.۱ اهداف تحقیق

به‌طور کلی اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از:

- (الف) شناخت رفتار هیدرولیکی جریان سیال در داخل شکستگی طبیعی سنگ در شرایط آزمایشگاهی؛
- (ب) مطالعه تاثیر تنش جانبی بر تغییرات تراوایی شکستگی سنگ در شرایط آزمایشگاهی؛
- (ج) مطالعه تاثیر هندسه شکستگی بر رفتار هیدرولیکی آن در شرایط آزمایشگاهی؛
- (د) توسعه معیارهای اولیه طراحی پرده آب جهت کنترل نشت در مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام.

نتایج این تحقیق کاربرد ویژه‌ای در طراحی حفاریات زیر زمینی جهت ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای بدون پوشش خواهد داشت. از آنجا که تاکنون در ایران طراحی حفاریات زیرزمینی با این کاربرد صورت نگرفته است، در این رساله با هماهنگی با شرکت پایانه‌های نفتی ایران انجام شده است.

#### ۵.۱ مراحل تحقیق

به‌طور کلی می‌توان مراحل انجام این تحقیق را در سه بخش کلی تقسیم بندی کرد که شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

(الف) بازدید میدانی و برداشت اطلاعات صحرائی از توده سنگ انتخاب شده توسط شرکت پایانه‌های نفتی ایران؛



(ب) انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیکی و هیدرولیکی بر روی نمونه سنگ سالم و نیز نمونه همراه شکستگی سنگ طبیعی؛

(ج) استفاده از مدل‌سازی عددی و به کارگیری نتایج بازدید میدانی و آزمایش‌ها آزمایشگاهی در مدل‌سازی عددی رفتار پرده آب در مغار بدون پوشش.

## ۶.۱ ساختار رساله

به طور مختصر مطالب این تحقیق در دو بخش کلی نگارش شده است. بخش اول شامل فصل‌های دوم تا پنجم می‌شود، در این فصل‌ها تمرکز بیشتر بر روی موضوعات مرتبط با جریان سیال در یک شکستگی تنها است. بخش دوم با دیدگاه کاربردی کردن نتایج بخش اول شامل فصل‌های ششم، هفتم و هشتم است که مقیاس مطالعه بزرگتر شده و در مقیاس توده‌سنگ موضوع بررسی شده است. این رساله در ۹ فصل به شرح زیر تدوین شده است:

در فصل اول به ضرورت مساله، هدف انجام پژوهش، فرضیات در نظر گرفته شده و روش تحقیق پرداخته شده است.

در فصل دوم به تعاریف مفاهیم و مبانی مرتبط با رفتار توامان هیدرومکانیک در سنگ درزه‌دار پرداخته شده است و با هدف اطلاع و استفاده از آخرین یافته‌های تحقیقات سایر پژوهشگران در خصوص رفتار توامان هیدرومکانیک توده‌سنگ درزه‌دار به مطالعه کتابخانه‌ای و بررسی تحقیقات انجام شده در این خصوص پرداخته شده است.

در فصل سوم آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی از سنگ و نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مورد نظر ارائه شده است. بخش آماده‌سازی نمونه شامل مراحل مغزه‌گیری مجدد، انجام اسکن نوری سطوح ناپیوستگی به منظور تعیین زبری این سطوح است. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش سه محوره و

و آزمایش جریان سیال همراه با اعمال تنش جانبی است. در بخش پایانی این فصل به تحلیل نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

در فصل چهارم رفتار جریان هیدرولیکی شکستگی با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شده است. یک مدل عددی مرجع برای آزمون‌های آزمایشگاهی ساخته شده و با این مدل عددی جریان سیال در شرایط متفاوتی با شرایط آزمایشگاهی مطالعه گردید.

در فصل پنجم به ارزیابی رفتار جریان سیال در توده‌سنگ پرداخته شده است. در این فصل با استفاده از نتایج آزمایش‌های فشار آب رفتار جریان سیال در توده‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با استفاده از روابط آزمایشگاهی عدد رینولدز بحرانی در توده‌سنگ محاسبه شده است.

در فصل ششم به معرفی ساختگاه توده‌سنگ مورد مطالعه و وضعیت زمین‌شناسی و ژئومکانیکی این ساختگاه پرداخته شده است. برداشت صحرایی از ساختگاه توده‌سنگ در این فصل گنجانده شده است. داده‌های برداشت شده از ناپیوستگی‌های ساختگاه به منظور تعیین دسته درزه‌ها، خصوصیات پارامتری و توابع آماری حاکم بر هریک از آنها توسط نرم افزارهای *DIPS* و *EasyFit* مورد تحلیل قرار گرفته و مقادیر فراوانی خطی و شدت حجمی دسته درزه‌ها محاسبه گردیده است.

در فصل هفتم، با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی رفتار اثر توامان هیدرومکانیک توده‌سنگ درزه‌دار پرداخته شده است. هندسه مغار ذخیره‌سازی با ابعاد نمونه‌های مشابه در دنیا درون توده‌سنگ درزه‌دار مذکور ایجاد و حفاری شده است. شرایط پایداری مغار تحت شرایط هیدرومکانیک ارزیابی شده است. سامانه پرده آب برایشه حالت مختلف زاویه داری نسبت به افق مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله بعد فشار آب منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار سامانه پرده آب بررسی شده است. سپس نرخ آب ورودی به درون مغار از طریق ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در برگیرنده محاسبه شده است.

در فصل هشتم جمع بندی و نتیجه گیری تحقیقات انجام شده و پیشنهادات تحقیقات بیشتر برای گسترش این کار در این بخش گنجانیده شده است.

## فصل دوم: مروری بر پیشینه موضوع

## ۱.۲ مقدمه

بر اساس هدف اصلی پژوهش، در فصل پیش‌رو با ارایه مفهوم شناسی مبانی نظری مرتبط با رفتار توامان هیدرومکانیک در شکستگی آغاز می‌شود. عوامل تاثیرگذار بر رفتار توامان هیدرومکانیکی یک شکستگی منفرد دسته‌بندی و مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس مروری بر مطالعات انجام شده در دهه‌های گذشته در مورد رفتار هیدرومکانیکی شکستگی‌های سنگ ارایه می‌شود. با توجه به گستردگی مطالب مرتبط با جریان سیال در توده‌سنگ، پژوهش‌های پیشین در چند بخش مجزا دسته‌بندی شده و تمرکز ویژه‌ای بر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی رفتار هیدرومکانیکی جریان سیال در یک شکستگی منفرد تحت بار جانبی اعمال شده است. نظریه‌های مطرح شده و مطالعات انجام شده در خصوص الگوی رفتاری جریان سیال مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. در ادامه تحقیقات انجام شده در خصوص عدد رینولدز بحرانی و مکانیسم افت فشار سیال جریان سیال در شکستگی آورده شده است.

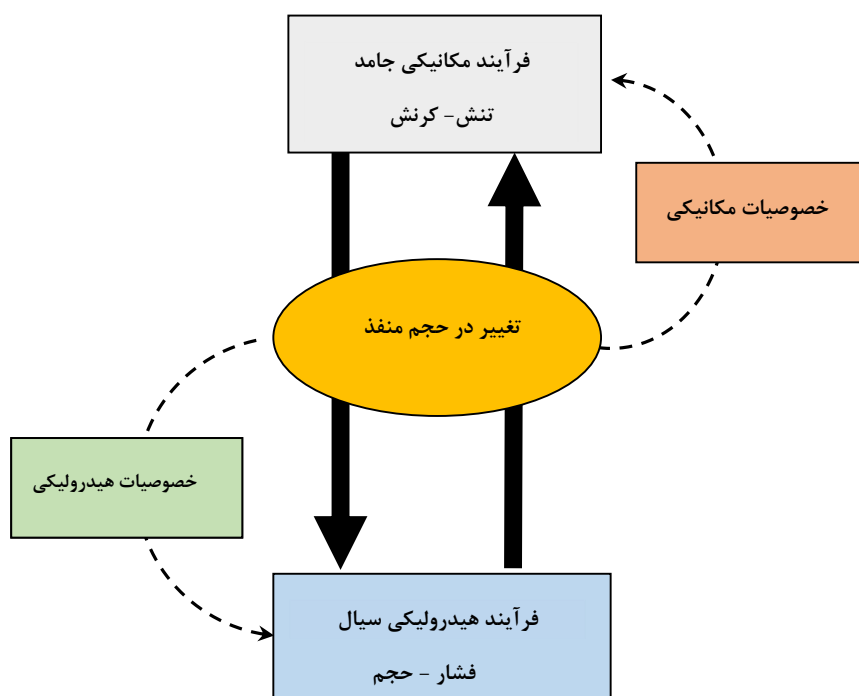
در این فصل همچنین مطالعات انجام شده در خصوص مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی و سامانه پرده آب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲.۲ رفتار هیدرومکانیک

در مباحث ژئومکانیک اصطلاح اندرکنش‌های هیدرومکانیک که با علامت اختصاری  $(H-M)$  نشان داده می‌شوند، به برهم‌کنش‌های فیزیکی بین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی در توده‌سنگ اطلاق می‌گردد. طرح شماتیکی از این رفتار در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

وارد شدن نیرو یا تنش به یک محیط اشباع از آب، موجب فشرده شدن ذرات تشکیل دهنده محیط و در نتیجه کاهش حجم می‌شود. در این حالت دو پدیده اتفاق می‌افتد: اگر نیروی وارد شونده به طور

ناگهانی و با سرعت قابل ملاحظه‌ای عمل نماید، آب موجود در منافذ برای خروج از محیط زمان کمی داشته موجب تراکم آب و افزایش فشار آن می‌شود. این نوع از فرآیندهای هیدرومکانیکی، «فرآیندهای هیدرومکانیکی زهکشی نشده» می‌نامند.



شکل ۱-۲: فرآیند توامان هیدرومکانیکی؛ رفتار توامان مستقیم و غیرمستقیم (Rutqvist and Stephansson, 2002)

اگر نیروهای خارجی با سرعت کمتری به محیط وارد شوند، آب موجود در محیط بدون متحمل شدن فشردگی به بیرون جریان پیدا می‌کند که «فرآیندهای هیدرومکانیکی زهکشی شده» نام گرفته و با عنوان فرآیندهای هیدرو مکانیکی مستقیم شناخته می‌شوند (Rutqvist and Stephansson, 2002). در این فرآیندها بر خلاف فرآیندهای زهکشی نشده، کاهش در فشار آب منفذی موجب ایجاد پدیده تحکیم و نشست در محیط مورد نظر می‌شود. برهم‌کنش‌های مشاهده شده در این فرآیندها در ادامه آمده است (Rutqvist and Stephansson, 2002):

(الف): تغییر در نیروهای خارجی موجب تغییر فشار آب می‌شود (تأثیر جامد بر سیال)؛

(ب): تغییر در فشار آب موجب تغییر حجم محیط متخلخل و تنش‌های وارده به محیط می‌شود (تاثیر سیال بر جامد).

در برخی از فرآیندهای هیدرومکانیکی، تغییرات به وجود آمده در محیط موجب تغییر خواص هیدرولیکی و مکانیکی محیط می‌شود. به این فرآیندها، فرآیندهای هیدرومکانیکی غیرمستقیم اطلاق می‌شود. در این فرآیندها برهم‌کنش‌هایی به صورت زیر در محیط روی می‌دهد (شکل ۱-۲) (Rutqvist and Stephansson, 2002):

(پ): تغییر در تنش‌های وارده موجب تغییر در نفوذپذیری می‌شود (تاثیر جامد بر سیال)؛

(ت): تغییر در فشار سیال باعث ایجاد تغییر در خواص مکانیکی می‌گردد (تاثیر سیال بر جامد).

فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم اغلب در خاک‌ها و سنگ‌هایی با نفوذپذیری کم دیده می‌شوند. این در حالی است که فرآیندهای هیدرومکانیکی که در سنگ‌های شکسته شده روی می‌دهد از نوع غیرمستقیم بوده و اثراتی از قبیل تغییر در نفوذپذیری توده‌سنگ در اثر تغییر در هندسه شکستگی‌ها به همراه آن وجود خواهد داشت. به همین خاطر بررسی تغییرات نفوذپذیری در اثر تنش‌های وارده به محیط و همچنین تاثیر تنش‌های ناشی از جریان بر توده‌سنگ مبحث اصلی فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی در توده‌سنگ‌های دارای شکستگی را تشکیل می‌دهد از این‌رو در ادامه رفتار هیدرومکانیک درزه‌سنگ و توده‌سنگ با تنش‌های عمودی و برشی تشریح می‌شود (Rutqvist and Stephansson, 2002).

فرآیندهای هیدرومکانیکی در یک شکستگی سنگی جزء فرآیندهای توامان دوطرفه می‌باشند.

پیش‌نیاز مطالعه بر روی فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی، دانستن موارد زیر است:

الف- هندسه شکستگی؛

ب- رفتار مکانیکی شکستگی؛

پ- رفتار هیدرولیکی شکستگی؛

از تلفیق دانسته‌های بدست آمده از پارامترهای هندسه، مکانیک و هیدرولیک شکستگی می‌توان به مطالعه فرآیندهای توامان هیدرومکانیکی آن پرداخت، در ادامه بطور جداگانه مفاهیم پایه‌ای هر یک از این عوامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳.۲ هندسه شکستگی

به فضای بین دو سطح شکستگی سنگ که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، هندسه شکستگی گفته می‌شود. کلید حل مسایل هیدرولیکی و هیدرومکانیکی یک درزه سنگی را می‌توان در شناخت هندسه آن دانست (Rong et al., 2016). دلیل اینکه هنوز مدلی دقیق و مناسب برای رفتار هیدرومکانیکی درزه سنگی ارایه نشده است، را می‌توان در عدم شناخت دقیق از هندسه شکستگی دانست. با داشتن شناخت صحیحی از هندسه شکستگی و ویژگی‌سنجی دقیق آن می‌توان رفتار هیدرومکانیکی شکستگی را مورد بررسی قرار داد. به طور کلی هندسه شکستگی توسط پارامترهایی نظیر بازشدگی، زبری و سطح تماس شکستگی توصیف می‌شود و تعاریف هر یک از این پارامترها در ادامه آمده است.

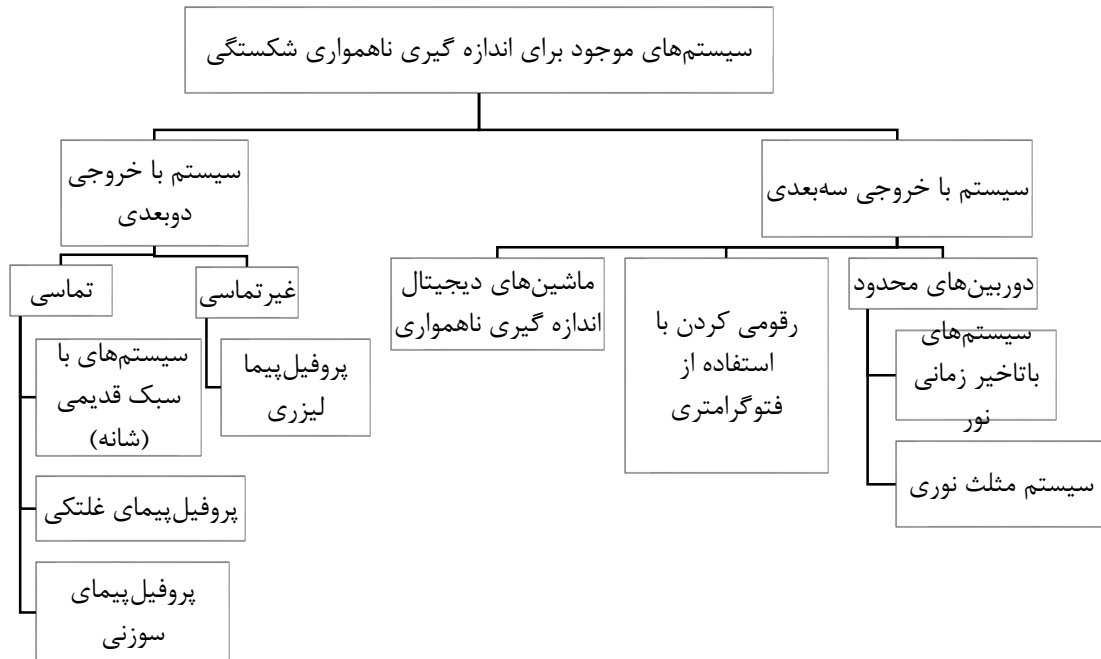
#### ۳.۲.۱ زبری سطح ناپیوستگی

ناهمواری سطح ناپیوستگی را زبری می‌نامند و تاکنون روش‌های گوناگون برای اندازه‌گیری آن ارایه شده است، که این روش‌ها در شکل ۲-۲ توسط شریف‌زاده و سیرائی (۱۳۹۱) دسته‌بندی شده است. هر یک از روش‌های اشاره شده در شکل ۲-۲ دارای مزایا و معایب مخصوص به خود هستند که با توجه به دقت مطالعه موردنظر و امکانات در دسترس از آن استفاده می‌شود.

پس از برداشت هندسه سطوح شکستگی باید زبری این سطوح کمی‌سازی شود که تاکنون روش‌های گوناگونی، از جمله روش‌های تجربی (Barton and Choubey, 1977)، آماری (Myers, 1962) و



فرکتال (Ge et al., 2014) به این منظور ارایه شده است. توصیف رفتاری هر یک از این روش‌ها در ادامه آمده است:



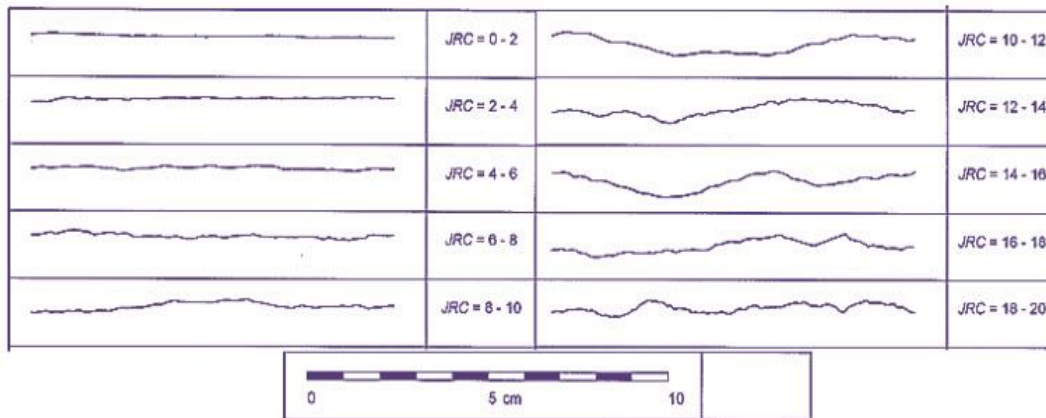
شکل ۲-۲: روش‌های مختلف اندازه‌گیری زبری سطح درزه (شریف‌زاده و سیرائی ۱۳۹۱)

#### (الف) شاخص ضریب زبری درزه JRC

شاخص ضریب زبری درزه سنگ (JRC) شاید پرکاربردترین معیار برای کمی‌سازی زبری سطح شکستگی سنگ در فعالیت‌های مهندسی باشد که بر پایه مطالعه آزمایشگاهی بارتن (۱۹۷۳)، به صورت رابطه (۱-۲) تعریف شده است. JRC مقدار ناهمواری و موج ذاتی ناپیوستگی نسبت به صفحه میانگین آن را بیان می‌کند.

$$JRC = \frac{\tan^{-1} \left[ \left( \frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \varphi_b \right]}{\log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right)} \quad (1-2)$$

بارتن و چوبی<sup>۱</sup> (۱۹۷۷) به منظور پیش‌بینی مقاومت برشی با استفاده از مقدار تخمینی JRC، ۱۰ شاخص استاندارد برای سطح مقطع شکستگی با JRC در محدوده ۰ تا ۲۰ معرفی کردند (شکل ۲-۳). این مقاطع به‌عنوان بخشی از روش استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ<sup>۲</sup> (ISRM) در سال ۱۹۷۸ برای توصیف کمی‌زبری ناپیوستگی بکار گرفته شد (Barton and Choubey, 1977).



شکل ۲-۳: پروفیل‌های استاندارد اندازه‌گیری JRC شکستگی (Barton and Choubey, 1977)

روند کمی‌سازی در این روش به این گونه است که با مقایسه پروفیل شکستگی با پروفیل‌های استاندارد تدوین شده، مقدار زبری شکستگی برآورد می‌شود. وجود روند کیفی مبتنی بر قیاس در این روش، ابهاماتی در خصوص کیفی بودن شاخص (JRC) را مطرح می‌کند.

(ب) بیان آماری

از پارامترهای آماری مختلفی نظیر مقدار میانگین خط مرکزی<sup>۳</sup> (CLA) ریشه مجذور میانگین<sup>۴</sup> (RMS)، ریشه میانگین مربع مشتق اول ( $Z_2$ )، ریشه میانگین مربع مشتق دوم ( $Z_3$ ) و غیره توابع آماری

1- Barton and Choubey

2- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

3- Centre Line Average asperity height

4- Root Mean Square

نظیر تابع همبستگی<sup>۱</sup> (ACF) و تابع ساختاری<sup>۲</sup> (SF)، تابع چگالی طیفی<sup>۳</sup> (SDF) و غیره برای تخمین و کمی‌سازی زبری پروفیل و یا سطح ناپیوستگی استفاده شده است (Ge et al., 2014).

پژوهشگران به منظور افزایش دقت و کم کردن میزان تاثیر نظر شخص تخمین‌زننده JRC، روابط نظیر (۲-۲)، (۳-۲) و (۴-۲) برای تعیین شاخص زبری JRC از روی پارامترهای آماری ارایه کرده‌اند.

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2) \quad (2-2) \quad (\text{Tse and Cruden, 1979})$$

$$JRC = 37.28 + 16.58 \log(SF) \quad (3-2) \quad (\text{Tse and Cruden, 1979})$$

$$JRC = 3.38 \times 10^{-2} + 1.07 \times 10^{-3} / \ln(Rp) \quad (4-2) \quad (\text{Tatone and Grasselli, 2010})$$

در این روابط  $Z_2$  ریشه میانگین مربع مشتق اول، SF تابع ساختاری و  $Rp^4$  شاخص زبری شکستگی است. هرچند پارامترهای و توابع آماری به توسعه سریع کمی‌سازی مقدار زبری شکستگی کمک کرده است، ولی این شاخص‌های وابسته به مقیاس اندازه‌گیری هستند. این ویژگی برای اندازه‌گیری زبری مطلوب نیست و به همین دلیل پژوهشگران به دنبال استفاده از روش‌های دیگر هستند که دارای استقلال از مقیاس برای کمی‌سازی زبری شکستگی سنگ باشد (Lee et al., 1990).

### (ج) تحلیل فرکتال

در دهه ۱۹۹۰ میلادی بعد فرکتال به عنوان یک رویکرد نوین برای توصیف زبری ناپیوستگی به کار گرفته شد. در استفاده از این رویکرد، مفاهیم هندسه فرکتال، بعد فرکتال و خود متشابهی به عنوان

---

1- Auto-Correlated Function  
2- Structure Function  
3- Spectral Density Function  
4- Roughness profile index

مبنای فرموله کردن پایه آماری هندسه شکستگی به کار می‌روند. از این مفاهیم در مدل‌های کاربردی به‌منظور کمی کردن زبری شکستگی سنگ استفاده می‌شود (قزوینیان و همکاران، ۱۳۹۳).

بعد فرکتال واحد سنجش خصوصیات هندسه فرکتال است، که توسط مندلبورت<sup>۱</sup> (۱۹۷۶) بر پایه ابعاد فرکتال در ریاضی و فیزیک به وجود آمده است. هندسه فرکتال می‌تواند به دو صورت خود مستوی<sup>۲</sup> و خود متشابه<sup>۳</sup> باشد. فرکتال خود متشابه یک مشخصه هندسی است که خصوصیات آماری خود را در تمام جهات با بزرگ‌نمایی‌های یکسان تصویر، حفظ می‌کند. فرکتال به صورت آماری خود مستوی است در صورتی که به شکل متفاوت در جهات متفاوت بزرگ شود (شاه کرمی؛ ۱۳۸۱).

از زمان پیدایش نظریه فرکتال تاکنون روش‌های متعددی نظیر جدایش مکعبات، سطح فزاینده پوششی، روش واریوگرام و غیره به منظور تخمین بعد فرکتال سطوح شکستگی پیشنهاد شده است. این روش‌ها در عین سادگی پیچیدگی‌های و دشواری‌های مربوط به خود را دارند.

## ۲.۳.۲ بازشدگی

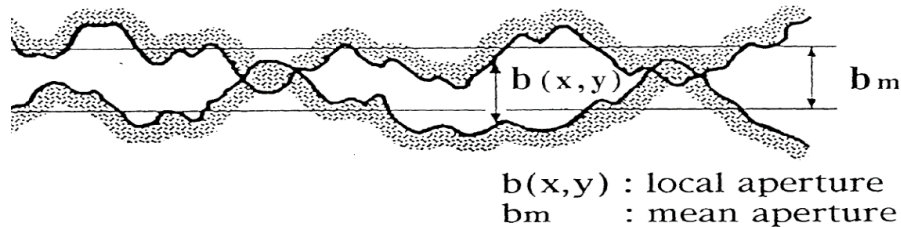
در پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده‌اند سه تعریف بازشدگی هندسی، بازشدگی مکانیکی و بازشدگی هیدرولیکی به چشم می‌خورد. شکستگی از دو صفحه زبر موازی تشکیل شده است. بازشدگی هندسی فاصله عمودی دو سطح روبروی شکستگی است. با فرض این که برای هر یک از سطوح زبر شکستگی یک صفحه میانگین موازی خودش تعریف شود، فاصله عمودی این دو صفحه میانگین بازشدگی مکانیکی نامیده می‌شود. بازشدگی هیدرولیکی به صورت نسبت فضای تهی هادی جریان سیال بر مساحت ظاهری شکستگی تعریف می‌شود. به دلیل تغییرات زبری سطح و اثر مقیاس میزان بازشدگی ثابت نیست و

1- Mandelbrot

2- Self-affine

3- Self-similarity

به صورت تابعی از محل است. بنابراین بازشدگی میانگین و بازشدگی منطقه‌ای (مطابق شکل ۴-۲) در مقیاس و کاربردهای مختلف استفاده می‌شود (Jing and Stephansson, 2007).



شکل ۴-۲: تعریف بازشدگی منطقه‌ای و متوسط (Iwano 1995)

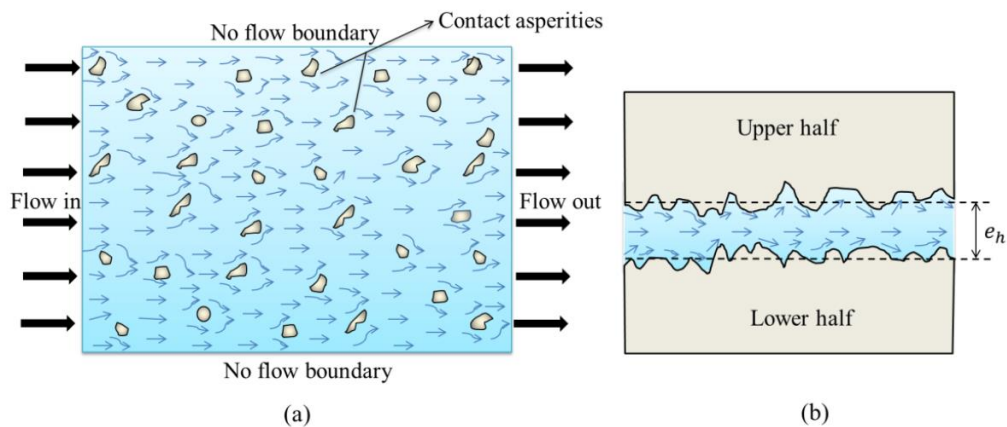
مشاهدات آزمایشگاهی بارتن (۱۹۸۵) و کوک<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) نشان داده است که بازشدگی هیدرولیکی (e) از بازشدگی مکانیکی (E) کوچک‌تر است که این اختلاف در ناپیوستگی‌های زیرتر بیشتر می‌شود. چگونگی رابطه بین بازشدگی مکانیکی و بازشدگی هیدرولیکی به صورت تجربی در طول شش دهه گذشته توسط محققین بسیاری نظیر لومیز<sup>۲</sup> (۱۹۵۱) لويس<sup>۳</sup> (۱۹۷۱) کوردوس<sup>۴</sup> (۱۹۸۲) السون و بارتن<sup>۵</sup> (۲۰۰۱) رسولی و حسینیان (۲۰۱۱) مطالعه شده است (Olsson and Barton, 2001; Rasouli and Hosseinian, 2011).

### ۳.۳.۲ سطح تماس

ناهمواری‌های موجود در سطح شکستگی طبیعی در برخی از نقاط با هم در تماس هستند. بسته به میزان تماس بین ناهمواری‌های دو سطح شکستگی، مسیر جریان پیچیده شده و مشابه شکل ۵-۲ خواهد شد. با توجه به این‌که در تحلیل‌های جریان سیال اغلب شکستگی به صورت دو سطح صاف

1- Cook  
 2- Lomize  
 3- Louis  
 4- Qudros  
 5- Olsson and Barton

موازی لحاظ می‌شود برای در نظر گرفتن این اثر در جریان سیال پژوهش‌هایی توسط برخی از محققین نظیر ویترسپون<sup>۱</sup> (۱۹۸۰)، سانگ<sup>۲</sup> (۱۹۸۴)، کوک (۱۹۹۰) و زیمرمن<sup>۳</sup> (۱۹۹۲) انجام شده است (Zimmerman et al., 1992; Petrovitch et al., 2010).



شکل ۲-۵: شماتیک نحوه حرکت سیال در داخل ناپیوستگی دارای سطح تماس (Zhang et al., 2014)

## ۴.۲ معادلات حاکم بر رفتار هیدرولیکی

در این قسمت رفتار هیدرولیکی شکستگی مرور می‌شود. به طور کلی روابط ارائه شده برای تحلیل هیدرولیکی در توده سنگ را می‌توان در دو مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی دسته‌بندی کرد. مدل‌های میکروسکوپی قادر هستند شرایط هیدرولیکی در هر نقطه از جریان سیال را بررسی کند. معادلات بسیاری نظیر ناویر-استوکس<sup>۴</sup>، معادله رینولدز<sup>۵</sup> و معادله استوکس، جزء این نوع مدل‌های ریاضی هستند. این معادلات برای شرایط و مفروضات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی قادر به توصیف

1- Witherspoon

2- Tsang

3- Zimmerman

4- Navier-Stokes

5- Reynolds Lubrication equation

جریان سیال در شکستگی در بیشتر شرایط هستند. معادله ناویر استوکس برای مایع نیوتنی تراکم پذیر به صورت رابطه (۵-۲) بیان می‌شود (Batchelor, 2000):

$$\square (u \cdot \nabla u)u = -\nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (5-2)$$

در این معادله  $u$  سرعت جریان سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $P$  فشار و  $\mu$  ویسکوزیته سیال است. عبارت سمت چپ نیروی اینرسی<sup>۱</sup> است؛ اولین عبارت در سمت راست رابطه نشان دهنده نیروی فشار است؛ عبارت دوم نیروی ویسکوز<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد. معادله ناویر استوکس همیشه باید با رابطه ای برای بقاء جرم تکمیل شود، که برای یک مایع غیر قابل تراکم به صورت رابطه (۶-۲) است.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (6-2)$$

عدد رینولدز عددی بدون بعد است که به صورت نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز همانند رابطه (۷-۲) تعریف می‌شود (Ranjith and Darlington, 2007). جریان سیال برای عدد رینولدز کوچک (۲۱۰۰) برای جریان در یک لوله) به صورت آرام و بر حالتی که عدد رینولدز بزرگ است (۴۰۰۰) برای جریان در یک لوله) به صورت مغشوش در نظر گرفته می‌شود. وقتی عدد رینولدز بسیار کوچک است ( $Re \ll 1$ )، نیروی اینرسی نسبت به نیروی ویسکوز ناچیز است. بنابراین، هنگام حل معادله ناویر-استوکس، نیروی اینرسی را می‌توان نادیده گرفته شود. عدد ماخ به عنوان معیاری جهت اندازه‌گیری تراکم جریان، نسبت سرعت مایع به سرعت صدا در آن مایع است. هنگامی که عدد ماخ  $M < 0.3$ ، جریان را می‌توان تراکم ناپذیر در نظر گرفت. در نتیجه،  $\rho$  چگالی سیال ثابت است و دیورژانس سرعت مایع برابر با صفر می‌شود بنابراین معادله ناویر-استوکس می‌تواند به صورت معادله (۸-۲) ساده گردد، که به عنوان قانون استوکس شناخته می‌شود. انتگرال گیری از معادله استوکس در امتداد جهت عرض شکستگی منجر

1- Inertial

2- Viscous force

به رابطه رینولدز یا قانون مکعب محلی می‌شود (Zimmerman and Yeo, 2000; Wang, Cardenas, et al., 2015)

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (7-2)$$

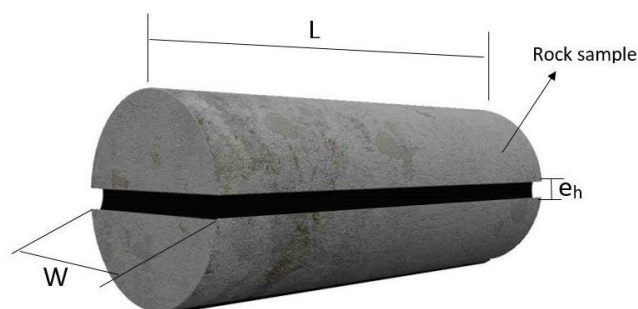
$$-\nabla P = \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (8-2)$$

معادلات کامل ناویر-استوکس اگرچه قادر است به خوبی رفتار جریان نیوتنی تراکم‌ناپذیر را شبیه‌سازی کند اما حل قسمت غیرخطی این معادلات بسیار پیچیده و زمان‌بر است (Javadi et al., 2010).

در سطح ماکروسکوپی تلاش بر این است تا رابطه ساده شده‌ای برای طراحی مهندسی و حل معادلات در حجم بالا ارایه گردد. قانون مکعب از مشهورترین معادلات ماکروسکوپی هیدرولیکی در محیط شکستگی سنگی و شکل ساده‌سازی شده‌ای از معادله‌های ناویر-استوکس برای تحلیل جریان آرام در شکستگی به صورت دو صفحه موازی و صاف (شکل ۶-۲) است (Witherspoon et al., 1980):

$$Q = -\frac{we_h^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (9-2)$$

در این رابطه  $Q$  نرخ جریان سیال،  $\Delta P$  اختلاف فشار در دو انتهای شکستگی،  $L$  طول و  $w$  عرض شکستگی،  $e$  بازشدگی هیدرولیکی شکستگی و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال است.



شکل ۶-۲: مدل صفحات موازی برای نمونه شکستگی



این معادله برای رفتار خطی جریان در شکستگی معتبر است اما برای توصیف جریان در حالت غیرخطی دو معادله ماکروسکوپی تجربی فورچهایمر<sup>۱</sup> و ایزباش<sup>۲</sup> ارائه شده است. در رابطه فورچهایمر از یک معادله درجه دوم خطی برای توصیف خصوصیات ماکروسکوپی جریان غیرخطی استفاده می‌شود که در رابطه (۱۰-۲) نشان داده شده است (Forchheimer, 1901):

$$-\nabla P = AQ + BQ^2 \quad (10-2)$$

$$A = \frac{\mu}{kA_h} \quad B = \frac{\beta}{A_h^2}$$

در این رابطه A مولفه خطی، B مولفه غیرخطی رابطه فورچهایمر است و  $\nabla P$  افت فشار را بر حسب Q نرخ جریان سیال نشان می‌دهد. k نفوذپذیری ذاتی است،  $A_h$  سطح مقطع شکستگی معادل ( $A_h = w.e_h$ ) و  $\beta$  ضریب غیر داریسی یا ضریب مقاومت اینرسی وابسته به هندسی شکستگی است (Cherubini et al., 2012; Zhou et al., 2016). براساس این معادله قانون فورچهایمر را می‌توان به صورت قانون اصلاحی داریسی در نظر گرفت که عبارت غیرخطی  $BQ^2$  به آن افزوده شده و چنانچه اثر غیرخطی جریان ناچیز باشد ( $B=0$ ) این رابطه به قانون داریسی تبدیل می‌شود (Bordier and Zimmer, 2000).

معادله ایزباش رابطه دیگری است که جریان غیرخطی را به صورت ماکروسکوپی مطابق رابطه توصیف می‌کند (Izbash, 1931):

$$-\nabla P = \lambda Q^m \quad (11-2)$$

که  $\lambda$  و m ضرایب تجربی و ثابتی هستند. در صورتی که  $m=1$  باشد، نشان دهنده جریان خطی و اگر  $m=2$  باشد، نشان دهنده جریان کاملاً مغشوش است. برای حالت گذر از جریان خطی به جریان کاملاً

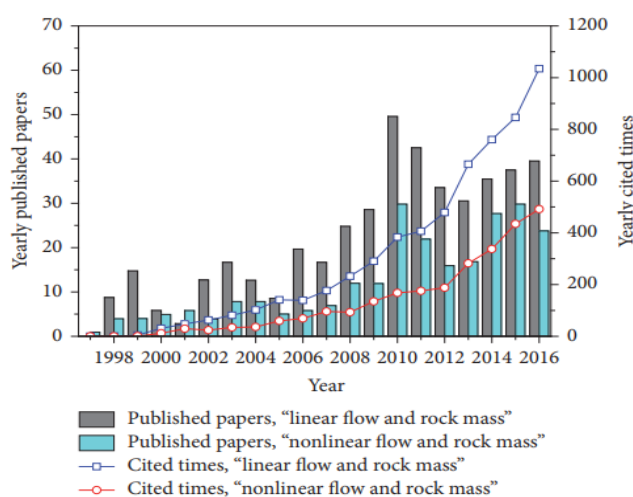
---

1- Forchheimer

2- Izbash

مغشوش m در محدوده بین ۱ تا ۲ قرار می‌گیرد (Moutsopoulos et al., 2009; Zhang and Nemcik, 2013a; Zoorabadi et al., 2015).

الگوی رفتار جریان سیال در شکستگی به معنی رابطه بین افت فشار و دبی جریان سیال در شکستگی است. با توجه به پیچیدگی‌های گسترده رفتار جریان سیال در شکستگی سنگ، این مهم توسط پژوهشگران بسیاری طی دهه‌های گذشته مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. شکل ۲-۷ تعداد مقالات چاپ و ارجاع شده در مجلات معتبر دنیا برای کلمات کلیدی "Linear flow and rock mass" و "Nonlinear flow and rock mass" برحسب سال و فراوانی برای یک دوره بیست ساله ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ از وب سایت Web of Science Core Collection را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷: مقالات چاپ شده و ارجاع داده شده با کلمات کلیدی "Linear flow and rock mass" و "Nonlinear flow and rock mass"

(Yu et al., 2017) برای یک دوره بیست ساله ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ (Yu et al., 2017)

براساس این شکل، پژوهش در خصوص رفتار هیدرولیکی در دهه گذشته رشد چشم‌گیری داشته است. معمولاً این الگوی رفتاری برای فعالیت‌های مهندسی به صورت خطی<sup>۱</sup> لحاظ می‌شود که با این فرض می‌توان از قانون مکعب (رابطه ۲-۹) برای توصیف جریان استفاده کرد. مطابق این رابطه،

1- Linear flow

آب‌گذری شکستگی با توان سوم بازشدگی شکستگی در ارتباط است. اعتبار این قانون و جریان خطی برای بررسی جریان سیال در شکستگی‌های سنگی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

لومیز<sup>۱</sup> (۱۹۵۱) با مدل‌سازی شکستگی توسط صفحه‌های شیشه‌ای، موازی قانون مکعب را برای جریان آرام<sup>۲</sup> معتبر شناخت مشخصاً مدل موازی ارایه شده توسط ایشان با شکستگی طبیعی که دارای سطوح زیر هستند بسیار متفاوت است. این پژوهشگر با معرفی یک ضریب تصحیح  $f$ ؛ قانون مکعب را برای شکستگی‌های زیر باز به صورت زیر تصحیح نمود:

$$Q = -\frac{we^3}{12\mu f} \nabla P \quad (12-2)$$

در این رابطه  $w$  عرض شکستگی،  $e$  بازشدگی هیدرولیکی،  $f$  ضریب تصحیح،  $Q$  نرخ جریان و  $\nabla P$  گرادیان فشار است.

ویترسپون و همکاران (۱۹۸۰) اعتبار قانون مکعب را برای درزه سنگ طبیعی زیر با نقاط تماس پراکنده مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقدار  $f$  در محدود بین  $1/04$  تا  $1/65$  قرار می‌گیرد (Witherspoon et al., 1980).

سانگ و ویترسپون در ۱۹۸۱ نشان دادند که فقط در تنش‌های پایین در شرایطی که شکستگی باز بوده و عدم وجود تماس بین دو سطح شکستگی، می‌توان قانون مکعب را مورد استفاده قرار داد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که وقتی سطح تماس بیش از ۳۱ درصد باشد، جریان واقعی ۲ تا ۳ برابر کوچک‌تر از جریان تخمین زده شده با قانون مکعب خواهد بود (Tsang and Witherspoon, 1981).

گیل در ۱۹۸۲ به این نتیجه رسید که قانون مکعب برای شکستگی‌های مصنوعی در تنش‌های عمودی بالاتر از ۲۱ مگاپاسکال و برای شکستگی‌های طبیعی در تنش‌های پایین‌تر اعتباری ندارد. علاوه

1- Lomize

2- Laminar flow

بر این مسیر جریان در درزه‌های زبر را به صورت مارپیچ فرض کرد که این فرض با قانون مکعب در تضاد است.

سانگ در ۱۹۸۴ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به این نتیجه رسید که مقدار جریان محاسبه شده از قانون مکعب خطای بسیار زیادی نسبت به جریان واقعی عبوری از یک درز دارد (Tsang, 1984). ریون و گیل<sup>۱</sup> در ۱۹۸۵ نشان دادند که قانون مکعب برای محاسبه نرخ جریان از شکستگی‌های شکل‌پذیر معتبر نیست، زیرا که تماس دو دیوار شکستگی تغییرات زیادی در جریان به وجود می‌آورد. در تحقیقات آنها بر خلاف قانون مکعب، نرخ جریان با توان بالاتر از توان ۳ با دهانه بازشدگی شکستگی ارتباط پیدا می‌کند (Raven and Gale, 1985).

از منظر محاسبات عددی، فرض بر آن است که قانون مکعب که به صورت محلی معتبر است. از این‌رو در نرم افزارهای عددی برای پیش‌بینی رفتار هیدرومکانیکی از آن استفاده می‌شود. اورون و برکوویتز<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) با حل معادلات ناویر استوکس، اعتبار قانون مکعب محلی را در شکستگی‌های مورد مطالعه بررسی و به این نتیجه رسیدند که با کاهش بازشدگی شکستگی، هدایت هیدرولیکی با سرعت بیشتری از آنچه که توسط قانون مکعب توصیف شده کاهش می‌یابد. بنابراین، زبری شکستگی و نقاط تماس جداگانه در معادلات جریان نقش مهمی دارند (Oron and Berkowitz, 1998). در ادامه الگوی رفتاری جریان سیال تشریح می‌شود.

چنانچه رابطه بین افت فشار و نرخ جریان سیال در شکستگی‌های سنگی به صورت خطی نباشد، به این الگوی رفتاری جریان غیرخطی اطلاق می‌شود. این الگوی رفتاری در ابتدا به جریان مغشوش<sup>۳</sup> سیال نسبت داده شد. اما این مساله که جریان مغشوش سیال عامل ایجاد جریان غیرخطی است مورد تایید

1 - Raven and Gale

2- Oron and Berkowitz

3- Turbulent flow

برخی از محققین نبود زیرا معتقدند که سرعت جریان سیال کمتر از حدی است که جریان مغشوش شود (Panfilov and Fourar, 2006).

برای جریان سیال در محیط متخلخل حسنی زاده و گری<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) افزایش نیروهای چسبندگی در مقیاس میکروسکوپی را به عنوان منشأ غیرخطی بودن جریان معرفی کردند (Hassanizadeh and Gray, 1987).

زیمرمن و بدوارسون<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) رفتار جریان سیال در شکستگی‌های سنگی را بررسی نمودند و دریافتند که جریان غیرخطی نه تنها به عدد رینولدز بستگی دارد بلکه به زبری شکستگی نیز مرتبط بوده و لزوماً در عدد رینولدز بالا رخ نمی‌دهد (Zimmerman and Bodvarsson 1996). بر اساس شبیه سازی<sup>۳</sup> CFD، پانفی洛夫<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۳) نتیجه گرفتند که جریان غیرخطی می‌تواند با یک اثر متقابل ویسکوز-اینرسی<sup>۵</sup> در عدد رینولدز پایین ایجاد شود (Panfilov et al., 2003). همچنین پانفی洛夫 و فورار (۲۰۰۶) دریافتند که نیروهای اثر متقابل ویسکوز-اینرسی که به عنوان منشأ اصلی جریان غیرخطی در رژیم ضعیف اینرسی در مسیرهای جریان متناوب هستند، در کانال‌های جریان غیر متناوب ناپدید می‌شوند (Panfilov and Fourar, 2006). جوادی و همکاران (۲۰۱۰) با شبیه‌سازی جریان سیال در شکستگی سنگی نتیجه گرفتند که جریان غیرخطی علاوه بر عدد رینولدز، به هندسه شکستگی هم مرتبط است (Javadi et al., 2010).

همان‌طور که توضیح داده شد برای توصیف رفتار غیرخطی جریان از دو معادله ایزباش و فورچه‌میر استفاده می‌شود. نوآموز و همکاران (۲۰۰۹) به صورت آزمایشگاهی مشاهده کردند که معادله فورچه‌میر

---

1- Gray

2- Bodvarsson

3- Computational fluid dynamics

4- Panfilov

5- Inertia-viscous cross effect

رفتار غیرخطی جریان را وقتی که دبی جریان بیشتر از  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$  باشد خوب توصیف می‌کند (Nowamooz et al., 2009). بر مبنای شبیه‌سازی CFD و مطالعات آزمایشگاهی، زیمرمن و همکاران (۲۰۰۴) یافتند که یک رژیم اینرسی ضعیف برای اعداد رینولدز در محدود ۱ تا ۱۰ وجود دارد که رابطه (۱۳-۲) این پدیده را نشان می‌دهد (Zimmerman et al., 2004).

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\mu Q}{T_0 W} + aQ^3 \quad (13-2)$$

همچنین مشاهده نمودند که برای اعداد رینولدز بالاتر، معادله فورچهمیر با نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی مطابقت مناسبی دارد.

رنجیت و دارلینگتن<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) به صورت آزمایشگاهی رژیم جریان غیرخطی در شکستگی سنگ گرانیت تحت تنش جانبی (۳-۰/۵ مگا پاسکال) مطالعه کرده و نتیجه گیری نمودند که معادله فورچهمیر برای جریان آب به صورت یک فاز تنها در تنش‌های محصورکننده صفر، ۰/۵۵، ۱ و ۲ مگاپاسکال با نتایج آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار است، در تنش‌های محصورکننده بالاتر معادله فورچهمیر توصیف خوبی برای جریان غیرخطی را ارائه نمی‌کند (Ranjith and Darlington, 2007). مشابه این نتایج توسط ژانگ و نیچیک<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) گرفته شده است. ایشان آزمایش‌های هیدرومکانیکی برای شکستگی مصنوعی (ایجاد شده با استفاده از تنش کششی) در ماسه سنگ تحت تنش جانبی ۱ تا ۳/۵ مگاپاسکال انجام را داده و نتیجه گرفتند که رابطه‌های فورچهمیر و ایزباش به خوبی رفتار غیرخطی جریان سیال را توصیف می‌کند (Zhang and Nemcik, 2013a).

ژو و همکاران (۲۰۱۶) با انجام آزمایش هیدرومکانیکی برای شکستگی در ماسه سنگ و گرانیت تحت تنش ۱ تا ۳۰ مگاپاسکال نتیجه گرفتند که معادله فورچهمیر رفتار غیرخطی را در تنش‌های

1- Darlington

2- Zhang and Nemcik

محصورکننده کم را به خوبی توصیف می‌نماید ولی در مقادیر تنش‌های جانبی بالا رفتار الگوی رفتار غیرخطی جریان متفاوت است (Zhou et al., 2015).

## ۵.۲ عدد رینولدز بحرانی

در اکثر فعالیت‌های مهندسی سنگ به دلیل سرعت بسیار پایین جریان سیال در محیط‌های سنگی فرض بر این است که جریان سیال در محدوده خطی رفتار کرده و می‌توان با تقریب از قانون مکعب استفاده نمود. ولی برای تعیین و ارزیابی الگوی رفتار جریان سیال نیاز به یک معیار است. در مکانیک سیالات از عدد رینولدز برای قضاوت الگوی جریان به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. عدد رینولدز مطابق رابطه (۱۴-۲) تعریف می‌شود (White, 2003):

$$Re = \frac{\rho u e}{\mu} \quad (14-2)$$

در این رابطه  $Re$  عدد رینولدز،  $\rho$  وزن مخصوص سیال،  $u$  سرعت سیال،  $e$  بازشدگی هیدرولیکی و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال است. برای مطالعه عدد رینولدز در شکستگی سنگ، با توجه دشواری محاسبه سرعت و بازشدگی شکستگی، عدد رینولدز به‌صورت رابطه (۱۵-۲) بازنویسی می‌شود (Ranjith and Darlington, 2007):

$$Re = \frac{\rho Q}{\mu w} \quad (15-2)$$

در این رابطه  $Q$  نرخ جریان سیال و  $w$  عرض شکستگی است. تاکنون در مراجع مختلف، محدوده وسیعی از اعداد رینولدز به منظور تمایز بین رفتار خطی و غیرخطی (حالت گذرا و جریان مغشوش) جریان سیال به عنوان عدد رینولدز بحرانی ( $Re_c$ ) تعریف شده است که در جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از نتایج نشان داده شده است.

جدول ۱-۲: مروری بر اعداد رینولدز بحرانی ارایه شده در مطالعات انجام شده تاکنون

مؤلف	روش	بازشدگی ( $\mu\text{m}$ )	Re	Rec	توضیحات
(Louis, 1969)	آزمایشگاهی - دو صفحه موازی زبر مصنوعی		$\frac{2\rho ve}{\mu}$	۵۰۰	انحراف از رفتار خطی در کمتر از ۵۰۰ رخ می‌دهد.
(Witherspoon et al., 1980)	آزمایشگاهی - شکستگی کششی	۴-۲۵۰	$\frac{2\rho ve}{\mu}$	۱۰۰	اعتبار قانون مکعب برای $Re=100$ معتبر است.
(Zimmerman and Bodvarsson, 1996a)	روش تحلیلی - شکستگی با دیواره سینوسی		$\frac{\rho ve}{\mu}$	۱-۲۵	$Re=1$ یک معیار محافظه کارانه برای معادله روانکاری. اثرات غیرخطی از $Re > 25$ قابل ملاحظه است.
(Skjetne et al., 1999)	روش عددی - کانال دو بعدی		$\frac{\rho ve}{\mu}$	۷	۱۰٪ انحراف از حالت خطی وقتی $Re$ به حدود ۷ می‌رسد.
(Zimmerman and Yeo, 2000)	روش عددی - شکستگی با دیواره سینوسی		$\frac{\rho ve}{\mu}$	۱۰	$Re=1$ نشانه شروع جریان غیرخطی است.
(Brush and Thomson, 2003)	روش عددی - شکستگی سه بعدی	۲۵۰- ۱۰۰۰	$\frac{\rho Q}{\mu W}$	$Re < 1$	هنگامی که معیارهای سینماتیکی برآورده می‌شود، تاثیر نیروهای اینرسی کوچک است.
(Zimmerman et al., 2004)	روش عددی - شکستگی سه بعدی	متوسط ۱۴۹=	$\frac{\rho Q}{\mu W}$	۲۰-۱	رژیم ضعیف اینرسی در عدد رینولدز ۱-۱۰ و فورچیمیر جریان در $Re < 20$ مشاهده شده است.
(Konzuk and Kueper, 2004)	روش عددی - شکستگی کششی سنگ آهک	متوسط=۳ ۸۱	$\frac{2\rho Q}{\mu(w+e)}$	۲/۸-۱۴/۳	رفتار غیرخطی بیش از حد قابل بخشی از این محدوده رخ می‌دهد.
(Qian et al., 2007)	دو صفحه موازی زبر مصنوعی	-۲۵۰۰ ۱۰۰۰	$\frac{\rho ve}{2\mu}$	۲۴۵-۷۵۹	این محدوده بقدری بالا است تا جریان کامل آشفته ایجاد شود.
(Chen et al., 2009)	آزمایشگاهی - دو صفحه موازی زبر مصنوعی	-۶۰۰۰ ۲۰۰۰	$\frac{2\rho ve}{\mu}$	۶۵۰-۷۰۰	انتقال به محدوده مغشوش در این محدوده از $Re$ شروع می‌شود.
(Quinn, Parker, et al., 2011)	آزمایش برج-توده سنگ دولومیت	۴۲-۳۱۳	$\frac{\rho ve}{\mu}$	۰/۴-۵/۷۶	با فرض قرارگیری یک شکستگی در هر مرحله از آزمایش
(Ranjith and Viete, 2011)	آزمایشگاهی - شکستگی کششی گرانیت	-۲/۶۹ ۰/۷۳	$\frac{\rho Q}{\mu W}$	۳/۵-۴	نوع سیال گاز است و $Re < 4$ برای کمترین تنش جانبی و $Re < 3.5$ برای بیشترین تنش جانبی است.
(Zhang and Nemcik, 2013a)	آزمایشگاهی - شکستگی کششی ماسه سنگ	۱۸/۹۵	$\frac{\rho Q}{\mu W}$	۳/۵-۲۴/۸	$Re_c$ با تغییر تنش جانبی از ۱ MPa به ۳/۵MPa رینولدز بحرانی در محدوده ۳/۵ تا ۲۴/۸ تغییر می‌کند
(Javadi et al., 2014)	آزمایشگاهی - شکستگی کششی گرانیت		$\frac{\rho Q}{\mu W}$	-۰/۰۰۱ ۲۵	با افزایش جابجایی برشی از ۰ به ۲۰ میلی‌متر $Re_c$ از ۰/۰۰۱ به ۲۵ افزایش می‌یابد
(Chen et al. 2015)	آزمایش‌های برج-سنگ‌های رسوبی		$\frac{\rho Q}{\mu W}$	۲۵-۶۶	شکستگی‌ها در هر قسمت آزمایش موازی هستند

با توجه به معیارهای متنوع انتقال رژیم جریان، تعاریف متفاوت از عدد  $Re$  و هندسه‌های شکستگی

مختلف، برای عدد رینولدز بحرانی محدوده گسترده‌ای بین ۰/۰۰۱ تا ۲۳۰۰۰ گزارش شده (جدول ۱-۲)



و موجب پیچیدگی موضوع گردیده است. برای غلبه بر این موضوع و کمی‌سازی تاثیر جریان غیرخطی بر جریان سیال، زنگ و گریگ<sup>۱</sup> پارامتری با عنوان تاثیر بخش غیرخطی مطابق رابطه (۲-۱۶) معرفی کرده‌اند (Zeng and Grigg 2006).

$$\alpha = \frac{bQ^2}{\nabla P} \quad (۲-۱۶)$$

در این رابطه  $bQ^2$  بخش غیرخطی رابطه فورچهمیر بوده و در واقع  $\alpha$  نسبت افت فشار به وجود آمده توسط بخش غیرخطی به افت فشار کل است. در فعالیت‌های مهندسی اگر اثر غیرخطی بیش از ۱۰ درصد از افت فشار کلی باشد قابل چشم پوشی نیست (Zimmerman et al., 2004; Zeng and Grigg, 2006).

جوادی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از رابطه فورچهمیر و رابطه (۲-۱۶) رابطه زیر را برای تعیین عدد رینولدز بحرانی آرایه کرده‌اند:

$$Re_c = \frac{A\rho\alpha}{B\mu w(1-\alpha)} \quad (۲-۱۷)$$

این رابطه یک معیار ساده و صریح برای اندازه‌گیری عدد رینولدز بحرانی برای شروع جریان غیرخطی در شکستگی سنگی را نشان می‌دهد.

## ۲.۶ مکانیسم افت فشار در جریان سیال در داخل شکستگی سنگی

فرآیند افت فشار در مطالعه جریان سیال داخل ناپیوستگی سنگی، در دو دسته طبقه‌بندی می‌شود (Zhang and Nemcik 2013):

(الف) افت فشار به علت برهم‌کنش آب - شکستگی در طول مسیر جریان؛

1- Zeng and Grigg

(ب) افت فشار به علت تغییر ناگهانی در مسیر جریان؛

زمانی که آب در داخل شکستگی سنگی جریان می‌یابد، انرژی جریان با مقاومت‌های موجود در مسیر مستهلک می‌شود. ضریب اصطکاک به عنوان پارامتری که افت فشار جریان سیال را مشخص می‌کند، با استفاده از اصل بقا جرم و مومنتم محاسبه می‌شود. این پارامتر توسط رابطه مشهور داریسی-ویسبیچ<sup>۱</sup> مطابق رابطه (۱۸-۲) قابل محاسبه است (White, 2003):

$$\nabla P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \quad (18-2)$$

که در اینجا  $\nabla P$  افت فشار (یا گرادیان فشار)  $f$  ضریب اصطکاک،  $L$  طول مسیر جریان،  $\rho$  چگالی سیال،  $v$  سرعت سیال و  $D_h$  قطر هیدرولیکی است.

با فرض برقرار بودن جریان خطی و درستی قانون مکعب، مقدار ضریب اصطکاک برای شکستگی با دو صفحه موازی از رابطه (۱۹-۲) به دست می‌آید (Zhang and Nemcik, 2013b):

$$f = \frac{96}{Re} \quad (19-2)$$

که عدد رینولدز  $(Re = D_h \rho u_m / \mu = \rho Q / \mu w)$ ، توصیف نسبت نیروی‌های اینرسی به نیروهای ویسکوز سیال است. این معادله برای حالتی که فاصله دو صفحه نسبت به طول صفحه خیلی کوچک باشد معتبر است. این معادله به دلیل سادگی و کاربرد آسان، برای توصیف افت فشار جریان در شکستگی استفاده می‌شود. هرچند تفاوت‌های بین جریان در دو صفحه موازی با جریان در شکستگی سنگی وجود دارد.

نذری‌دوست و همکاران (۲۰۰۶) به صورت عددی ضریب اصطکاک برای جریان سیال در داخل شکستگی سنگی را برای حالتی که عدد رینولدز کمتر از ۱۰ باشد مدل کرده‌اند. در شبیه‌سازی CFD

1- Darcy-Weisbach

دامنه جریان شامل صفحات موازی بوده و با انجام برآزش آماری بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده، رابطه (۲۰-۲) توسط ایشان ارائه شده است (Nazridoust et al., 2006):

$$f = \frac{123}{\text{Re}} (1 + 0.12\text{Re}^{0.687}) \quad \text{Re} \leq 10 \quad (20-2)$$

لازم به ذکر است که در این مطالعات تاثیر زبری‌های مختلف شکستگی سنگ لحاظ نشده است.

کراندال و همکاران (۲۰۱۰) مدل ارائه شده توسط نذری‌دوست و همکاران (۲۰۰۶) را برای ماده سنگی با نفوذپذیری  $k$  بسط داده و رابطه (۲۱-۲) را ارائه کردند (Crandall et al., 2010):

$$f = \frac{123}{\text{Re}} \left( \frac{1 + 0.12\text{Re}^{0.687}}{1 + 61.5(1 + \theta)(1 + 0.12\text{Re}^{0.687})kh_m/\bar{H}^3} \right) \quad (21-2)$$

در این رابطه  $\theta$  ضریب پیچ خم داری<sup>۱</sup> مسیر جریان،  $H$  بازشدگی موثر و  $k$  نفوذپذیری ماده سنگ است.

ژانگ و نیچیک (۲۰۱۳) پارامتر زبری نسبی را به صورت نسبت ارتفاع حداکثری ناهمواری ( $\xi$ ) به بازشدگی هیدرولیکی ( $e_h$ ) تعریف کردند و بر مبنای نتایج آزمایش هیدرومکانیکی بر روی نمونه سنگ رابطه (۲۲-۲) را برای ضریب اصطکاک پیشنهاد دادند (Zhang and Nemcik 2013):

$$f = \frac{96}{\text{Re}} [1 + 9.57115 \times 10^{-4} \left(\frac{\xi}{e_h}\right)^{1.1172}] \quad \text{Re} < 10 \quad (22-2)$$

در این رابطه ( $\xi$ ) ارتفاع حداکثر ناهمواری سطح شکستگی و  $e_h$  بازشدگی هیدرولیکی است.

ژو و همکاران (۲۰۱۶) با لحاظ نمودن تاثیر زبری شکستگی و الگوهای جریان، مدل دیگری برای ضریب اصطکاک مطابق رابطه (۲۳-۲) پیشنهاد دادند (Zhou et al., 2016):

1- Tortuosity factor

$$f = \frac{96}{Re} + 4a \times \left( \frac{\xi}{2e_h} \right)^b \quad (23-2)$$

که در این رابطه  $a$  و  $b$  ضرایب بدون بعد هستند.

## ۷.۲ رفتار توامان هیدرومکانیک با تنش نرمال

از آنجا که این پژوهش بر رفتار هیدرومکانیکی شکستگی‌های سنگی تحت تنش جانبی، در این بخش مطالعات انجام شده تحت این شرایط بارگذاری آورده شده است. تنش برجا به صورت مستقیم بر مقدار بازشدگی ناپیوستگی و بالتبع بر خصوصیات جریان تاثیر داشته و از سوی دیگر فشار منفذی در برابر بسته شدن عمودی ناپیوستگی مقاومت می‌کند (Roman, 2012).

مطالعات آزمایشگاهی متعددی در رابطه با رفتار توامان هیدرومکانیک با تنش عمودی توسط محققین بسیاری نظیر گانگی<sup>۱</sup> (۱۹۷۸)، ویترسپون و سانگ (۱۹۸۱)، بارتن و همکاران (۱۹۸۵)، لی و چو<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، کاپا<sup>۳</sup> (۲۰۰۵)، زو<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) انجام شده است.

به منظور بررسی تغییرات نفوذپذیری ماسه سنگ تحت فشار موثر محصورکننده در مقیاس آزمایشگاهی، مدل فیزیکی موسوم به مدل ناهمواری‌های میله‌ای شکل<sup>۵</sup> توسط گانگی (۱۹۷۸) ارائه شده و رابطه (۲۴-۲) با استفاده از این مدل برای تخمین تغییرات نفوذپذیری با تنش عمودی ارائه گردیده است (Iwano, 1995).

$$K(P) = K_0 \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_1} \right)^m \right]^3 \quad (24-2)$$

1- Gangi

2- Lee and Cho

3- Cappa

4- Zou

5- Beed of nail

که در این رابطه  $K_0$  نفوذپذیری در فشار محصورکننده صفر و  $P$  فشار موثر محصورکننده (معادل با اختلاف بین فشار محصورکننده با فشار منفذی)،  $P_1$  مدول موثری از ناهمواری‌های سطح ناپیوستگی و  $m$  عددی ثابت بین صفر تا یک است که با توزیع ناهمواری‌ها مرتبط است (Iwano, 1995). در این مدل، بسته شدن درزه ناشی از تغییر شکل الاستیک ناهمواری‌ها و رفتار نرم‌شوندگی درزه تحت تاثیر تماس دو سطح درزه در نظر گرفته شده است.

با استناد به آزمایش‌ها انجام شده توسط اوای<sup>۱</sup> (۱۹۷۶)، مدل فیزیکی دیگری به منظور اصلاح مدل ناهمواری‌های میخ شکل توسط ویترسپون و سانگ (۱۹۸۱) ارائه شده است. در این مدل، بازشدگی ناپیوستگی به صورت مجموعه‌ای از حفرات بین ناهمواری‌های در تماس باهم نشان داده می‌شود که تغییرشکل تحت تنش عمودی به خاطر تغییر شکل این حفرات است. یک بیان برای نسبت بین مدول موثر سنگ به همراه حفره و مدول ذاتی ماده سنگ به صورت عبارتی از طول میانگین حفرات  $I$  به شکل  $d$  تعریف شده است. نسبت مدول موثر بر مدول ذاتی به نسبت  $I/d$  تغییر می‌شود. بنابراین از نمودار تنش-جابجایی برای نمونه سنگ دارای یک شکستگی برای محاسبه مقادیر  $d$  و تعداد نقاط در تماس  $Nc$  و متعاقباً به وسیله دیفرانسیل عددی توزیع بلندی ناهمواری‌ها  $n(h)$  می‌توان استفاده کرد. پس از تعیین خصوصیات زبری، میانگین آماری بازشدگی  $\langle e \rangle$  به صورت تابعی از تغییر شکل عمودی و تنش موثر مطابق رابطه (۲-۲۵) محاسبه می‌گردد.

$$\langle e^3(\Delta u_n, \sigma'_n) \rangle = \frac{\int (e_0 - \Delta u_n - h)^3 n(h) dh}{\int n(h) dh} \quad (2-25)$$

در این رابطه  $e_0$  بیشترین بازشدگی شکستگی است. مقدار آب‌گذری شکستگی، با جایگذاری  $\langle e^3 \rangle$  به جای بازشدگی در قانون مکعب محاسبه می‌شود. این مدل با نتایج آزمایشگاهی اوای (۱۹۷۶) برای شکستگی کششی در سنگ بازالت با سطح تماس ۱۰ تا ۲۰ درصد توافق خوبی دارد. هرچند این مدل

---

1- Iwai

با نتایج آزمایشگاهی گالی و همکاران (۱۹۹۳) همخوانی ضعیفی دارد (Tsang and Witherspoon, 1981).

با فرض اعتبار قانون مکعب برای ناپیوستگی با دهانه بازشدگی  $\mu 4m$  تا  $\mu 250m$ ، بارتن به‌طور تجربی نفوذپذیری درزه سنگ را برحسب عباراتی از بازشدگی مکانیکی و JRC برابر رابطه (۲۶-۲) بیان نمود (Barton et al., 1985):

$$K = \frac{e^2}{12} \quad (26-2)$$

که در این رابطه بازشدگی هیدرولیکی به‌وسیله معادل‌سازی جریان بین دو صفحه موازی صاف از رابطه (۲۷-۲) محاسبه می‌شود (Barton et al., 1985):

$$e = \frac{JRC^{2.5}}{(E/e)^2} \quad (27-2)$$

بازشدگی مکانیکی (E) و هیدرولیکی (e) به‌صورت میکرومتر هستند. شرط اعتبار این رابطه این است که بازشدگی مکانیکی از بازشدگی هیدرولیکی بزرگ‌تر باشد. در این مطالعه از مدل هذلولی بندیس<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۸۳) برای توصیف رفتار بسته شدن نرمال ناپیوستگی استفاده شده است (Barton et al., 1985).

مطالعه ارتباط رفتار توامان هیدرومکانیکی درزه سنگ با تنش عمودی توسط لی و چو (۲۰۰۲) برای سنگ گرانیت و سنگ مرمر انجام شده است. در این مطالعه اختلاف زبری دو سطح درزه (زمانی که یک درصد مساحت دو سطح باهم در تماس هستند) به عنوان بازشدگی اولیه درزه در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج آزمایش با مدل‌های گانگی و سوان نشان می‌دهد که این مدل‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایش دارند (Lee and Cho, 2002). کاپا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۵) آزمایش جریان آب را در داخل شبکه ناپیوستگی به صورت برجا انجام دادند، که این شبکه ناپیوستگی شامل یک‌لایه با نفوذپذیری پایین و

1- Bandis

2- Cappa

یک گسل با نفوذپذیری بالا بود. این پژوهش نشان می‌دهد پاسخ هیدرومکانیکی یک ناپیوستگی تنها در داخل شبکه ناپیوستگی به نحو چشم‌گیری تحت تاثیر شرایط مرزی است. به نظر می‌رسد این رفتار با آنچه در مقیاس آزمایشگاهی مشاهده شده، متفاوت است (Cappa et al., 2006).

با استفاده از مکعب‌های فلزی توده‌سنگ با سه دسته‌درزه متعامد توسط زو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌سازی شده است. این مدل فیزیکی تحت بارگذاری چند مرحله‌ای بارگذاری - باربرداری و جریان سیال قرار گرفته است. این محققین دریافتند که رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ توسط مرتفع‌ترین ناهمواری کنترل می‌گردد (Zou et al., 2012). در انتهای این قسمت نیز خلاصه‌ای از مدل‌های ارائه‌شده برای رفتار توامان هیدرومکانیکی ناپیوستگی در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲: مقایسه مدل‌های هیدرومکانیکی درزه سنگ (Jing and Stephansson 2007)

محققین	مدل	توضیحات
گنگی (۱۹۷۸)	$k(\sigma') = k_0 \left[ 1 - (\sigma'_n / Y_n)^m \right]^3$	مدل ارائه‌شده با در نظرگیری ناهمواری‌های به صورت میله‌هایی بر روی سطوح صاف و استفاده از تابع توزیع تجمعی آن‌ها به دست آمده است. مدل با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده و عدم مطابقت با نتایج سایر آزمایش‌ها
والش (۱۹۸۱)	$k/k_0 = (1 - 2\sqrt{2} (b/E_0) \ln(\sigma'_n / \sigma'_0))^3$	فرمول با توجه به وجود رابطه بین انحراف از معیار ارتفاع ناهمواری و صلبیت درزه ارائه شده است. مدل نظری است که به دلیل ساده‌سازی سطح و نیمرخ سطح درزه در واقعیت نیاز به آزمایش دارد.
سانگ ویترسپون (۱۹۸۱)	$\langle e^3(\Delta u_n, \sigma'_n) \rangle = \frac{\int (e_0 - \Delta u_n - h)^3 n(h) dh}{\int n(h) dh}$	مدل بر اساس مدل اولیه والش و حل تفاضل محدود بر اساس تعداد و ارتفاع ناهمواری‌ها به دست آمده است.
سوان (۱۹۸۳)	$\sqrt{k/k_0} = (1 - a_0/E_0) - (b/E_0) \ln(\sigma'_n)$	مدل سوان بهبودیافته مدل والش است که در آن توزیع نمایی ارتفاع ناهمواری‌ها و صحت جریان در صفحات موازی در نظر گرفته شده است.
گالی (۱۹۸۷)	$k = s(\sigma'_n)^n$	S و n ثابت‌های آزمایشگاهی هستند، مدل رفتار اتساعی درزه تحت برش را در نظر نمی‌گیرد.

## ۸.۲ روش‌های محاسبات عددی برای مدل‌سازی جریان سیال در توده‌سنگ

بطور کلی در روش‌های عددی دو شیوه کلی برای مطالعه خصوصیات جریان در توده‌سنگ وجود دارد، در این قسمت به‌طور خلاصه این دو شیوه شرح داده شده است.

### ۸.۲.۱ روش پیوسته معادل<sup>۱</sup>

در این روش فرض بر آن است که مکانیسم غالب بر جریان سیال در توده‌سنگ مشابه مکانیسم جریان در یک ماده متخلخل رخ می‌دهد. وقتی تراکم شکستگی بالا باشد و اندازه بلوک سنگ کوچک باشد، محیط معادل مناسب است (Sun and Zhao, 2010; Zoorabadi et al., 2012).

به منظور تخمین مقدار آب ورودی به داخل معدن زغال سنگ، ویو<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۸) از مدل‌سازی عددی استفاده و نتیجه گرفتند که اگر قطر تونل توسط ۵ ناپیوستگی پیوسته قطع شده باشد استفاده از نفوذپذیری معادل برای توده‌سنگ معتبر است و اگر کوچکترین بعد یک سازه زیرزمینی توسط ۵ تا ۱۰ ناپیوستگی قطع شود این محیط را می‌توان به‌عنوان محیط معادل در نظر گرفت. به طور کلی دو نوع مدل برای بیان محیط معادل استفاده می‌گردد:

### (الف) مدل متخلخل

در این‌گونه مدل‌ها فرض بر این است که جریان سیال تنها از طریق حفرات بین دانه‌های ماده سنگ انجام می‌شود. در فرآیند محاسبه عددی، روش‌هایی همچون تفاضل محدود و روش المان محدود، یک شبکه به‌عنوان دامنه جریان و مقادیر نفوذپذیری متناظر آن برای هر یک از شبکه‌ها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین توده‌سنگ به شکل واحدهای هیدرولوژی همگن نشان داده می‌شود (National Research Council., 1996).

1- Equivalent Continuum Model

2- Wei



## (ب) مدل متخلخل دوگانه

در مدل متخلخل دوگانه فرض بر این است که سیال هم در داخل حفرات ماده سنگ و هم در داخل شبکه شکستگی‌ها جریان دارد. فشار میان دانه‌ای توسط بسته‌های ایستا<sup>۱</sup> نشان داده می‌شود. این بسته‌ها قادرند سیال را در خود ذخیره کنند ولی هدایت‌پذیری جریان در آنها صورت نمی‌پذیرد. مدل متخلخل دوگانه برای انتشار جریان از ماده سنگ (فشار میان دانه‌ای) به داخل زون شکستگی استفاده می‌شود. نسبت جریان در شبکه شکستگی و ماده سنگ را می‌توان با حل دو مجموعه از معادلات جریان با استفاده از پارامترهای توامان برای نشان دادن جریان بین ماتریس و شکستگی تعیین کرد (National Research Council., 1996).

فشار و حجم جریان باید در این دو دامنه جریان در تعادل باشد. دبی کلی در نقطه مشترک  $i$  توسط رابطه (۲۸-۲) بیان می‌شود (Indraratna, 2001):

$$Q_i = \sum Q_j + Q_m \quad (28-2)$$

که در اینجا دبی جریان در نقطه مشترک  $i$   $\sum Q_j$  جمع جریان در نقطه  $i$  در کانال‌های مختلف شکستگی و  $Q_m$  جریان در داخل ماده سنگ است. فرض کلیدی در روش محیط پیوسته همگونی و یکنواختی خصوصیات هیدرولیکی توده‌سنگ است در حالی که در اکثر تشکیلات زمین شناسی پارامترهای هیدرولیکی تحت تاثیر ناپیوستگی‌ها موجود در آن است و به صورت نامشخص و غیر یکنواخت تغییر می‌کند.

---

1- Immobile pocket

## ۲.۸.۲ روش شبکه شکستگی مجزا<sup>۱</sup>

با توجه به وجود ناپیوستگی‌های همچون شکستگی‌ها، درزه‌ها و گسل‌ها در توده‌سنگ به منظور وارد کردن شرایط زمین‌شناسی از قبیل هندسه شکستگی، راستا، مسیر جریان، فاصله‌داری، تراکم و هدایت-پذیری شکستگی در مدل‌سازی، استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا گزینه مناسبی خواهد بود.

استفاده از روش المان مجزا<sup>۲</sup> برای پوشش دادن این نیاز گزینه‌ای مناسب است. مبنای نظری این روش عددی حل معادلات حرکت برای اجسام صلب یا تغییر شکل‌پذیر است. در دهه گذشته روش المان مجزا برای مدل‌سازی فرآیندهای توامان هیدرومکانیک در شکستگی‌های سنگی توسط محققین نظیر لemos<sup>۳</sup> (۱۹۸۸)، جینگ و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شده است.

در مدل‌سازی جریان با استفاده از روش المان مجزا اولین گام ایجاد مدل هندسی از شکستگی‌ها و بلوک سنگ است. حل جریان با استفاده از روش‌های عددی و یا روش‌های تحلیلی در داخل شکستگی‌ها بدست می‌آید (Jing and Stephansson, 2000).

مدل‌های جریان در شکستگی مجزا هم به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی بسط داده شده‌اند. مدل‌های دوبعدی از جنبه‌های خاص محدودیت‌هایی دارند زیرا شکستگی‌های ایجاد شده نمی‌توانند به‌طور موثری ویژگی‌های خاص شکستگی را نشان دهند. در مقایسه با روش محیط پیوسته معادل، مزیت روش‌های روش شکستگی گسسته این است که تخمین میانگینی مقادیر در مقیاس شبکه شکستگی انجام نمی‌شود. اما معایب این روش‌های به در ادامه آورده شده است (National Research Council., 1996):

- این روش نیازمند اطلاعات زمین‌شناسی است که گردآوری آن مشکل است؛

1- Discrete Fracture Network

2- Discrete Element Method

3- Lemos

• در یک شبکه شکستگی در توده سنگ تمایز بین شکستگی‌های تراوا از شکستگی‌های ناتراوا مشکل است؛

• مدل شکستگی طبیعی پیچیده است و حجم محاسبات بسیار زیادی دارد.

## ۹.۲ پیشینه مغارهای بدون پوشش

ایده اولیه ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغار در دوران جنگ جهانی اول در کشور سوئد شکل گرفته است. در سال ۱۹۳۷ دولت سوئد برای مقابله با حملات هوایی تحقیقات ساخت مغار ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی را آغاز کرد. در این راستا هاگرمن<sup>۱</sup> اثبات کرد که مغار با پوشش بتنی در زیر سطح ایستابی، هنگامی برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مناسب است که تمامی منافذ بتن از آب پر شده باشد. در سال ۱۹۵۰ یک طرح آزمایشی برای ذخیره نفت گاز در مغار بدون پوشش توسط ادهلم<sup>۲</sup> صورت گرفت که پس از پنج سال مشاهده شد که هیچ نفت گاز هدر نرفته و یا در آب حل نشده است (Lindblom, 1994).

ابرگ<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۷ بر پایه مدل‌سازی عددی قانونی تحت عنوان قانون شیب هیدرولیکی (افت فشار در واحد طول) را ارائه داد. بر طبق این قانون، اگر شیب هیدرولیکی عمودی بزرگ‌تر از یک شود مغار آب‌بند است اما در این قانون نیروی اصطکاک، جاذبه و اثر موینگی لحاظ نشده است. بر پایه تحقیقات ابرگ، گودال<sup>۴</sup> (۱۹۸۹) اصول ساده‌تری را پیشنهاد داد. بر این اساس اگر فشار آب در طول تمامی مسیرهای نشت مواد هیدروکربوری به‌طور ثابت افزایش یابد هیچ‌گونه نشتی رخ نخواهد داد (Goodall et al., 1988).

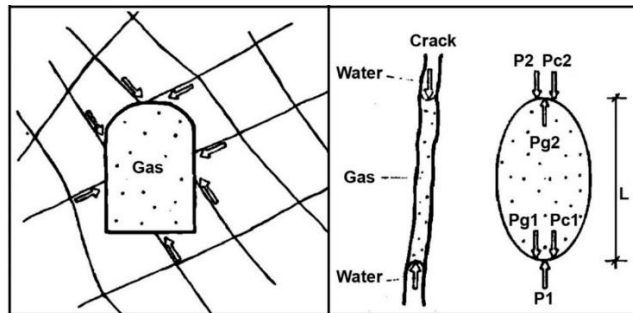
1- Hagerman

2- Edholm

3- Aberg

4- Goodall

تحقیق دیگری برای تعیین شیب هیدرولیکی بحرانی در موسسه تحقیقاتی رویال<sup>۱</sup> کشور سوئد انجام شده است. شکل ۸-۲، شکستگی عمودی در بالای سقف مغار را نشان می‌دهد که در آن، آب زیرزمینی به سمت پایین با گرادیان  $I_0$  در جریان است. حباب گاز در این شکستگی تحت نیروهای فشار داخلی گاز، فشار بیرونی و اثر موینگی قرار دارد (Lindblom, 1977).



شکل ۸-۲: نیروهای وارده به حباب هیدروکربوری در درزه سنگ (Lindblom, 1977)

معادلات تعادل برای حالتی که حباب گاز به سمت بالا شروع به حرکت می‌کند به ترتیب ذیل

نوشته شده است:

$$P_2 + P_{C2} = P_{g2} \quad (۳۰-۲) \quad P_1 - P_{C1} = P_{g1} \quad (۲۹-۲)$$

$$P_{C1} + P_{C2} = \rho_w g h \quad (۳۲-۲) \quad P_1 - P_2 = \rho_w g l (1 - I_0) \quad (۳۱-۲)$$

در این روابط  $l$  طول حباب،  $h$  طول موینگی،  $P_1$  و  $P_2$  فشار آب و  $C$  ضریب تجربی را نشان می‌دهد.

با حل این معادلات گرادیان مورد نیاز برای حرکت رو به بالای حباب به شکل رابطه (۳۳-۲) نوشته

می‌شود:

$$I > 1 - \left( \frac{Ch}{l} \right) - \left( \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) \quad (۳۳-۲)$$

این موسسه برای ذخیره‌سازی گاز در مغارهای بدون پوشش به‌صورت استاندارد پیشنهادهای ذیل را ارائه داده است (Lindblom, 1977):

- در شکستگی‌هایی با بازشدگی بیشتر از ۶ میلی‌متر باید تزریق دوغاب سیمان صورت پذیرد.
- شیب هیدرولیکی پرده آب در اطراف مغار باید از ۱ بزرگ‌تر باشد.
- معیار طراحی فشار پرده آب و محل مغار مطابق رابطه (۳۴-۲) تعیین شود.

$$I - \frac{P_w - P_g}{g \cdot H \cdot Q_w} \geq 1 \quad (34-2)$$

ناکاگاوا<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۸۷) جهت بررسی تاثیر نیروی موینگی (شرط  $I_0 > 1$ ) و تاثیر ناهمواری سطح داخلی مغار بر نشت مواد به خارج از آن آزمایشاتی را طراحی کردند. در این آزمایش با شبیه‌سازی مغار ذخیره‌سازی گاز، ناپیوستگی و پرده آب به تعیین نقطه مبنایی برای مؤلفه عمودی شیب هیدرولیکی<sup>۲</sup> پرداخته شده است (Nakagawa et al., 1987).

با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها کومادا و همکاران نتیجه گرفتند که برای نگهداری گاز در مغار بدون پوشش، شیب هیدرولیکی پرده آب باید از رابطه (۳۵-۲) تبعیت نماید (Komada and Nakagawa, 1980):

$$I_0 > 1 - \frac{(2T \cos \alpha) / w}{l \cdot t} \quad (35-2)$$

که در این رابطه  $T$  کشش سطحی آب،  $w$  چگالی آب،  $\alpha$  زاویه تماس حباب،  $l$  طول حباب و  $t$  بازشدگی ناپیوستگی است. این مقدار شیب هیدرولیکی از مقدار تعیین‌شده توسط ابرگ به‌اندازه

1- Nakagawa

2- Vertical hydraulic gradient

توسط مواد رزینی شبیه‌سازی شده است.  $\frac{(2TC\cos\alpha)/w}{l.t}$  کمتر است (Komada and Nakagawa, 1980). البته در این مطالعات ناپیوستگی سنگی

کومادا و همکاران همچنین به منظور بررسی تاثیر ناهمواری سطح داخلی مغار بر نشت مواد به خارج از آن، با ایجاد یک شکاف با زاویه‌های مشخص در دهانه درزه تاثیر این زوایا را در نشت هوای فشرده بررسی کردند (Nakagawa et al., 1987).

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که در زمان نشت هوای فشرده، مقدار فشار هیدرواستاتیکی در نوک ناهمواری تقریباً با فشار هوای ذخیره‌شده برابر بوده و شیب هیدرولیکی بحرانی برای جلوگیری از نشت هوای فشرده نزدیک به صفر است. بنابراین اگر جریان آب زیرزمینی با شیب هیدرولیکی عمود بر سطح مغار بزرگ‌تر از صفر باشد و یا فشار هوای فشرده کمتر از فشار هیدرواستاتیک معادل با عمق مغار باشد، امکان ذخیره هوای فشرده با آب زیرزمینی وجود دارد. همچنین ناهمواری سطح مغار تاثیر بر فشار بحرانی ندارد (Nakagawa et al., 1987).

کومادا و همکاران همچنین با استفاده از روش عددی المان محدود مغارهای ذخیره‌سازی بدون پوشش را برای حالات مختلف مدل‌سازی کرده‌اند و نتیجه گرفتند که برای توده‌سنگ با ضریب نفوذپذیری  $10^{-6}$  cm/sec در حالت جریان یکنواخت، افت سطح آب زیرزمینی برای یک مغار تنها تا یک سوم ارتفاع دیوار مغار اتفاق می‌افتد. در همین توده‌سنگ اگر دو مغار در مجاورت هم باشند افت سطح آب زیرزمینی تا کف مغار رخ می‌دهد، بنابراین در دو مغار مجاور احتمال جابجایی مواد وجود دارد. مدت زمان موردنیاز برای این که جریان به شکل حالت دائمی<sup>۱</sup> درآید، اگر نفوذپذیری توده‌سنگ  $10^{-6}$  cm/sec باشد، ۲۰ سال و در صورتی که نفوذپذیری  $10^{-4}$  cm/sec باشد کمتر از یک سال است. برای هر دو

حالت (یک مغار تنها و یا چند مغار مجاور) در توده‌سنگی با ضریب نفوذپذیری  $10^{-6}$  cm/sec شعاع تاثیر افت سطح آب در سال اول ۶۰ متر، در سال پنجم ۲۰۰ متر و در سال دهم ۳۰۰ متر است. مقدار آب ورودی به مغار باید با لحاظ پارامترهایی همچون پایداری مکانیکی مغار، هزینه تصفیه آب و هزینه گرم کردن مواد هیدروکربوری تعیین گردد (Komada and Nakagawa, 1980).

در حالت که ضریب نفوذپذیری  $10^{-6}$  cm/sec باشد، شدت جریان آب وارده به داخل مغار در مدت زمان یک سال، برای یک مغار تنها  $0.1$  m<sup>3</sup>/day/m و این مقدار برای مغار مرکزی در ۳ مغار  $0.5$  m<sup>3</sup>/day/m و برای مغارهای دو طرف  $0.7$  m<sup>3</sup>/day/m می‌باشد. این مقادیر در حالت جریان دائمی به ترتیب  $0.2$  m<sup>3</sup>/day/m،  $0.5$  m<sup>3</sup>/day/m و  $0.17$  m<sup>3</sup>/day/m محاسبه می‌گردد.

لی<sup>۱</sup> و همکارانش (۱۹۹۵) به منظور طراحی مغار ذخیره‌سازی نفت خام در کشور کره جنوبی، از روش عددی المان محدود برای بررسی تاثیر تنش‌های القایی بر تغییر نفوذپذیری توده‌سنگ استفاده کردند. با استناد به نتایج آزمایش‌های انجام شده روابط بین کرنش حجمی با نفوذپذیری در محدوده الاستیک و کرنش جانبی با نفوذپذیری در محدوده پلاستیک توسط توابع نمایی زیر توصیف شده است. نفوذپذیری اصلی حداکثر، عمود بر جهت کرنش اصلی حداکثر و نفوذپذیری اصلی حداقل، عمود بر جهت کرنش اصلی حداقل در منطقه پلاستیک تعریف می‌گردد (Lee and Chang, 1995).

$$K_{p.min} = K \cdot \exp(\beta^P \times \varepsilon_{min}) \quad (36-2)$$

$$K_{p.max} = K \cdot \exp(\beta^P \times \varepsilon_{max}) \quad (37-2)$$

$$K_e = K \cdot \exp(\beta^e \times \varepsilon_{max}) \quad (38-2)$$

---

1- Lee

در این روابط  $\beta^e$  ثابت آزمایشگاهی در محدوده الاستیک و  $\beta^p$  ثابت آزمایشگاهی در محدوده پلاستیک می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل مدلی با لحاظ روابط (۲-۳۶) - (۲-۳۸) و حل المان محدود به شرح ذیل می‌باشد (Lee and Chang, 1995):

۱. نفوذپذیری میانگین به‌واسطه حفاری در مرکز سقف و کف مغار افزایش می‌یابد اما در محل

گوشه‌ای مغار به دلیل تمرکز تنش در نفوذپذیری تغییر زیادی رخ نمی‌دهد.

۲. استفاده از مقادیر نفوذپذیری اولیه توده‌سنگ در طراحی پرده آب، حجم آب موردنیاز را تا ۳

برابر کمتر برآورد می‌کند، بنابراین باید از نفوذپذیری پس از حفر مغار در طراحی استفاده شود.

یکی از مسایل مهم در طراحی و ساخت مغارهای بدون پوشش ارزیابی آب‌بندی و رفتار پایداری

آن‌ها است. لو (۱۹۹۸) از یک تحلیل المان محدود برای ارزیابی پایداری مغار و از روش المان مجزا برای

بررسی تاثیر توامان تنش - نفوذپذیری بر آب وارده به حفاری استفاده کرده است.

لی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ به‌منظور بررسی عملکرد پرده آب در مغارهای ذخیره‌سازی هوای

فشرده آزمایشاتی را انجام دادند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط ایشان در ذیل آورده شده است (Li

et al., 2009)

• پس از راه‌اندازی سامانه پرده آب، فشار گاز داخل مغارهای بدون پوشش شروع به افزایش

می‌کند؛

• چنانچه فشار پرده آب ثابت باشد، مقدار نشت گاز تحت تاثیر تعداد مغارهای مجاور هم قرار

می‌گیرد؛



مدل‌سازی مغار ذخیره‌سازی نفت خام در کشور چین توسط لی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش المان مجزا<sup>۱</sup> (DEM) انجام شده است. با کمک نرم‌افزار UDEC به همراه مدل رفتاری بارتن - بندیس (۱۹۸۵) ساخته شده است. با مقایسه نرخ جریان آب ورودی به مغار در مدل‌سازی با رابطه تجربی (ارایه‌شده توسط گودال (رابطه ۲-۱۱)) نشان می‌دهد که، نتایج مدل‌سازی از مقادیر بدست آمده از رابطه تجربی کمتر است (Li et al., 2014):

$$q_0 = \frac{2\pi HK}{Ln(2H/r)} \quad (39-2)$$

پارامترهای هندسی سیستم پرده آب شامل طول، فاصله‌داری گمانه‌ها همین‌طور اختلاف تراز بین گمانه‌ها و تاج مغار است. در جدول ۲-۳ لیستی از جزییات سیستم پرده آب برای مغار ذخیره‌سازی در یونان، نروژ، کره و چین آورده شده است. مواد ذخیره شده در این مغارها عبارتند از هوای فشرده، LPG و نفت خام، توده سنگ که مغار در آن حفاری شده است گرانیات، توف، دیوریت و آندزیت است. سه آرایش از گمانه در سیستم‌های پرده آب در مغار به کار گرفته می‌شود: شامل مایل، افقی و ترکیبی افقی عمودی؛ به خاطر شرایط متفاوت هیدروژئولوژی در مغارهای متفاوت ذخیره‌سازی فاصله‌داری گمانه‌ها در محدوده ۷ تا ۲۰ متر و تفاوت تراز در محدوده ۱۲ تا ۳۱/۲ متر متغییر است (Li et al., 2014).

جوادی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مفهوم شبکه شکستگی مجزا ارتباط بین نشت مواد هیدروکربنی در مغارهای ذخیره‌سازی بدون پوشش و شکستگی‌ها موجود در توده‌سنگ اطراف مغار مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی نشت هیدروکربن در اطراف یک مغار بدون پوشش برای شرایط مختلف مرزی هیدرولیکی نتیجه گرفتند که عمده نشت مواد هیدروکربنی از طریق شکستگی‌های موجود در اطراف مغار حادث می‌شود. در چنین شرایطی، پدیده نشت به شدت وابسته به هندسه شکستگی‌ها است. بنابراین در طراحی مغار بدون پوشش، فرض همگن بودن محیط و همچنین

---

1- Discrete Element Method

بالتر بودن فشار پرده آب در تمامی نقاط اطراف مغار نسبت به فشار مواد هیدروکربنی کافی نخواهد بود (Javadi and Sayadi, 2018).

جدول ۲-۳: جزئیات سیستم پرده آب برای مغار ذخیره‌سازی در کشورهای جهان

مرجع	کشور	مواد ذخیره‌شده	گنجایش مترمکعب $10^4 \times$	توده سنگ	فاصله‌داری (m)	اختلاف‌تراز (m)
(Benardos and Kaliampakos, 2005)	یونان	گازوییل	۲۰	سنگ آهک	۲۰	۱۲
		LPG	۲۲/۴	گنایس	۱۰	۲۵
(Lee and Song, 2003)	کره جنوبی	بنزین	۲۳/۱	گرانیت	۱۲	۱۵
		LPG	۳۰	آندزیت	۱۰	۲۵
		نفت خام	۴۲۹/۳	گرانودیوریت	۷/۱۴	۲۰
(Levinsson et al., 2004)	چین	LPG	۵۰	توف	۱۰	۱۰
(Wang et al., 2015)	چین	نفت خام	*	گرانیت	۱۰	۲۶/۵

## ۱۰.۲ جمع بندی

در این فصل مبانی نظری مرتبط با رفتار توامان هیدرومکانیک و مطالعات انجام‌شده در این خصوص به طور مختصر مرور شد. همچنین پارامترهای موثر بر خصوصیات هیدرومکانیکی شکستگی شامل هندسه، رفتار مکانیکی و هیدرولیکی شکستگی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه معادلات رایج برای حل مسایل هیدرولیکی در یک شکستگی و در توده‌سنگ مرور گردید. همچنین مهمترین مطالعات انجام شده در خصوص مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی مطالعه شده است.

باتوجه به در نظر گرفتن مطالب ارایه شده در این فصل و ارزیابی نتایج تحقیقات مرور شده می توان

موارد ذیل را جمع بندی نمود:

۱. در پژوهش های آزمایشگاهی پیشین اکثر آزمایش ها بر روی نمونه شکستگی مصنوعی انجام شده است. یا نمونه مدل فیزیکی از شکستگی بوده، یا شکستگی سنگ توسط ماشین برش یا شکست کششی ایجاد شده است.

۲. قانون مکعب به عنوان پرکاربردترین و مشهورترین رابطه موجود برای مطالعه جریان سیال در ناپیوستگی سنگی با استفاده از معادله ساده شده ناور-استوکس بدست آمده است. فرضیات لحاظ شده در اثبات این قانون موجب ایجاد اختلاف بین نتایج این قانون با نتایج آزمایشگاهی گردیده است. برخی از محققین برای رفع این مشکل ضرایب اصلاحی به قانون مکعب اعمال کرده اند.

۳. دو رابطه ای فورچهمیر و ایزباش به توصیف جریان غیرخطی سیال در شکستگی می پردازند ولی برای استفاده از آنها لازم است تا ضرایب تجربی این روابط برآورد گردد.

۴. تنش جانبی بر رفتار هیدرولیکی جریان در شکستگی سنگ تاثیرگذار است.

- مکانیسم افت فشار در شکستگی بررسی شد و دو عامل عدد رینولدز و هندسه شکستگی به عنوان پارامترهای موثر در افت فشار معرفی شده است. همچنین مدل های ارایه شده برای تخمین ضریب اصطکاک آورده شده است.

- امروزه استفاده از فناوری سامانه پرده آب جهت کنترل نشت مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش در دنیا مرسوم است.

- استفاده از محیط پیوسته وهمگن برای مدل سازی مغارهای بدون پوشش ذخیره سازی نفت خام روش مناسبی نیست.

## فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی

## ۱.۳ مقدمه

در بسیاری از فعالیت‌های ژئومکانیکی بررسی رفتار هیدرولیکی یک شکستگی به عنوان اصلی‌ترین جزء تشکیل‌دهنده شبکه شکستگی و مسیر اصلی عبور جریان سیال در توده سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعه پژوهش‌های پیشین در فصل قبل حاکی از آن بود که رفتار تغییر شکل مکانیکی شکستگی سنگ تاثیر بسیاری بر خصوصیات هیدرولیکی آن دارد. تغییر در تنش جانبی می‌تواند باعث تغییر شکل شکستگی شود. به عنوان مثال، افزایش تنش جانبی موجب کاهش بازشدگی و افزایش سطح تماس دو دیواره شکستگی می‌گردد. بنابراین ضروری است در خصوص رفتار هیدرومکانیکی جریان سیال در سنگ مورد مطالعه آزمایش انجام شود.

در این فصل رفتار هیدرولیکی شکستگی طبیعی سنگ آهک به صورت توام با تنش جانبی مورد آزمایش قرار گرفته و با تغییر تنش جانبی در آزمایش‌های جریان سیال، رفتار هیدرومکانیکی شکستگی‌های سنگ بررسی می‌شود. ابتدا هندسه شکستگی‌ها (زبری و دهانه بازشدگی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس خصوصیات مکانیکی ماده سنگ با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری سه محوره برآورد شده و در نهایت نتایج آزمایش جریان سیال مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲.۳ تهیه نمونه سنگ

مغارهای سنگی بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام، عموماً در توده سنگ با کیفیت بالا و با ماده سنگ با نفوذپذیری پایین قابلیت اجرا دارند. به عبارت دیگر در توده سنگ با درزه‌داری زیاد و ماده سنگ دارای نفوذپذیری بالا اجرای این نوع مغارها امکان‌پذیر نیست. همچنین دهانه بازشدگی شکستگی در مجاورت مغار نباید بزرگ باشد بنابراین نمونه سنگ باید از ماده سنگ با نفوذپذیری و دارای دهانه بازشدگی پایین انتخاب شود. با توجه به اطلاعات گردآوری شده و هماهنگی با شرکت پایانه‌های نفتی توده سنگ آهک نزدیک به سد شمیل برای مطالعه در این پژوهش انتخاب شده است. به منظور انجام آزمایش نیاز

است نمونه مغزه از این توده‌سنگ تهیه شود، با هماهنگی شرکت آب و نیرو تعدادی ۸ نمونه سنگ از محدوده طرح مطالعاتی سد شمیل در سنگ آهک تهیه گردید (شکل ۱-۳).

همچنین با توجه به این که در اغلب پژوهش‌های پیشین، جریان سیال بر روی شکستگی مصنوعی آزمایش شده است. در انتخاب نمونه‌ها، نمونه‌های با شکستگی طبیعی جمع‌آوری شد تا در آزمایش جریان سیال از آن استفاده شود. همچنین تعدادی نمونه سالم برای انجام آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره جمع‌آوری شده است.



شکل ۱-۳: جعبه نمونه سنگ جهت انجام آزمایش

چهار نمونه‌ی که برای انجام آزمایش سه‌محوره انتخاب شده به ترتیب با S1، S2، S3 و S4 نام گذاری شده است و چهار نمونه انجام آزمایش جریان سیال به ترتیب F1، F2، F3 و F4 نام‌گذاری شده است.

### ۳.۳ برداشت زبری سطوح درزه

رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ در سطح زمین و در عمق کم بسیار وابسته به خصوصیات ناپیوستگی موجود در توده‌سنگ است. ناپیوستگی به نسبت ماده سنگ، صفحه ضعیف است و جریان سیال از آن عبور می‌کند. بنابراین توزیع بازشدگی و زبری ناپیوستگی تاثیر قابل توجهی بر رفتار هیدرومکانیک توده‌سنگ می‌گذارد. در خصوص رفتار مکانیکی، بازشدگی و زبری به طور مستقیم بر توزیع ناحیه تماس دو سطح شکستگی تاثیر می‌گذارد، که این عامل موجب توزیع تنش، تغییر شکل و تخریب ناهمواری‌ها تحت بارگذاری نرمال و برشی می‌گردد (Re and Scavia 1999; Gentier et al.

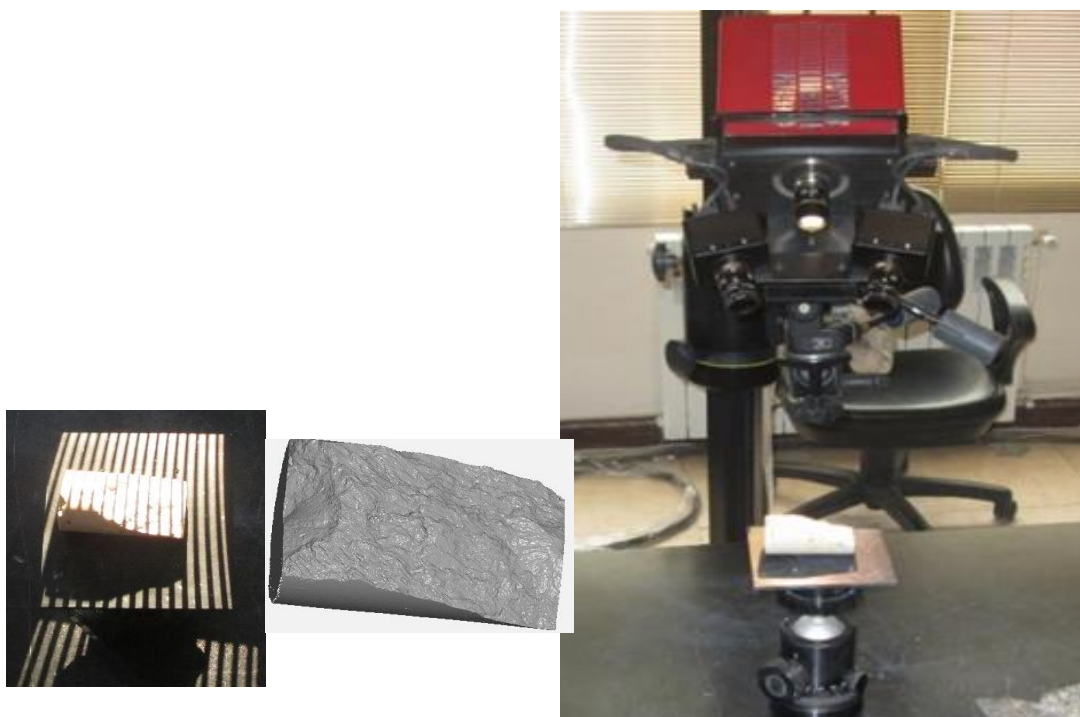
(Grasselli and Egger 2003; 2000). در خصوص رفتار هیدرولیکی توزیع بازشدگی و زبری به طور مستقیم بر پیچ و خم‌داری مسیر جریان تاثیر گذار است که این مورد آب‌گذری شکستگی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد (Zimmerman and Bodvarsson 1996; Javadi et al. 2010).

با هدف ارزیابی زبری سطوح شکستگی نخست باید توپوگرافی سطوح شکستگی اندازه‌گیری شود، سپس با انتخاب یکی از روش‌های تخمین زبری سطح شکستگی نظیر روش تجربی (Barton and Choubey 1977)، روش آماری (Maerz et al. 1990) و یا روش فرکتال (Kulatilake et al. 2006) یک و یا چند عامل برای توصیف زبری ارایه گردد.

روش‌ها و ابزارهای متعدد تماسی و غیر تماسی، برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح ناپیوستگی در سنگ به کار گرفته شده است. با توجه به دقت مورد نیاز در اندازه‌گیری، از این روش‌ها استفاده می‌شود. با توجه به تاثیر زیاد هندسه شکستگی بر رفتار سیال لازم است ناهمواری سطوح با دقت بالا برداشت شود. بنابراین در این پژوهش، از سیستم اندازه‌گیری ژئومتریک استریو سه بعدی ساخته شده توسط شرکت GOM (روش‌های برداشت غیرتماسی) موجود در شرکت فدک صنعت استفاده شده است. برای رقومی‌سازی یک شی در این دستگاه، مجموعه‌ای از نورهای ساختار یافته بر سطح شی تابانده می‌شود (شکل ۳-۲). تصاویر این الگو که به علت زبری سطح منحرف شده و به صورت خودکار توسط دو دوربین CCD<sup>1</sup> برداشت می‌شود. از این جفت تصاویر و بر مبنای اصول مثلثاتی، برای هر پیکسل به صورت دقیق مختصات سه بعدی توسط نرم افزار محاسبه می‌شود. از این طریق، تعداد زیادی از نقاط با مختصات  $X, Y, Z$  به اصطلاح ابر نقاط، از سطح خارجی نمونه سنگ برداشت می‌شود (شکل ۳-۳).

---

1- Charge Coupled Device

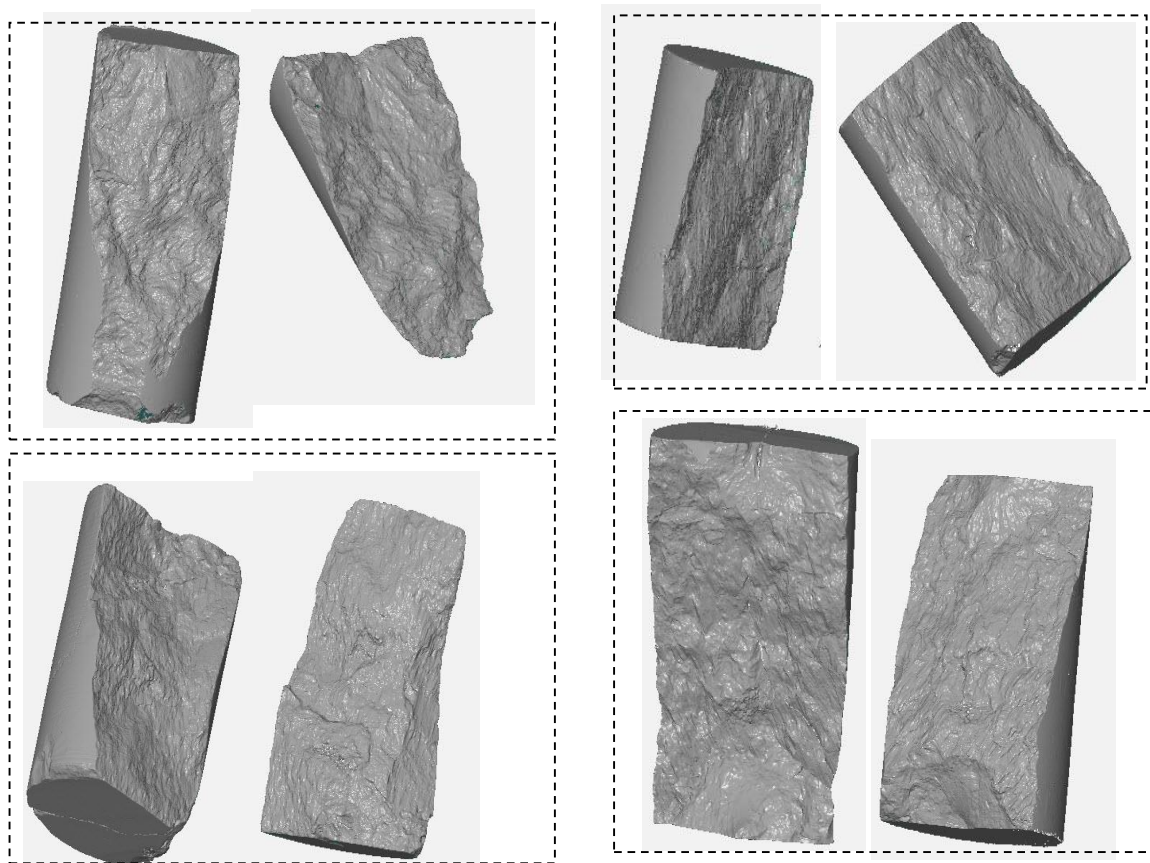


(الف) تجهیزات مورد استفاده برای برداشت هندسه شکستگی‌ها  
(ب) مجموعه از نورهای ساختار یافته بر سطح شکستگی سنگ و نمونه رقومی شده شکستگی طبیعی

شکل ۳-۲: (الف) تجهیزات مورد استفاده برای برداشت هندسه شکستگی‌ها؛ (ب) نمونه واقعی و رقومی شده

اطلاعات ابر نقاط، در نرم افزار *Gom Inspector* فراخوانی شده و نقاط برداشت شده در مرزهای جانبی حذف می‌شوند، پس از تعیین محورهای مختصات محلی نمونه، این محورهای مختصاتی دوران یافته تا بر محورهای مختصات مرجع منطبق شوند. سپس اطلاعات ابر نقاط در سیستم مختصات مرجع ذخیره می‌گردد (شکل ۳-۴).

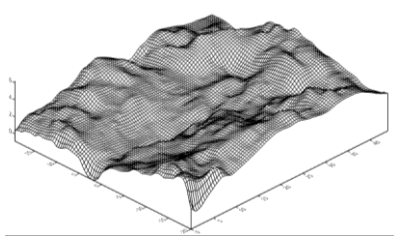




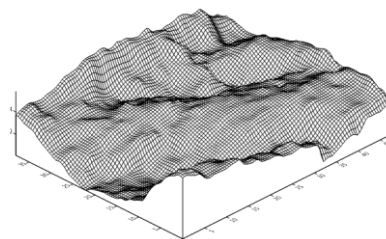
شکل ۳-۳: ابر نقاط برداشت شده از سطوح شکستگی نمونه‌ها

با هدف مطالعه کمی هندسه شکستگی کدی در نرم افزار Matlab تهیه شده و اطلاعات سطح شکستگی در این کد فراخوانی شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۳-۴ در این کد شبکه‌ای منظم از نقاط در سطح نمونه ایجاد شده و مختصات با استفاده از روش درون‌یابی در شبکه مربعی با ابعاد ۰/۵ میلیمتر بازتولید می‌شود. این عمل به منظور انجام محاسبه پارامترهای کمی سطوح شکستگی صورت می‌گیرد.

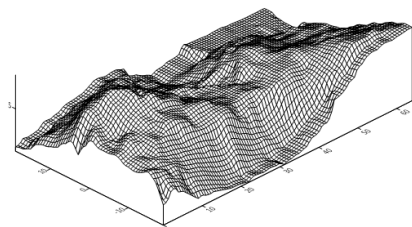
برای تعیین مختصات در ناهمواری‌های سطح شکستگی، باید صفحه‌ای به عنوان سطح مبنا تعریف شود تا مختصات نقاط نسبت به آن سطح تعیین گردد. به منظور تعیین سطح مبنا مورد نظر، از اطلاعات ارتفاعی نقاط متوسط‌گیری شده و صفحه متوسط به عنوان صفحه مبنا در نظر گرفته شده است. پس از تعیین سطح مبنا مختصات ارتفاعی نقاط نسبت به صفحه مبنا محاسبه می‌شود.



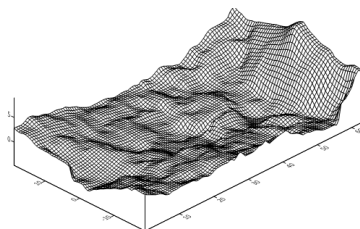
نمونه F1



نمونه F2



نمونه F3

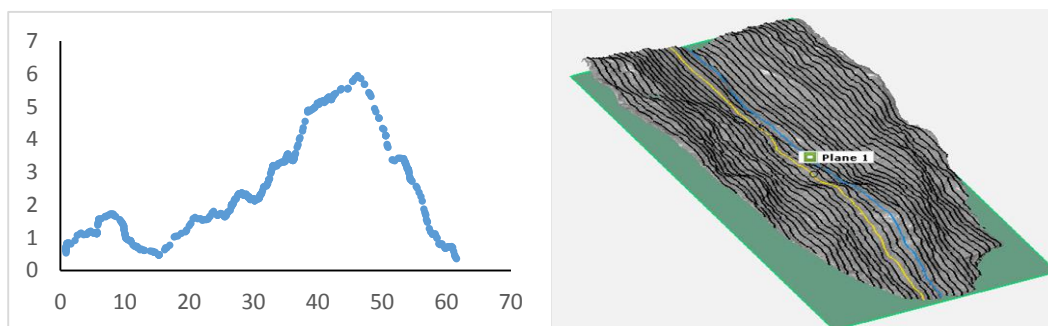


نمونه F4

شکل ۳-۴: توپوگرافی دیجیتالی شده سطوح شکستگی

### ۴.۳ کمی‌سازی زبری سطوح شکستگی

کمی‌سازی زبری سطوح شکستگی با استفاده از سه شیوه تجربی (شاخص JRC)، آماری و فرکتال انجام شده است. برای برآورد شاخص JRC و پارامترهای آماری به صورت دو بعدی، از سطوح رقومی شده در راستای طول نمونه سنگ در فاصله‌های مشخص پروفیل دو بعدی تهیه شده، در شکل ۳-۵ نمونه‌های از این پروفیل ترسیم شده است.



شکل ۳-۵: (الف) سطح رقومی شده از نمونه سنگ (ب) پروفیل تهیه شده از سطح نمونه سنگ F1

پارامترهای آماری شامل ارتفاع ناهمواری حداکثری ( $\zeta_{\max}$ )، ریشه میانگین مربع ارتفاع ناهمواری‌های ( $R_{rms}$ )، ارتفاع متوسط ناهمواری‌های ( $R_m$ )، میانگین مربع شیب پروفیل ( $Z_2$ ) و شاخص زبری پروفیل ( $R_p$ ) (نسبت طول واقعی به اسمی) برای هر پروفیل مطابق روابط (۱-۳) تا (۵-۳) محاسبه شده است.

$$\zeta = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (1-3)$$

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Z_i - Z_a)^2} \quad (2-3)$$

(Krahn and Morgenstern, 1979)

$$R_m = \frac{1}{n} \sum |Z_i - Z_a| \quad (3-3)$$

$$Z_2 = \left( \frac{1}{(n-1)(x_{i+1} - x_i)^2} \sum_{i=1}^{i=n} (Z_{i+1} - Z_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-3)$$

(Myers, 1962)

$$R_p = \frac{Lr}{Ln} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}}{Ln} \quad (5-3)$$

(El-Soudani, 1978)

در این روابط  $n$  تعداد نقاط برداشت شده،  $Z_i$  ارتفاع در نقطه  $i$ ،  $Z_a$  ارتفاع در سطح مبنا است. همچنین با استفاده از روابط ارائه شده توسط تسه و کردون (۱۹۷۹) (رابطه (۲-۲)) و گرایزلی و همکاران (۲۰۱۰) (رابطه (۴-۲)) شاخص زبری JRC برآورد شده است. برای تخمین پارامترهای آماری برای هر سطح نمونه میانگینی از پارامترهای آماری پروفیل‌های آن نمونه محاسبه و در جدول ۱-۳ آورده شده است. مطابق جدول تمامی نمونه سنگ‌ها دارای سطح زیر با JRC بیشتر از ۱۲ می‌باشند.

جدول ۱-۳: میانگین پارامترهای آماری بدست آمده پروفیل‌های هر سطح برای گام حرکت یک میلیمتر

JRC	$R_p$	JRC	$Z_2$	$R_{rms}$ (mm)	$R_m$ (mm)	$\zeta_{\max}$	شماره نمونه
۱۶/۳۱	۱/۰۴	۱۵/۴۳	۰/۳۱	۱/۰۲	۱/۲۱	۴/۳۲	F۱-۱
۱۶/۵۴	۱/۰۴	۱۵/۱۶	۰/۳۰	۰/۸۳	۱/۰۲	۳/۹۹	F۲-۱
۱۲/۸۳	۱/۰۳	۱۱/۲۳	۰/۲۳	۰/۸۵	۱/۰۰	۳/۶۲	F۱-۲
۱۳/۲۱	۱/۰۳	۱۱/۶۸	۰/۲۴	۰/۸۵	۱/۰۰	۳/۶۵	F۲-۲
۱۶/۲۵	۱/۰۴	۱۵/۰۸	۰/۳۱	۱/۷۲	۱/۹۷	۶/۵۵	F۱-۳
۱۶/۱۱	۱/۰۴	۱۴/۸۶	۰/۳۰	۴/۸۰	۱/۳۳	۴/۵۶	F۲-۳
۲۱/۰۵	۱/۰۹	۲۱/۱۱	۰/۴۷	۱/۶۴	۲/۰۹	۹/۱۳	F۱-۴
۲۱/۰۹	۱/۰۹	۲۲/۰۳	۰/۵۲	۱/۸۱	۲/۱۴	۸/۴۰	F۲-۴

مقادیر محاسبه شده برای شاخص زبری (JRC) در نمونه F4 از عدد ۲۰ بزرگتر است که این مقدار از محدوده استاندارد زبری بیشتر است. با توجه به این که روابط موجود برای تخمین زبری با استفاده از پارامترهای آماری به شیوه درون‌یابی بدست آمده است این گونه خطاها رخ می‌دهد بنابراین برای شاخص زبری سطوح نمونه F4، مقدار ۲۰ لحاظ شده است.

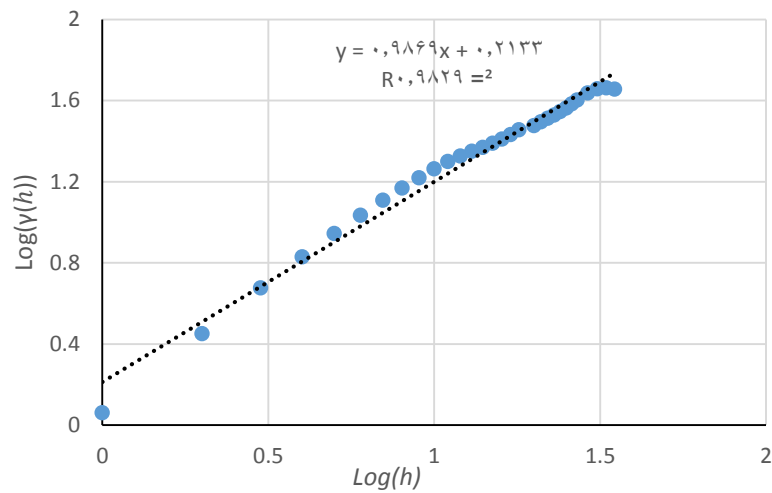
در این پژوهش از روش واریوگرام جهت تخمین بعد فرکتال استفاده شده است. واریوگرام  $\gamma$  به شکل رابطه (۶-۳) بیان می‌شود و از رابطه (۷-۳) بعد فرکتال شکستگی تخمین زده می‌شود (Odling, 1994; Division, 1998)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_1^n [Z(x) - Z(x+h)] \quad (6-3)$$

$$\gamma(h) = \gamma_0 h^{2H} \quad (7-3)$$

در این رابطه‌ها  $h$  مقدار گام حرکت،  $Z(x)$  ارتفاع سطح در نقطه  $x$  و  $n$  تعداد نقاط در طول گام  $h$  است.  $H$  پارامتری است که برای تخمین بعد فرکتال به صورت سه بعدی به کار می‌آید. برای بدست آوردن مقدار  $H$  نیاز است تا نمودار  $\gamma(h)$  برحسب  $h$  در مختصات لگاریتمی ترسیم شود (مشابه شکل ۶-۳) مقدار  $H$  نصف شیب خط این نمودار است. مقدار بعد فرکتال سطح از رابطه (۸-۳) محاسبه می‌شود (Odling, 1994).

$$D = 3 - H \quad (8-3)$$



شکل ۳-۶: برازش خطی بر داده‌های لگاریتمی واریوگرام

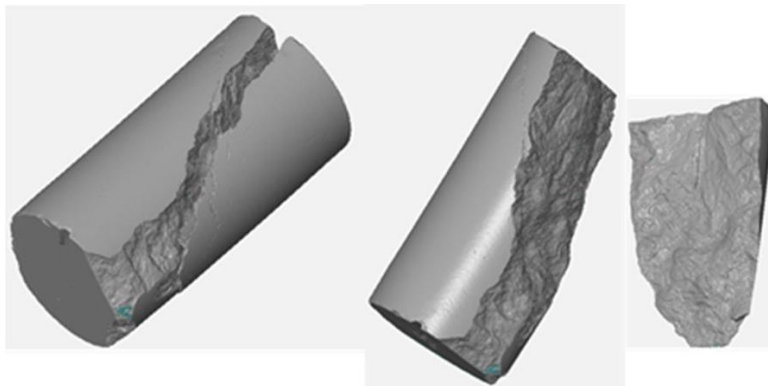
جدول ۲-۳ مقادیر بعد فرکتال برای نمونه سنگ‌ها را نشان می‌دهد. محاسبه عدد فرکتال به نسبت روش‌های آماری دشوارتر است اما با توجه به مستقل بودن مقادیر این روش از فاصله نمونه‌گیری و تخمین سه بعدی زبری سطح شکستگی، روش فرکتال به نسبت روش‌های تجربی و آماری، درک مناسب‌تری از میزان زبری سطح شکستگی ارائه می‌دهد.

جدول ۲-۳: مقادیر تخمین‌زده شده برای زبری با استفاده از روش فرکتال

D	$\gamma(0)$	H	شماره نمونه
۲/۴۰۲۱	-۰/۴۲۷۷	۰/۵۹۷۸	F۱-۱
۲/۳۰۷۰	-۰/۳۷۶۱	۰/۶۹۳۰	F۲-۱
۲/۳۴۷۴	-۰/۶۱۸۲	۰/۶۵۲۰	F۱-۲
۲/۳۴۶۱	-۰/۶۰۹۱	۰/۶۵۳۹	F۲-۲
۲/۳۶۹۶	-۰/۳۲۹۱	۰/۶۳۰۳	F۱-۳
۲/۳۷۸۳	-۰/۲۷۷۲	۰/۶۲۱۷	F۲-۳
۲/۵۰۶۵	۰/۲۱۳۳	۰/۴۹۳۵	F۱-۴
۲/۵۹۵۸	۰/۲۶۵۴	۰/۴۰۴۲	F۲-۴

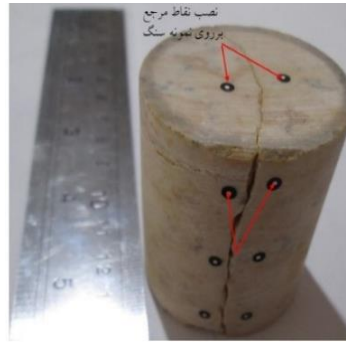
### ۵.۳ اندازه‌گیری بازشدگی

در این پژوهش با استفاده از داده‌های رقومی موجود از شکستگی، توزیع دهانه بازشدگی هندسی شکستگی تخمین زده شده است. برای تخمین بازشدگی شکستگی سنگ داشتن توپوگرافی دو سطح شکستگی لازم است ولی کافی نیست زیرا علاوه بر مختصات هر دیواره باید از مکان نسبی هر یک از دیواره‌های نسبت به یکدیگر (در شکستگی بسته) اطلاعات موجود باشد. برای بدست آوردن این ملزومات نخست سطح بیرون شکستگی در حالت بسته شکستگی ( $\sigma_n=0$ ) رقومی‌سازی می‌شود و سپس هر یک از سطوح شکستگی به صورت مجزا رقومی‌سازی می‌گردد. بنابراین سه مدل دیجیتالی برای شکستگی سنگی ایجاد می‌گردد (شکل ۷-۳).



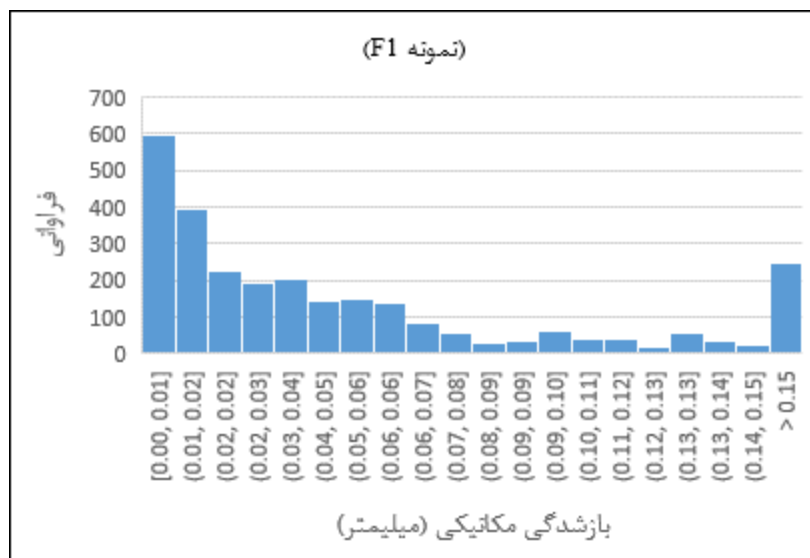
شکل ۷-۳: نیازمندی‌ها برای تعیین بازشدگی شکستگی نمونه F1

قبل از رقومی‌سازی، برای تبدیل اندازه‌گیری مجزا به یک سیستم مختصات مشترک نقاط مرجع در اطراف نمونه درج می‌شود (مطابق شکل ۸-۳). در ادامه مدل‌های رقومی شده از دو سطح نمونه شکستگی با استفاده از نقطه‌های مرجع مشترک در سه مدل، به مدل پیرامونی شکستگی بسته منتقل می‌گردد. سپس محورهای مختصات به نحوی که مناسب‌ترین صفحه  $x-y$  به در داخل شکستگی با محور مثبت  $z$  به سمت بالا و مرکز بر روی محور نمونه قرار می‌گیرد. فاصله بین دو سطح شکستگی، به صورت عمود بر صفحه  $x-y$  به صورت بازشدگی مکانیکی تعریف می‌شود.

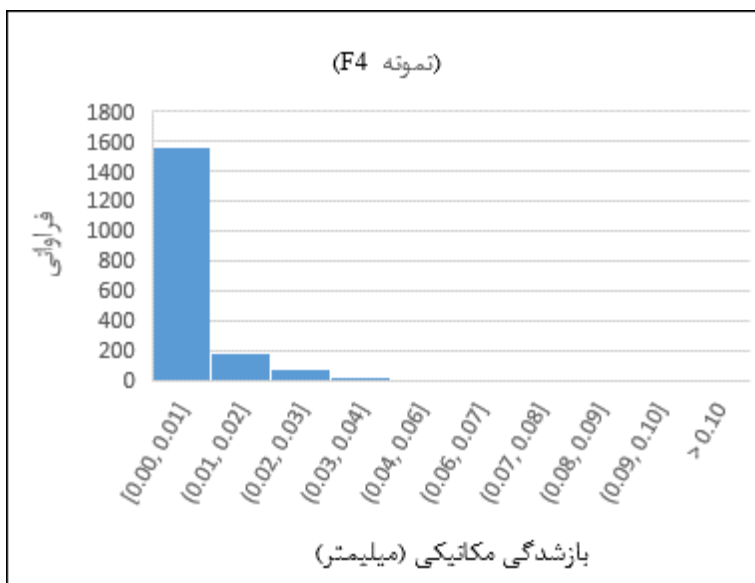
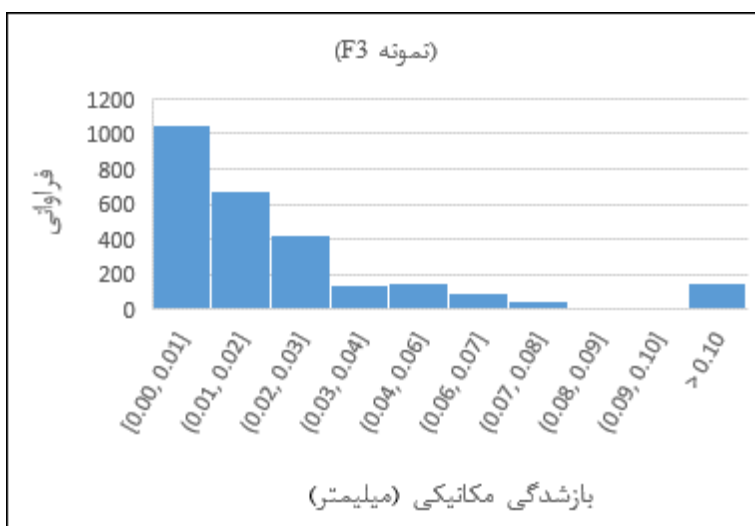
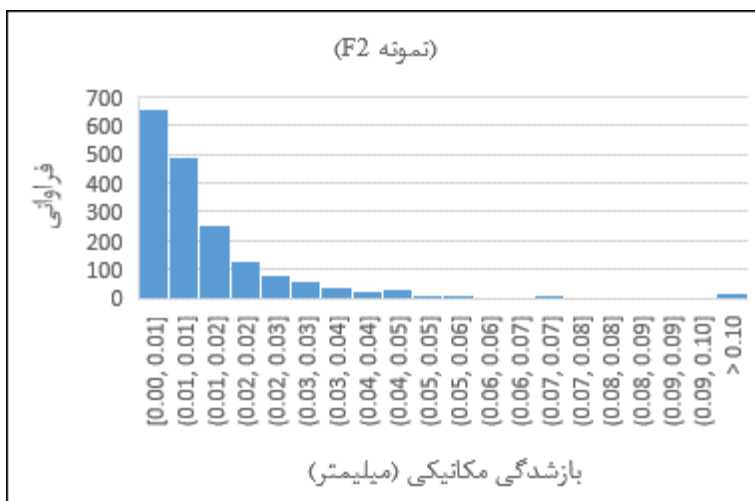


شکل ۳-۸: نصب نقاط مرجع بر روی نمونه سنگ

شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ توزیع فروانی دهانه بازشدگی برای نمونه شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است با استفاده از این روش به خوبی می‌توان توزیع بازشدگی مکانیکی شکستگی را بدست آورد. همچنین، نمونه F1 بیشترین و F4 کمترین مقدار دهانه بازشدگی مکانیکی در بین نمونه‌ها دارند.



شکل ۳-۹: توزیع پراکندگی بازشدگی در نمونه F1



شکل ۳-۱۰: توزیع پراکندگی بازشدگی در نمونه F3, F4



این شیوه می‌تواند برای تخمین مقدار دهانه بازشدگی شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بکار آید، به این صورت که مقدار دهانه بازشدگی برای نمونه مغزه حفاری شده محاسبه شود و آن به شکستگی موجود در توده‌سنگ تعمیم داده شود.

### ۶.۳ انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوره<sup>۱</sup>

از آنجا که آزمایش جریان سیال در این تحقیق به صورت هیدرومکانیکی انجام می‌شود، به منظور شناخت بهتر ابتدا باید خصوصیات مکانیکی ماده سنگ اندازه‌گیری شود. با هدف شبیه‌سازی شرایط تنش سه محوره که در اعماق زمین به سنگ وارد می‌گردد، از آزمایش مقاومت فشاری سه محوره استفاده می‌شود.

متداول‌ترین روش اعمال تنش سه محوری در آزمایشگاه به نمونه سنگ، استفاده از سلول هوک<sup>۲</sup> است که در آن ضمن اعمال یک تنش جانبی، نمونه تحت تنش قائم قرار می‌گیرد. با انجام این آزمایش تحت مقادیر مختلف تنش جانبی، پوش گسیختگی سنگ ترسیم و بر اساس آن پارامترهای مقاومت سنگ (نظیر پارامترهای  $\Phi$  و  $C$ ) تعیین می‌گردد (ترابی، ۱۳۸۱).

### ۶.۳.۱ نمونه مغزه مورد آزمایش

چهار نمونه سنگ آهک استوانه‌ای شکل از مغزه سنگ با قطر ۵۴ میلی‌متر (مغزه  $NX$ ) با نسبت طول به قطر ۲ انتخاب شده است (جدول ۳-۳ و شکل ۳-۱۱). مطابق شکل ۴-۱۲ دو انتهای نمونه سنگ به موازات یکدیگر و عمود بر محور طولی نمونه بریده شده و تا  $\pm 0.1$  میلی‌متر صیقل داده شود تا کاملاً صاف شود. با توجه به این که فشارهای جانبی به کمک روغن هیدرولیک به نمونه سنگ اعمال می‌شود،

1- Triaxial Compressive Test

2- Hoek cell

استفاده از پوشش لاستیکی مخصوص برای جلوگیری از نفوذ روغن به داخل خلل و فرج سنگ ضروری است.

جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی چهار نمونه

نمونه	طول نمونه سنگ (cm)	قطر نمونه سنگ (mm)	نسبت طول به قطر	وزن مخصوص نمونه سنگ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
S1	۱۱/۳	۵۴	۲/۰۹۲	۲/۷۱۸
S2	۱۰/۸۴	۵۴	۲/۰۰۷	۲/۷۱۴
S3	۱۱/۵	۵۴	۲/۱۲۹	۲/۷۱۴
S4	۱۱/۰۱	۵۴	۲/۰۳۸	۲/۷۲۰



نمونه S4



نمونه S3



نمونه S2



نمونه S1

شکل ۳-۱۱: چهار نمونه سنگ انتخاب شده برای آزمایش مقاومت سه محوره



ب



الف

شکل ۳-۱۲: الف) آماده سازی دو انتهای نمونه (ب) پوشش پلاستیکی مورد استفاده برای اطراف نمونه

### ۳.۶.۲ انجام آزمایش سه محوره

با توجه به عدم وجود دستگاه آزمایش سه محوره در دانشگاه صنعتی شاهرود در زمان انجام این آزمایش‌ها، آزمایش‌ها سه محوره در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تهران انجام شده است. مجموعه تجهیزات آزمایش شامل: دستگاه آزمایش فشار سه محوری، سامانه اعمال و کنترل فشار محوری، سامانه فشار جانبی و سیستم جمع آوری داده‌ها است. در شکل ۳-۱۳ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش آورده شده است. فشارهای جانبی ۲، ۴، ۶، ۱۰ مگاپاسکال برای این آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است.



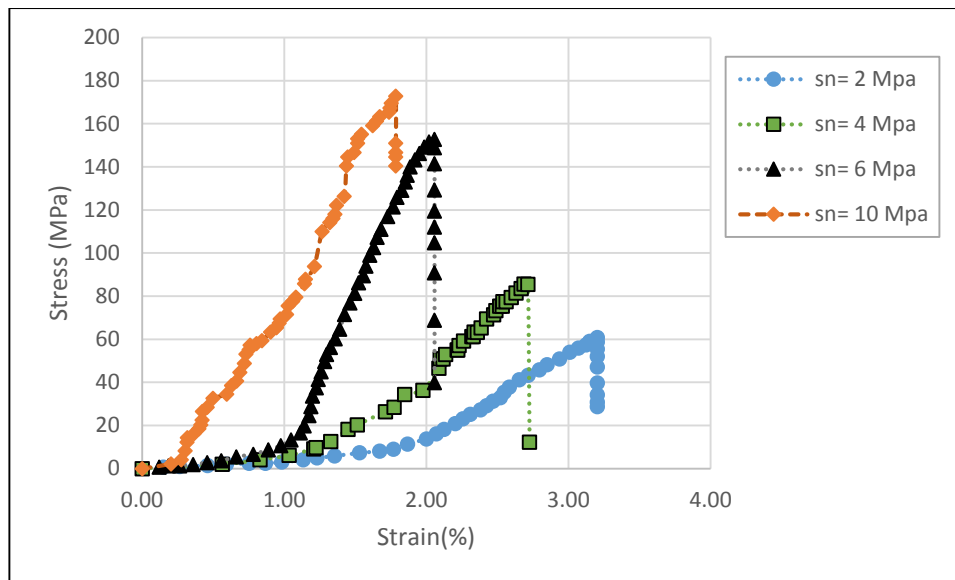
شکل ۳-۱۳: (الف) دستگاه آزمایش فشار سه محوری؛ (ب) سلول آزمایش سه محوره

### ۳.۶.۳ نتایج آزمایش سه محوره

نتایج آزمایش سه محوره برای چهار نمونه در جدول ۳-۴ و شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: نتایج آزمایش سه محوره برای چهار نمونه

شماره نمونه	تنش جانبی (MPa)	تنش محوری حداکثری (MPa)	کرنش محوری حداکثری (%)
S۱	۲	۶۰/۹۰	۳/۲
S۲	۴	۸۵/۵۰	۲/۷۱۵
S۳	۶	۱۵۳/۰۰	۲/۰۶
S۴	۱۰	۱۷۲/۸۶	۱/۷۸۴



شکل ۳-۱۴: نتایج آزمایش سه محوره

تعقر ابتدایی در نمونه S<sub>3</sub> به عمدتاً به دلیل ناموازی بودن دو سطح ابتدایی در این نمونه سنگ است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مطابق با شکل ۳-۱۴ با افزایش فشارهای محصورکننده مقاومت نمونه سنگ‌ها افزایش پیدا می‌کند. همانگونه که ملاحظه می‌شود افزایش مقاومت به ویژه در سطوح پایین تنش جانبی چشم‌گیر است به عبارت دیگر با افزایش نسبتاً جزئی فشارهای جانبی افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت نهایی سنگ ایجاد می‌شود. تغییرات مدول تغییر شکل پذیری نمونه سنگ هم از نکات قابل توجه است که با افزایش تنش جانبی مدول تغییر شکل پذیری نمونه سنگ افزایش می‌یابد. در شکل ۳-۱۵ تصویر نمونه سنگ‌ها پس از گسیختگی نشان داده شده است.

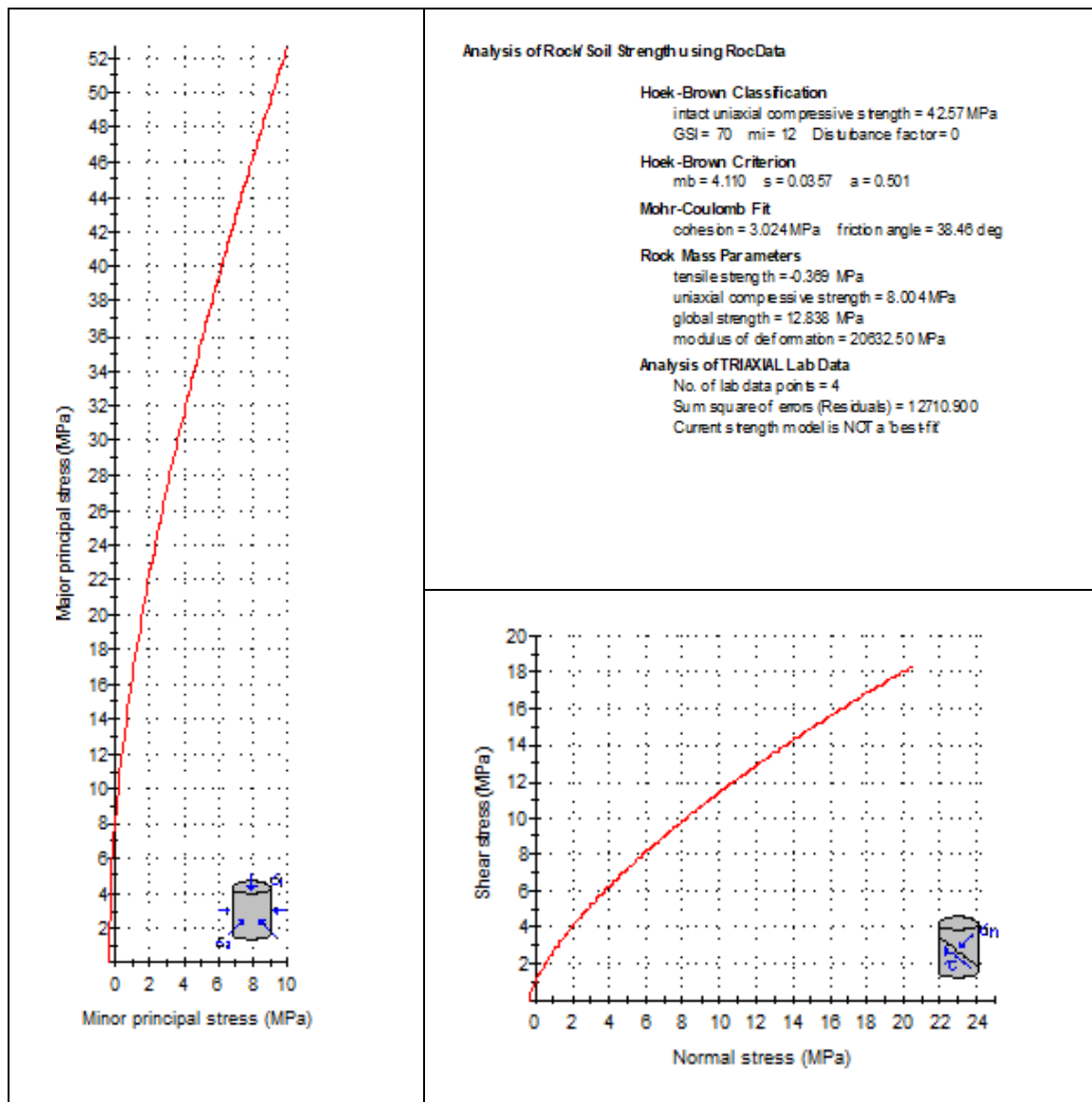


شکل ۳-۱۵: نمونه سنگ‌ها پس از آزمایش

برای تعیین خواص توده‌سنگ ساختمانی، از اطلاعات مربوط به طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ ساختمانی استفاده شده است. با توجه به بلوکی بودن توده‌سنگ، غیر هوازده بودن ماده سنگ و با فرض حفاری با انفجار کنترل شده، با استفاده از گراف آورده شده در پیوست مقدار  $GSI$  مربوط به توده‌سنگ برابر با ۷۰ در نظر گرفته شده است. با وارد کردن نتایج آزمایش سه محوره با بدست آوردن پارامترهای  $S$  و  $m$  توده‌سنگ (معیار شکست هوک و براون) از روی این مقدار و مقایسه آن با معیار شکست موهر-کولومب خواص توده‌سنگ را می‌توان تعیین کرد. این روند در نرم افزار RocData انجام می‌شود. در شکل ۳-۱۶، خصوصیات تخمینی این نرم افزار برای توده‌سنگ و در جدول ۳-۵، خواص معادل توده‌سنگ آورده شده است.

جدول ۳-۵: خصوصیات ژئوتکنیکی معادل توده‌سنگ

مقاومت کششی (MPa)	مدول تغییرشکل پذیری (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (MPa)
-۰/۳۶۹	۲۰/۶	۸	۳۸/۴۶	۳/۰۲۴



شکل ۳-۱۶: تعیین خواص توده سنگ با استفاده از معیار شکست هوک و براون و موهر-کولومب

### ۷.۳ آزمایش جریان سیال

با هدف شناخت رفتار هیدرولیکی شکستگی سنگ در این بخش آزمایش جریان سیال در شکستگی آورده شده است. برای انجام این آزمایش با توجه به تجهیزات موجود، از دستگاه سیلاب زنی مغزه<sup>۱</sup> موجود در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. هرچند این دستگاه برای

1- Core Flood

اندازه‌گیری ضریب بازیافت نفت طراحی شده است ولی تنها دستگاه موجود برای انجام آزمایش هیدرولیکی در دانشگاه است. در ادامه نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، تجهیزات مورد استفاده در آزمایش، نحوه انجام آزمایش و نتایج آزمایش تشریح شده است.

### ۳.۷.۱ آماده‌سازی نمونه تک درز طبیعی

برای انجام تمامی آزمایش‌ها در این رساله، از تعدادی مغزه سنگ آهک استفاده شده است. همان‌طور که جنبک و روتمن<sup>۱</sup> (۱۹۹۹) مشخص کرده‌اند بیشتر شکستگی‌های موجود در اعماق زمین به صورت کاملاً بسته است (Genabeek and Rothman (1999). از سوی دیگر انتظار می‌رود شکستگی‌ها در دیواره‌های مجاور مغار سنگی بسته باشند، بنابراین در این پژوهش نمونه مغزه‌های انتخاب شده دارای شکستگی طبیعی و به صورت جور شده هستند. شکل ۳-۱۷ مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه سنگ برای آزمایش جریان سیال را نشان می‌دهد. با توجه به این که قطر نمونه مغزه‌های اخذ شده (۶۵ میلی‌متر) از قطر سلول آزمایش در دستگاه (۳۸ میلی‌متر) بزرگ‌تر بود در ابتدا باید از نمونه‌ها مغزه‌گیری مجدد انجام گیرد (تصویر الف و ب در شکل ۴-۱۸). سپس ابتدا و انتهای نمونه با استفاده از دستگاه برش موجود در آزمایشگاه مکانیک سنگ صاف و صیقلی شده است تا میزان انحراف آنها از محور نمونه کمتر از ۰/۰۰۲ رادیان (براساس استاندارد ISRM) گردد (تصویر ج و د در شکل ۴-۱۸).

اندازه‌گیری دقیق مشخصات هندسی نمونه سنگ‌ها پس از آماده‌سازی اولیه انجام شده است. از آنجایی که مقیاس مطالعه در این پژوهش آزمایشگاهی است، اندازه‌گیری‌های توسط دستگاه‌های دقیق و تا دو رقم اعشار انجام شده است بنابراین برای یافتن ابعاد نمونه‌ها از کولیس استفاده شده است. اطلاعات مربوط به هر مغزه در جدول ۳-۶ آورده شده است.

1- Genabeek and Rothman





(ب)



(الف)



(د)



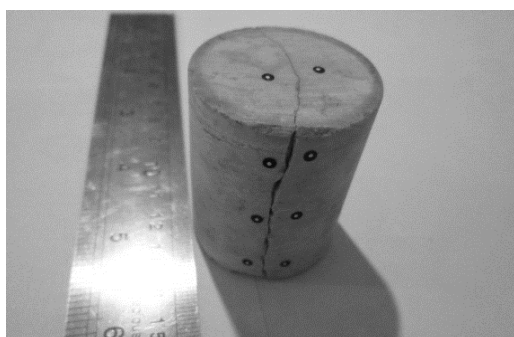
(ج)

شکل ۳-۱۷: مراحل آماده سازی نمونه سنگ برای آزمایش جریان سیال

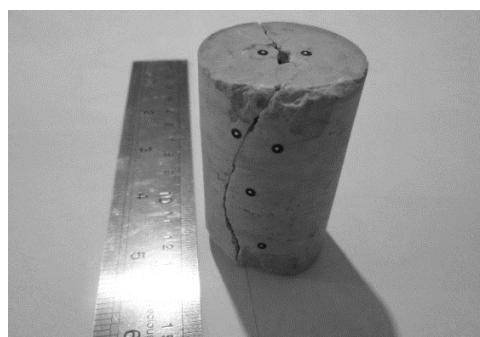
جدول ۳-۶: مشخصات هندسی نمونه‌ها

طول مغزه (cm)	قطر (cm)	نوع شکستگی	نمونه
۶/۲۶	۳/۸۱	طبیعی	F1
۴/۷۵	۳/۸۱	طبیعی	F2
۶/۳۴	۳/۸۱	طبیعی	F3
۶/۱۵	۳/۸۱	طبیعی	F4

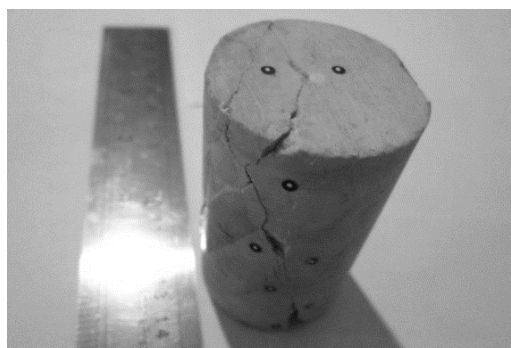
نمونه مغزه‌های مورد آزمایش دارای شکستگی طبیعی است که با توجه به ناتروا بودن ماده سنگ، تنها مسیر عبور سیال از این نمونه همین شکستگی است. شکل ۳-۱۸ نمونه سنگ‌های که در آزمایش جریان سیال بکار رفته نشان می‌دهد.



نمونه F1



نمونه F2



نمونه F3



نمونه F4

شکل ۳-۱۸: نمونه مغزه‌های مورد آزمایش

### ۲.۷.۳ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

با هدف شبیه‌سازی جریان سیال در محیط سنگی در اعماق زمین از دستگاه سیلاب‌زنی موجود در آزمایشگاه سنگ و سیال در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است، این دستگاه قادر است در حین جریان سیال در محیط سنگی جانبی را به نمونه سنگ اعمال نماید. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی که توسط دستگاه سیلاب‌زنی مغزه انجام می‌شود اطلاعات بسیار ارزشمندی راجع به تراوایی نسبی، تراوایی

مطلق از نمونه مغزه‌های بدست آمده از سازندهای مورد مطالعه در اختیار ما قرار می‌دهد. اجزای این دستگاه در ادامه آمده است:

- پمپ فشار قوی و دقیق<sup>۱</sup>
- سلول آزمایش
- محفظه‌های پمپ سیال<sup>۲</sup>
- مانیتور و ابزار مشاهده فشار
- گرمخانه<sup>۳</sup>
- استوانه مدرج جهت جمع آوری
- مایعات خروجی
- منبع تولید فشار پشت مغزه<sup>۴</sup>

در شکل ۳-۱۹ نمای کلی دستگاه را مشاهده می‌شود و همچنین در شکل ۳-۲۰ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش آورده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۹: نمای کلی از تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش جریان سیال

- 1- High Pressure Precision Pump
- 2- Fluid Accumulators
- 3- Constant Temperature Oven
- 4- Back Pressure Regulator



(ج)



(ب)



(الف)



(و)



(ه)



(د)

شکل ۳-۲۰: (الف) پمپ تزریق روغن، (ب) پمپ فشار قوی و دقیق، (ج) مغزه نگهدار و المنت گرم کننده سیال، (د) محفظه پمپ سیال، (ه) مخزن گاز نیتروژن برای ایجاد فشار پشت مغزه (و) لاستیک نگهدارنده، مغزه و اسپیسر

### ۳.۷.۳ نحوه انجام آزمایش

قبل از انجام آزمایش، نمونه سنگ در داخل غلاف لاستیکی مخصوصی قرار داده می‌شود، این غلاف لاستیکی به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد که از ورود روغن هیدرولیک (تامین کننده تنش جانبی) به داخل نمونه سنگ جلوگیری کند. در دو انتهای نمونه سنگ از صفحات فولادی با شیارهای مشخص قرار داده تا سیال با توزیع یکنواخت در شکستگی سنگ جریان پیدا کند. با توجه به طول نمونه تعدادی اسپیسر با طول مشخص در داخل غلاف لاستیک گذاشته می‌شود تا کاملاً پر شود سپس نمونه در داخل سلول آزمایش تعبیه می‌گردد (شکل ۳-۲۱). پس از قراردادن سلول در دستگاه و اطمینان از پر بودن مسیرهای جریان با آب مقطر، لازم است تا نمونه سنگ به همراه شکستگی تحت شرایط طبیعی زمین قرار گیرد، برای تامین فشار جانبی در اطراف مغزه از یک پمپ هیدرولیکی دستی جهت تزریق روغن هیدرولیک در محفظه دربرگیرنده نمونه سنگ استفاده می‌شود. این افزایش فشار روغن موجب

می‌شود تا لاستیک نگهدارنده نمونه کاملاً به نمونه بچسبد و مانع فرار سیال از مرز بین نمونه و لاستیک گردد.



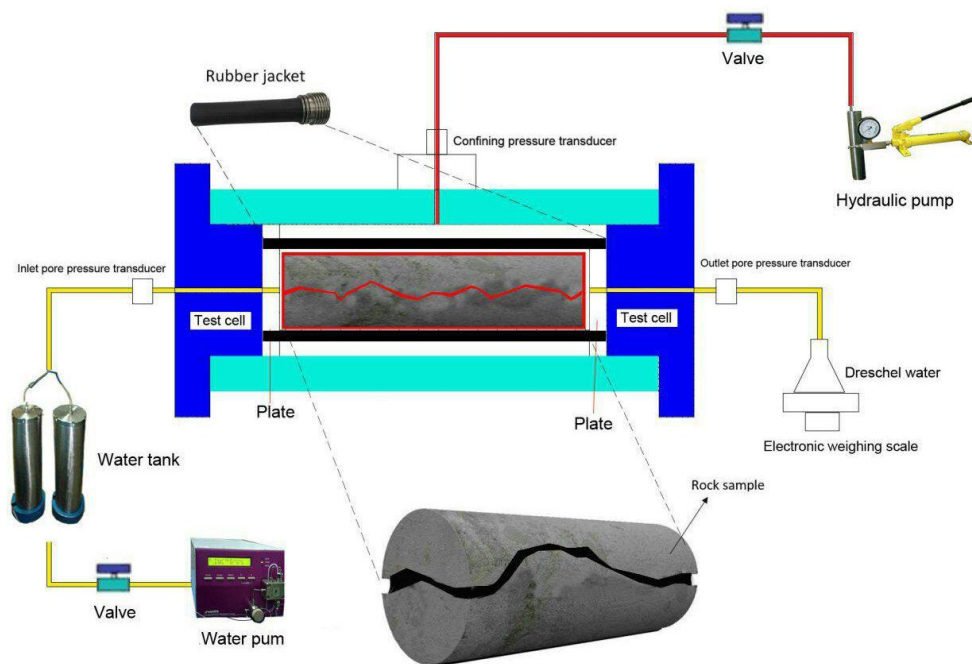
شکل ۳-۲۱: تعبیه نمونه داخل غلاف لاستیک نگهدارنده و سلول آزمایش

پس از رساندن تنش جانبی به مقدار از پیش تعیین شده، شیر ورودی روغن بسته می‌شود. در گام بعدی سیال با نرخ جریان ثابت به نمونه سنگ تزریق می‌شود به این منظور آب مقطر با استفاده از پمپ آب (با نرخ جریان مشخص) به پشت پیستون‌های محفظه سیال تزریق می‌شود. پمپ، آب مقطر را مکش کرده و آن را به پشت این محفظه‌ها تزریق می‌کند با این ترتیب پیستون به حرکت در آمده و با باز کردن شیرهای بالا و پایین محفظه، سیال به شکستگی تزریق می‌شود. پس از آن که جریان سیال در مغزه سنگ به حالت پایدار و ثابتی رسید فشار در ابتدا و انتهای نمونه سنگ با استفاده از سنسور فشار الکتریکی ثبت می‌گردد. اختلاف فشار در سنسورهای خروجی و ورودی در حالی که آب در شکستگی در جریان است معادل افت فشار جریان در طول شکستگی است. در حین آزمایش سلول آزمایش به صورت افقی قرار داده می‌شود تا اثر جاذبه خنثی شود.

این روند با افزایش نرخ جریان در محدوده نرخ جریان از  $0/6$  میلی‌لیتر بر دقیقه شروع و تا  $25$  میلی‌لیتر بر دقیقه تحت یک فشار جانبی ثابت ادامه می‌یابد، سپس با استفاده از پمپ هیدرولیکی فشار جانبی افزایش می‌یابد تا به مقادیر از پیش تعیین شده رسانده شود.



سیال خروجی از مغزه درون استوانه مدرج ریخته شده و مقدار آن به دقت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای تامین فشار پشت مغزه در حین آزمایش از مخزن گاز هلیوم استفاده می‌شود که محل اعمال این فشار جهت عکس فشار تزریق و در پشت مغزه می‌باشد. در مرحله بعد، دبی سیال افزایش یافته و سپس از روی فشارسنج‌های دستگاه، تغییرات فشار ورودی و خروجی به همراه فشار جانبی یادداشت می‌شود. این افزایش دبی و ثبت فشار ورودی و خروجی را در چند مرحله انجام می‌شود تا بتوان به نتایج دقیق‌تری رسید. در شکل ۳-۲۲ شماتیک نحوه انجام آزمایش هیدرولیکی نشان داده شده است.

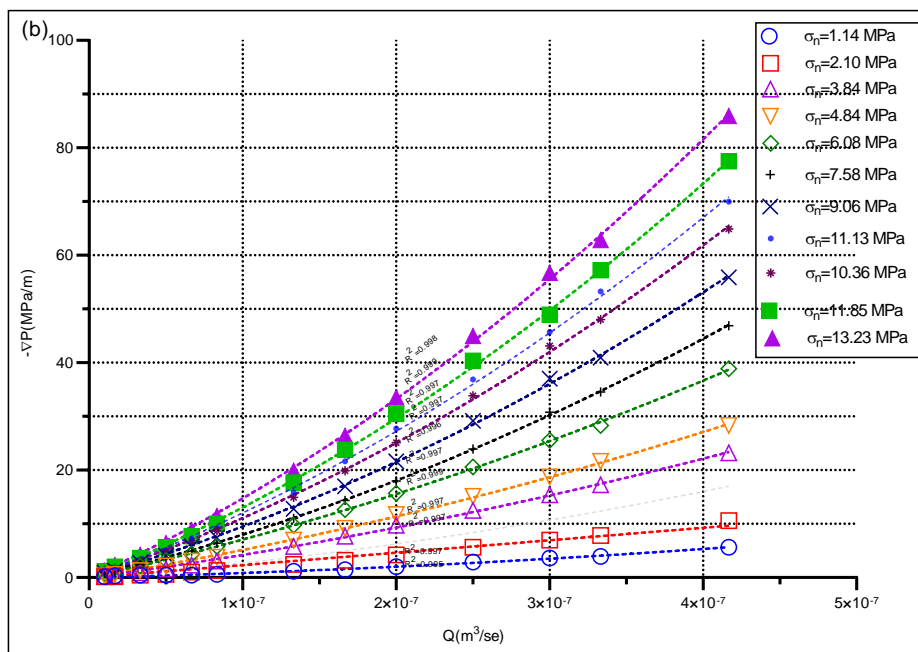
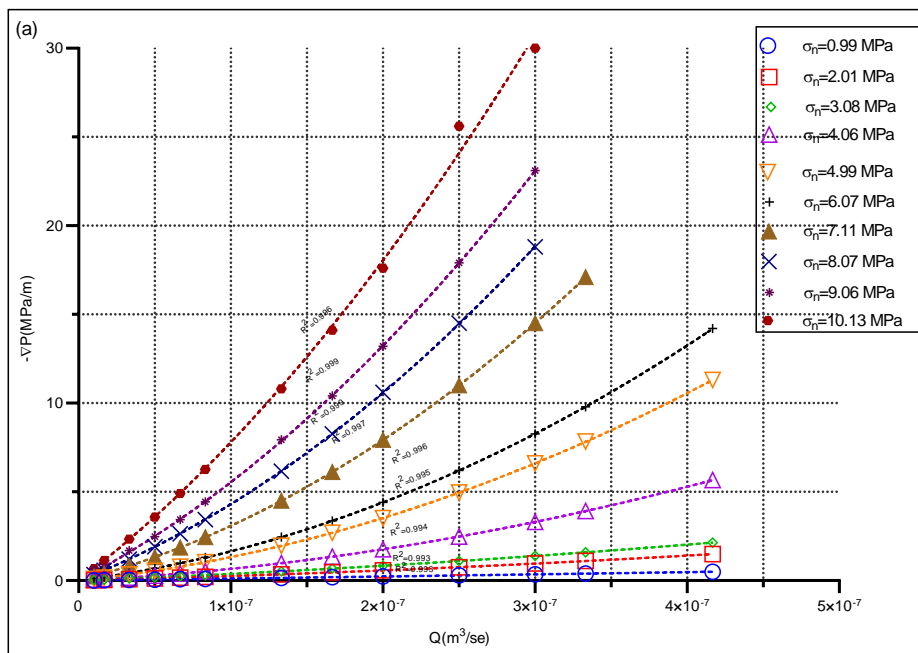


شکل ۳-۲۲: شماتیک نحوه انجام آزمایش هیدرولیکی

### ۴.۷.۳ نتایج آزمایش‌ها

با توجه به نفوذپذیری بسیار کم ماده سنگ مورد مطالعه ( $10^{-17} - 10^{-18} \text{ m}^2$ ) فرض شده که ماده سنگ نفوذناپذیر است و تمام سیال تنها از شکستگی موجود در نمونه سنگ عبور خواهد کرد. در تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص آب  $998/2$  کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته دینامیکی آن  $0/001$  پواز به عنوان ویژگی‌های آب در نظر گرفته شده است. آزمایش جریان در دمای اتاق و تقریباً  $25$  درجه

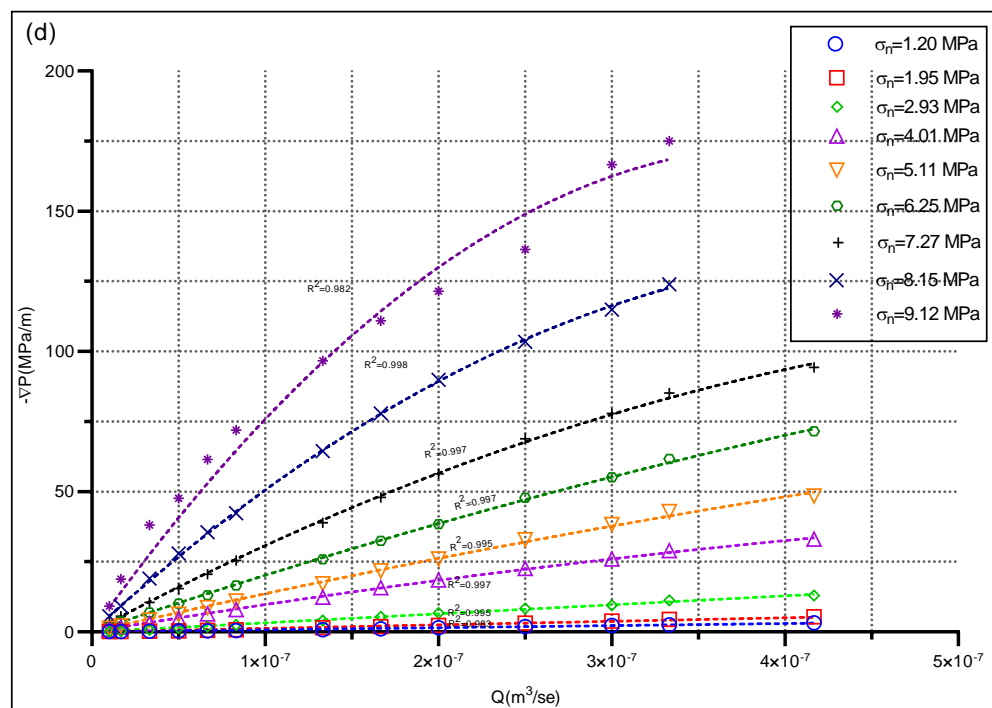
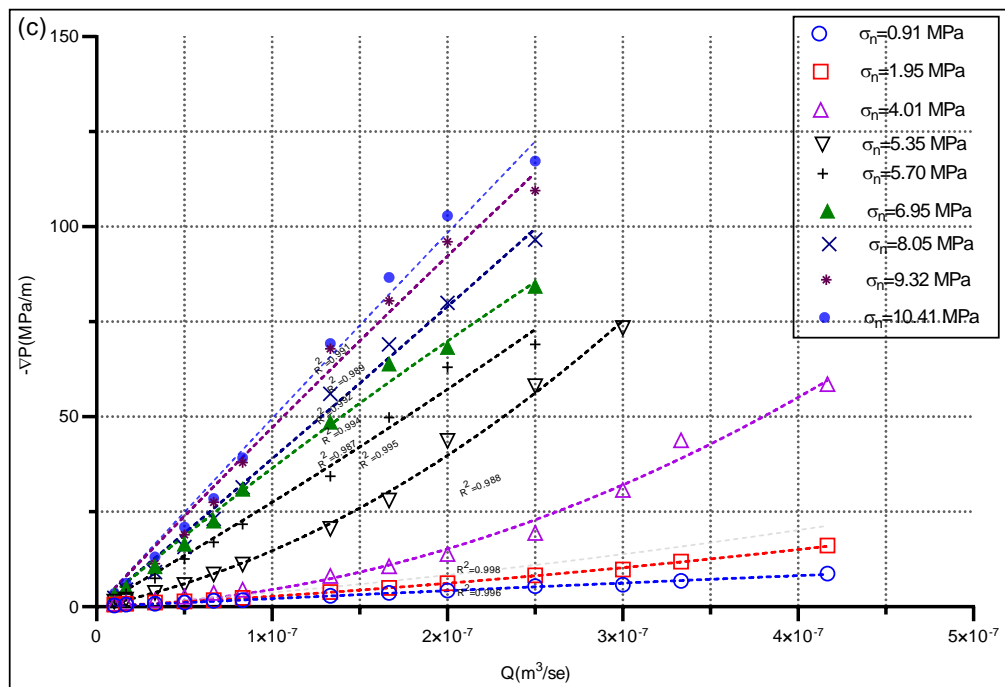
سانتی گراد انجام شده است تا دما بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی شکستگی تاثیر نگذارد. در شکل ۲۳-۳ و شکل ۲۴-۳، داده‌های آزمایش جریان سیال به صورت گرادیان فشار در مقابل دبی حجمی جریان تحت تنش‌های جانبی متفاوت نشان داده شده است. گرادیان فشار از اختلاف مقادیر فشار در ورودی و خروجی شکستگی تقسیم بر طول نمونه سنگ بدست آمده است ( $\nabla P = (P_i - P_o) / L$ ).



شکل ۳-۲۳: تغییرات گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال تحت تنش جانبی مختلف به همراه برازش

آماری برای رابطه فورچیهیمر؛ نمودار (a) برای نمونه F1، نمودار (b) برای نمونه F2





شکل ۳-۲۴: تغییرات گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال تحت تنش جانبی مختلف به همراه برازش

آماری برای رابطه فورچهمیر؛ نمودار (c) برای نمونه F3، نمودار (d) برای نمونه F4

## ۸.۳ تحلیل نتایج آزمایش‌ها

بعد از انجام آزمایش‌ها، الگوی رفتاری جریان ارزیابی می‌شود. همچنین رفتار هیدرومکانیکی شکستگی، عدد رینولدز بحرانی و ضریب اصطکاک شکستگی‌ها مطالعه شده و هریک از این موارد در ادامه آمده است.

### ۸.۳.۱ بررسی الگوی رفتاری جریان سیال

الگوی جریان به رابطه بین گرادیان فشار با نرخ جریان سیال اطلاق می‌گردد که در تحلیل ماکروسکوپی رفتار هیدرولیکی شکستگی سنگ از اهمیت خاصی برخوردار است. اگر رابطه کلی  $\nabla P = f(Q^n)$  را برای تغییرات گرادیان فشار نسبت به نرخ جریان در نظر گرفته شود، تعیین تابع و توان نرخ جریان مهم است. در این بخش الگوی رفتاری جریان آب در شکستگی سنگی مطالعه شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۲۳ و شکل ۳-۲۴ ملاحظه می‌شود، گرادیان فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال و تنش جانبی وارد بر نمونه تغییر می‌کند البته برای سرعت‌های کم (نرخ جریان کمتر از  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}$ ) به صورت مستقل از تنش جانبی وارد بر نمونه سنگ رابطه بین گرادیان فشار و نرخ جریان خطی است اما با افزایش سرعت سیال (در نرخ جریان‌های بیشتر از  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}$ ) تنش جانبی در تغییرات گرادیان فشار تاثیر گذار است. در تنش جانبی‌های کم (برای نمونه  $F_1 = 2/73$  مگا پاسکال، برای نمونه  $F_2$  تا تنش جانبی  $3/10$  مگاپاسکال) تغییرات گرادیان فشار خطی به نسبت نرخ جریان به صورت خطی و در تنش جانبی بالاتر این رابطه غیرخطی است.

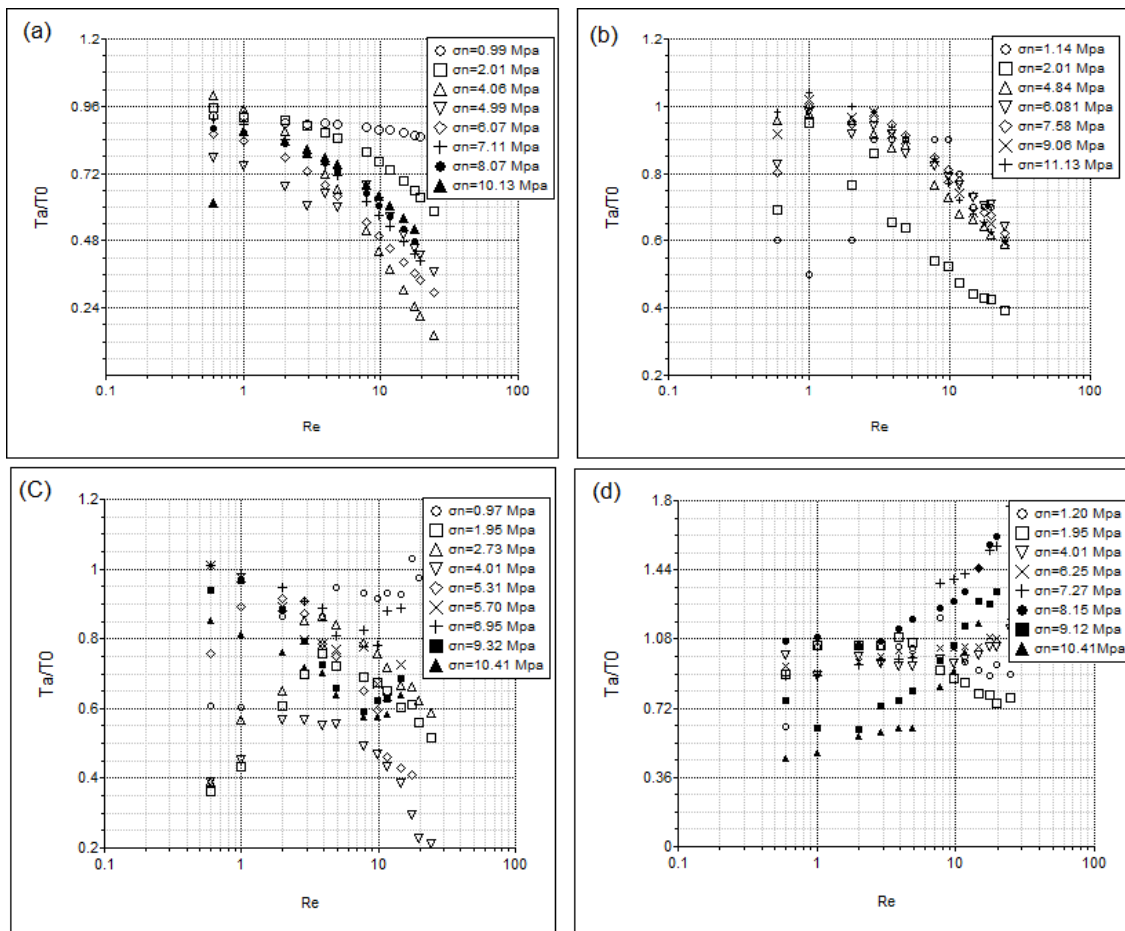
برای تحقیق بیشتر در این خصوص، شیوه آرایه شده توسط زیمرمن و همکاران (۲۰۰۴) به کار گرفته شده است. در این روش از مفهوم آب‌گذری استفاده شده است تا الگوی جریان تعیین گردد. به این ترتیب که نسبت آب‌گذری ظاهری (رابطه ۳-۹) به آب‌گذری واقعی (رابطه ۳-۱۰) به صورت آب‌گذری نرمالیزه شده تعریف و مقادیر آن برحسب عدد رینولدز ترسیم می‌شود (شکل ۳-۲۵).

برای جریان سیال در داخل شکستگی با عرض  $w$  آگذری ظاهری به صورت (۹-۳) تعریف می‌شود.

$$T_a = -\frac{\mu Q}{w \nabla P} \quad (9-3)$$

از آنجا که نسبت نرخ جریان سیال به گردایان فشار برای شرایط جریان خطی ثابت است،

مقدار آب‌گذری برای جریان خطی مقداری ثابت و مطابق رابطه (۱۰-۳) محاسبه می‌شود.



شکل ۳-۲۵: تغییرات آب‌گذری نرمالیزه شده به نسبت عدد رینولدز- (a) نمونه F1، (b) نمونه F2، (c) نمونه F3، (d) نمونه F4

$$T_0 = \frac{e^3}{12} \quad (10-3)$$

بنابراین اگر آب‌گذری نرمالیزه با افزایش عدد رینولدز ثابت باشد جریان خطی و در غیر این صورت جریان غیرخطی است. برای محاسبه آب‌گذری واقعی از شیب بخش خطی نمودار نرخ جریان به نسبت گرادیان فشار استفاده شده است.

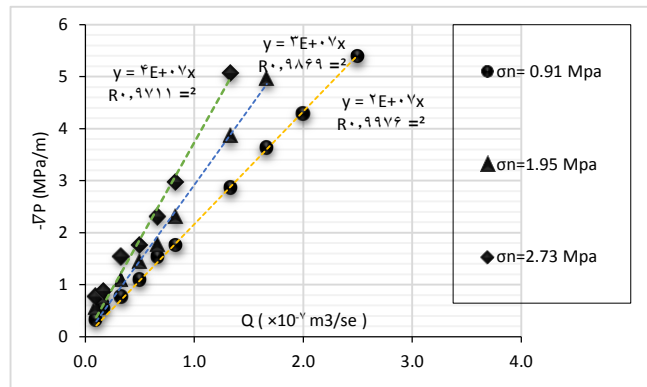
با توجه به شکل ۳-۲۵ برای تمامی نمونه‌ها براساس آب‌گذری نرمالیزه شده می‌توان نمودارها را در سه بخش تقسیم بندی کرد و در هر یک از این بخش‌ها الگوی جریان با بخش دیگر متفاوت است:

بخش اول - آب‌گذری نرمالیزه شده مستقل از تغییرات عدد رینولدز:

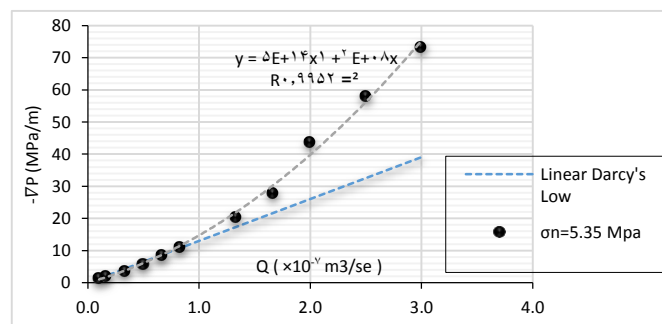
این بخش در محدوده عدد رینولدز بیشتر از ۱ تا عدد رینولدز بحرانی رخ داده است (نمونه ۱ تنش جانبی ۰/۹۹ مگاپاسکال) و نشان دهنده رابطه خطی بین گرادیان فشار با نرخ جریان برقرار بوده و قانون مکعب به درستی این گونه رفتار را برآورد می‌کند (شکل ۳-۲۶-الف).

بخش دوم - کاهش آب‌گذری نرمالیزه شده با افزایش عدد رینولدز:

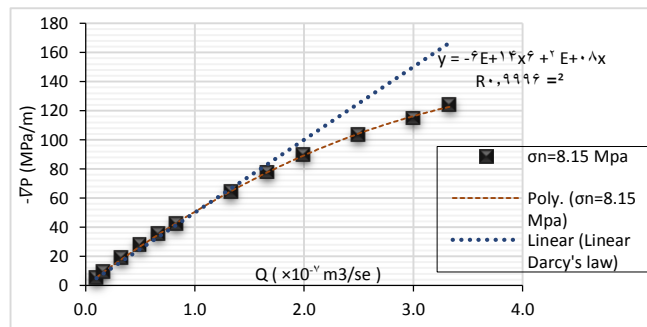
کاهش آب‌گذری نرمالیزه شده با افزایش عدد رینولدز نمایان‌گر این است که قانون مکعب آب‌گذری بیشتری به نسبت واقعیت پیش بینی نموده است. به عبارت دیگر جریان سیال از رفتار خطی منحرف شده و رفتار سیال غیرخطی است. در تنش جانبی میانی (شکل ۳-۲۶-ب) گرادیان فشار بیشتر از مقدار خطی در برابر نرخ جریان افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالای جریان سیال رفتار غیرخطی رخ می‌دهد. به طور خلاصه عمده‌ترین دلایل رخداد این جریان غیرخطی را می‌توان زبری سطح شکستگی، تغییر مسیر و تغییر مکرر بازشدگی در طول جریان سیال نام برد. این نوع رفتار غیرخطی توسط دو معادله فورچمپیر و ایزباش توصیف می‌شود و در مطالعات بسیاری گزارش شده است.



(الف): رفتار خطی (نتایج نمونه سه تحت تنش جانبی کمتر از ۳ مگاپاسکال)



(ب): رفتار غیرخطی با افت فشار بیشتر (نتایج نمونه شماره سه تحت تنش جانبی بیشتر از ۵/۳۵ مگاپاسکال)



(ج): رفتار غیرخطی با اتساع شکستگی (نتایج نمونه شماره ۴ تنش جانبی بیشتر از ۸/۱۵ مگاپاسکال)

شکل ۳-۲۶: سه نوع الگوی رفتاری برای جریان سیال در شکستگی (نتایج نمونه شماره ۳ تنش جانبی ۰/۹۱-

۵/۳۵؛ نتایج نمونه شماره ۴ تنش جانبی ۸/۱۵ مگاپاسکال)

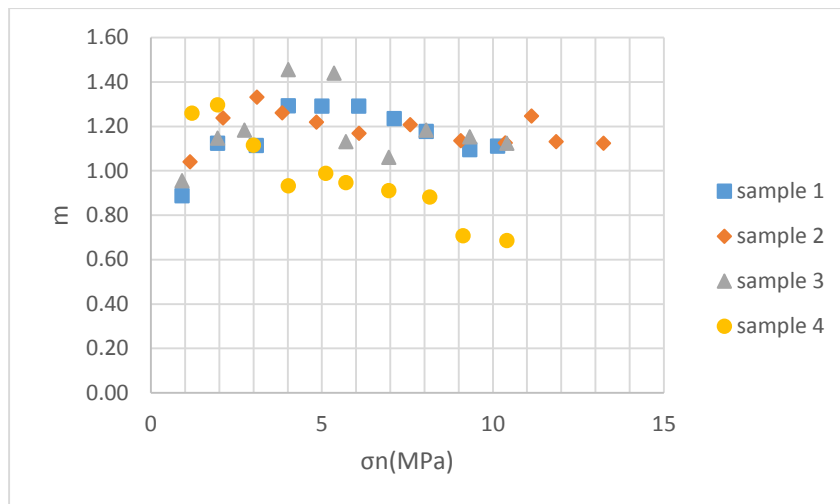
بخش سوم – افزایش آب‌گذری نرمالیزه شده با افزایش عدد رینولدز:

افزایش آب‌گذری نرمالیزه شده با افزایش عدد رینولدز هم نشان دهنده رفتار غیرخطی است ولی این رفتار برخلاف رفتار غیرخطی بخش قبل مقدار نرخ جریان با افزایش گرادیان فشار کاهش می‌یابد (شکل ۳-۲۶-ج). این الگوی جریان به رفتار توامان هیدرومکانیکی نسبت داده شده است. در تنش‌های جانبی بالا، میزان بازشدگی دهانه شکستگی خیلی کم می‌شود در نتیجه گرادیان فشار افزایش می‌یابد. با افزایش گرادیان فشار به ۵۰ تا ۶۰٪ فشار جانبی، تنش موثر بر نمونه سنگ کاهش یافته و در نتیجه شکستگی باز شده و مقدار جریان سیال بیشتری از خود عبور می‌دهد. این نکته حایز اهمیت است که این رفتار در نمونه‌های با بازشدگی بسیار کوچک رخ می‌دهد. مشابه این رفتار در آزمایش‌ها در مطالعات گذشته (Chen, Zhou, et al., 2015; Develi and Babadagli, 2015; Zhou et al., 2015) مشاهده شده است.

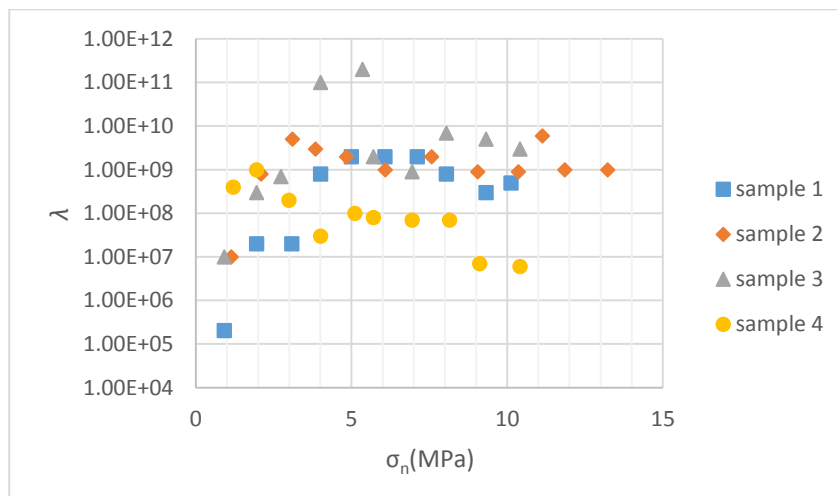
### ۲.۸.۳. بررسی قانون فورچه‌یمر و ایزباش

در این پژوهش رفتار غیرخطی جریان سیال با استفاده از دو رابطه فورچه‌یمر (۲-۱۰) و ایزباش (۲-۱۱) بررسی می‌شود و برای مقایسه توانایی آن‌ها در نشان دادن رفتار غیرخطی مطابقت داده شد. با توجه به این‌که ضریب تشخیص ( $R^2$ ) در این برازش‌ها بزرگتر از ۰/۸۹ است. بنابراین تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان‌دهنده توانایی هر دو معادله برای مدل‌سازی رابطه غیرخطی بین گرادیان فشار و نرخ جریان سیال در شکستگی‌های است.

پارامترهای ثابت هر دو معادله با استفاده از تحلیل رگرسیون برای هر شکستگی تحت تنش جانبی متفاوت تعیین شده است. برای معادله ایزباش، محدوده تغییرات  $m$  بین ۰/۷ و ۱/۵ با میانگین ۱/۱۳ و انحراف معیار ۰/۰۲۶ است. این پارامتر ارتباط شفاف با تغییر تنش جانبی را نشان نمی‌دهد (شکل ۳-۲۷). همچنین برای نمونه‌های با زبری متفاوت دامنه تغییر پارامتر  $m$  در معادله ایزباش یکسان بوده و مستقل و از زبری شکستگی مستقل است. برخلاف پارامتر  $m$ ، پارامتر  $\lambda$  به وضوح با افزایش تنش جانبی افزایش می‌یابد (شکل ۳-۲۸).



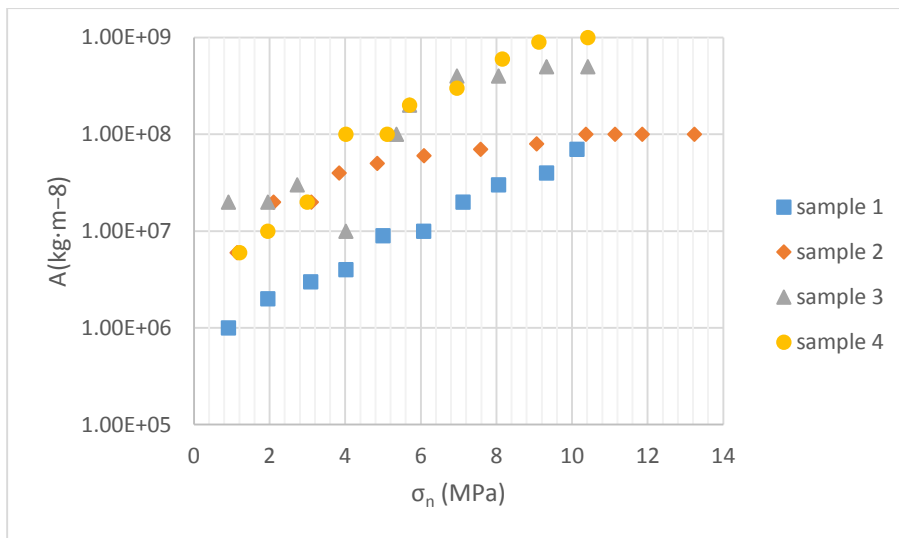
شکل ۳-۲۷: تغییرات پارامتر  $m$  با تنش جانبی برای نمونه‌های با زبری متفاوت



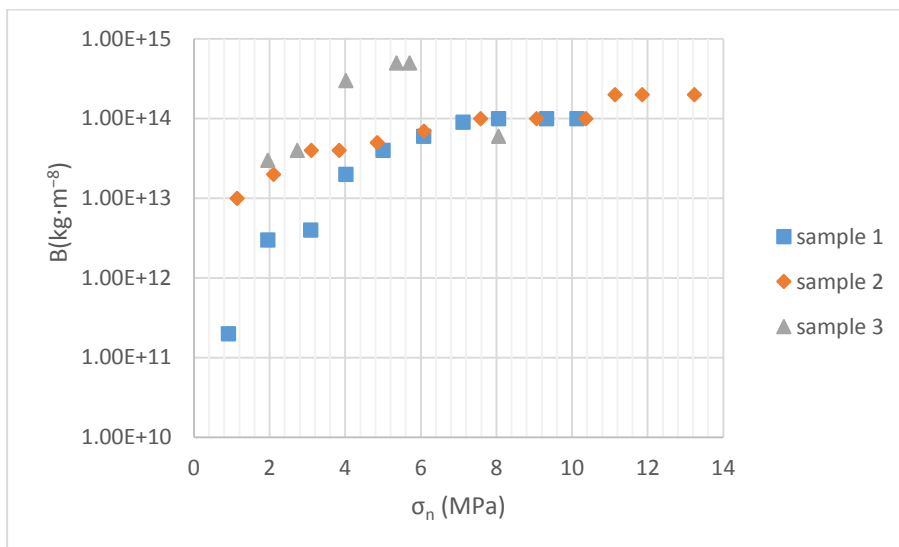
شکل ۳-۲۸: تغییرات پارامتر  $\lambda$  معادله ایزباش با تنش جانبی برای نمونه‌های با زبری متفاوت

تأثیر تنش جانبی بر ضریب خطی  $A$  و غیرخطی  $B$  معادله فورچهیمر به صورت مجزا در شکل ۳-۲۹

و شکل ۳-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۹-۳: تغییرات پارامتر A معادله فورچهیمر با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت



شکل ۳۰-۳: تغییرات پارامتر B معادله فورچهیمر با تنش جانبی برای نمونه‌ای با زبری متفاوت

داده‌های ارایه شده در شکل ۲۹-۳ و شکل ۳۰-۳ نشان می‌دهد که برای معادله فورچهیمر، هر دو پارامترهای (A, B) یک روند افزایش را با تنش جانبی را نشان می‌دهند. هرچند نرخ افزایش ضریب غیرخطی به تدریج محو می‌شود. بدلیل رخ دادن رفتار غیرخطی با اتساع شکستگی در نمونه ۴، مقادیر پارامتر B این نمونه منفی می‌شود بنابراین در شکل ۳۰-۳ آورده نشده است.



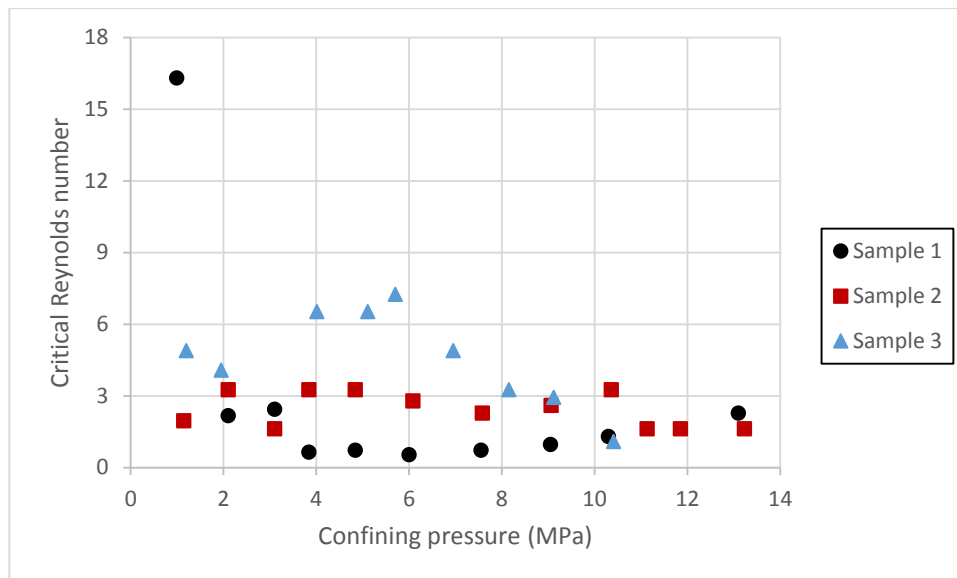
رشد پارامترهای (A, B) به دلیل بسته شدن شکستگی و کاهش بازشدگی در نتیجه افزایش تنش جانبی است. با کاهش بازشدگی پیچ و خم‌داری مسیر افزایش می‌یابد. این دو پارامتر برخلاف ضرایب معادله ایزباش به زبری شکستگی حساس بوده و برای نمونه‌های زبر مقادیر بیشتر دارند که نشان دهنده شروع زودتر رفتار غیرخطی در نمونه‌های زبر است.

با مقایسه تغییرات ضرایب این دو معادله به نسبت افزایش تنش جانبی و زبری می‌شود این‌گونه نتیجه گرفت که در بین معادلات ماکروسکوپی ارایه شده، معادله فورچهیمر به نسبت رابطه ایزباش عملکرد مناسب‌تری برای افزایش دقت مدل‌سازی جریان سیال در شکستگی سنگ را داراست.

### ۳.۸.۳ عدد رینولدز بحرانی

همان‌طور که در بخش ۲.۵، این رساله توضیح داده شد، عدد رینولدز بحرانی به عنوان معیاری برای ارزیابی الگوی جریان و شروع رفتار غیرخطی را در جریان سیال شناخته می‌شود. عدد رینولدز بحرانی در این آزمایش‌ها با استفاده از معادله (۲-۱۷) محاسبه شده است. در شکل ۳-۳۱ تغییرات عدد رینولدز بحرانی در برابر تنش جانبی برای نمونه ۱ و ۲ و ۳ آورده شده است. نمونه ۴ به دلیل نوع متفاوت رفتار غیرخطی در این شکل آورده نشده است.

عدد رینولدز بحرانی روند نزولی با افزایش تنش جانبی از ۱ تا ۱۳ مگاپاسکال نشان می‌دهد که بیانگر شروع زودتر رفتار غیرخطی تحت تنش جانبی است. به عبارت دیگر با افزایش تنش جانبی، سطح تماس دو دیواره شکستگی بیشتر شده و آب در مسیری پر پیچ و خم‌دار جریان می‌یابد بنابراین الگوی جریان غیرخطی می‌شود.



شکل ۳-۳۱: عدد رینولدز بحرانی در برابر تنش جانبی

با مقایسه عدد رینولدز بحرانی در بین نمونه‌های ۱ تا ۴، این نکته مشهود است که عدد رینولدز بحرانی با افزایش زبری شکستگی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، جریان سیال در شکستگی‌های زبر در مقایسه با شکستگی‌های صاف سریع‌تر از حالت خطی منحرف می‌شود. این با مطالعات پیشین انجام شده در این خصوص توافق خوبی دارد و عدد رینولدز بحرانی با افزایش زبری شکستگی کاهش می‌یابد.

### ۳.۸.۴ ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک جریان سیال یک پارامتر مهم است که باعث افت فشار جریان سیال در شکستگی‌های سنگ می‌شود. این پارامتر را می‌توان با توجه به اصل بقای جرم و توسط معادله زیر بیان

$$\nabla P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \quad (11-3)$$

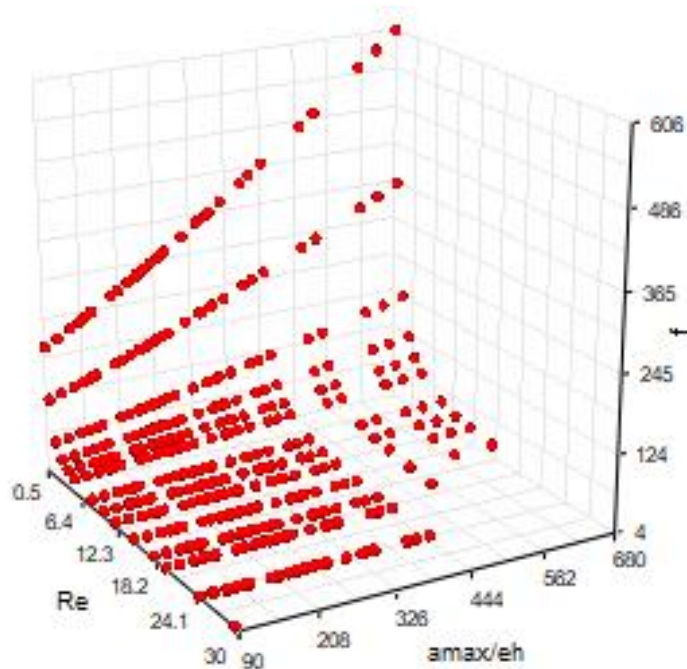
شود:

در این رابطه  $\nabla P$  افت فشار (یا گرادیان فشار)،  $f$  نشان دهنده عامل اصطکاک،  $L$  نشان دهنده طول مسیر جریان،  $D_h$  قطر هیدرولیکی معادل دو برابر بازشدگی هیدرولیکی ( $e_h$ )،  $v$  نشان دهنده سرعت جریان سیال و  $\rho$  وزن مخصوص سیال است. ضریب اصطکاک به عنوان یک پارامتر کلیدی در محاسبات جریان سیال ( $CFD$ ) و شبیه‌سازی جریان سیال شناخته می‌شود (Nazridoust et al., 2006; Zhang et al., 2013).

شواهد آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک را می‌توان به عنوان تابعی از دو متغیر کلیدی عدد رینولدز و هندسه شکستگی تعریف کرد. عدد رینولدز به عنوان پارامتری که نوع رژیم جریان را مشخص می‌کند و هندسه شکستگی نمایان‌گر مسیر جریان است (Chen et al., 2009; Qian et al., 2011; Zhang and Nemcik, 2013a; Zhou et al. 2016).

در این بخش، نتایج تجربی ضریب اصطکاک با استفاده از رابطه (۳-۱۱) محاسبه شده و این مقدار اصطکاک به صورت تابع از دو متغیر مستقل، یعنی عدد رینولدز ( $Re$ ) و زبری نسبی ( $\frac{\xi}{e_h}$ ) در شکل ۳-۳۲، ترسیم شده است. در تحلیل عامل اصطکاک هر دو رفتار خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. برازش آماری مناسب‌ترین رابطه بر روی نتایج تجربی با استفاده از روش حداقل مربعات انجام شد و رابطه (۳-۱۲) ارائه شده است.

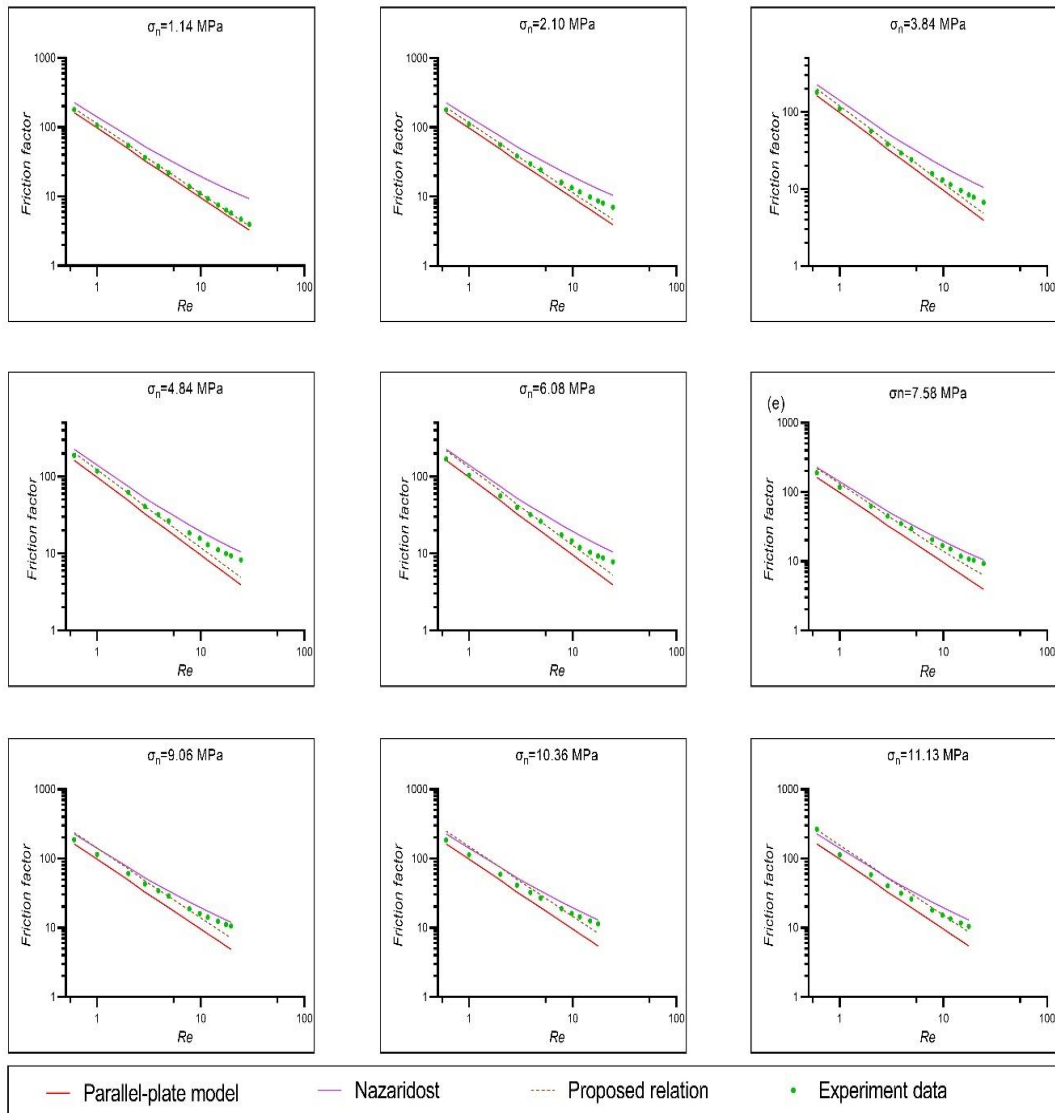
$$f = \frac{96}{Re} [1 + 0.0087 (\frac{\xi}{e_h})^{1.1183}] \quad Re < 10 \quad (3-12)$$



شکل ۳-۳۲: تغییرات ضریب اصطکاک برحسب دو مولفه عدد رینولدز و زبری نسبی

مقایسه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌ها به دست آمده از مدل نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶)، مدل صفحات موازی و مدل ضریب اصطکاک ارایه شده در این پژوهش صورت گرفته است. شکل ۳-۳۳ تا شکل ۳-۳۶ این مقایسه برای نمونه ۱ تا نمونه ۴ را نشان می‌دهد. این مقایسه نشان داد که رابطه (۳-۱۲) با نتایج آزمایشی انطباق خوبی دارد همچنین مدل صفحات موازی مقادیری کمتری برای ضریب اصطکاک برآورد می‌کند و مدل نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶)، عامل اصطکاک را بیشتر ارزیابی می‌کند.

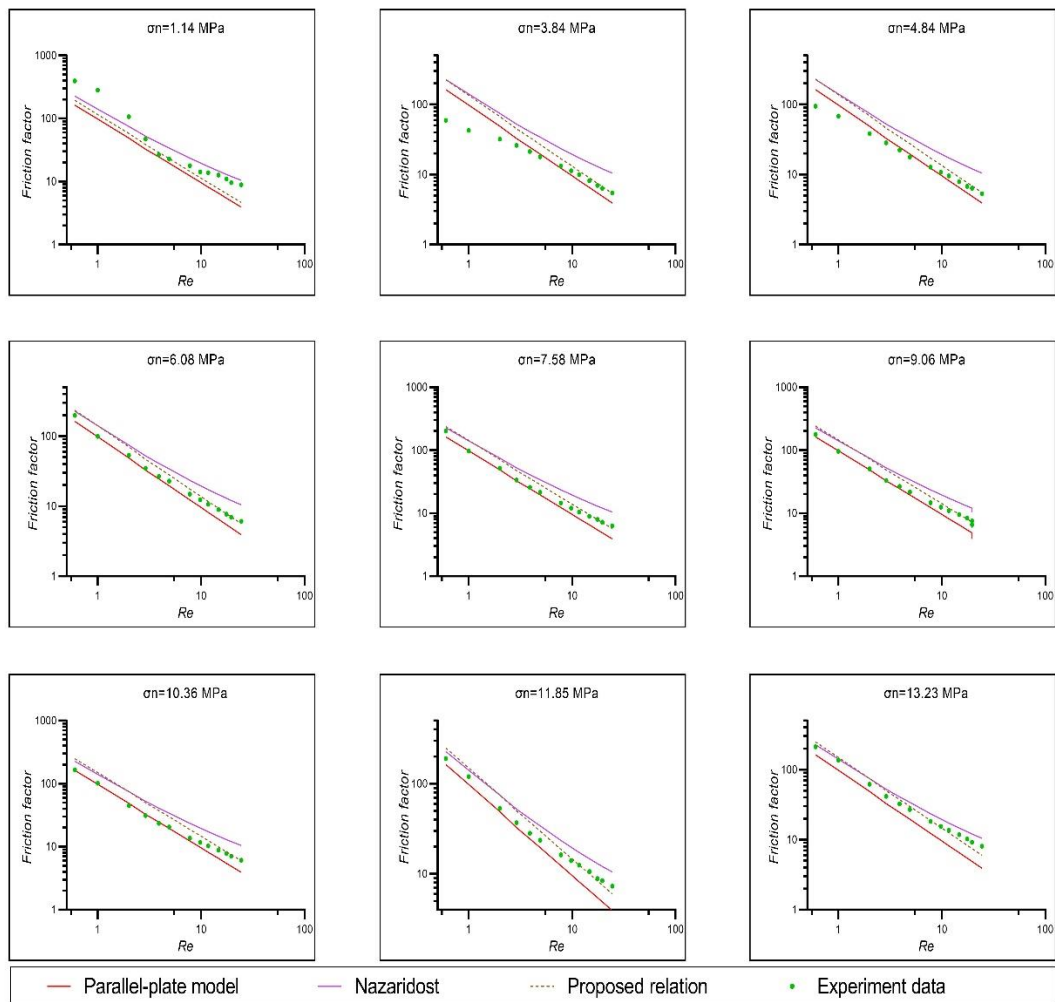
Sample 1



شکل ۳-۳: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی،

نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F1

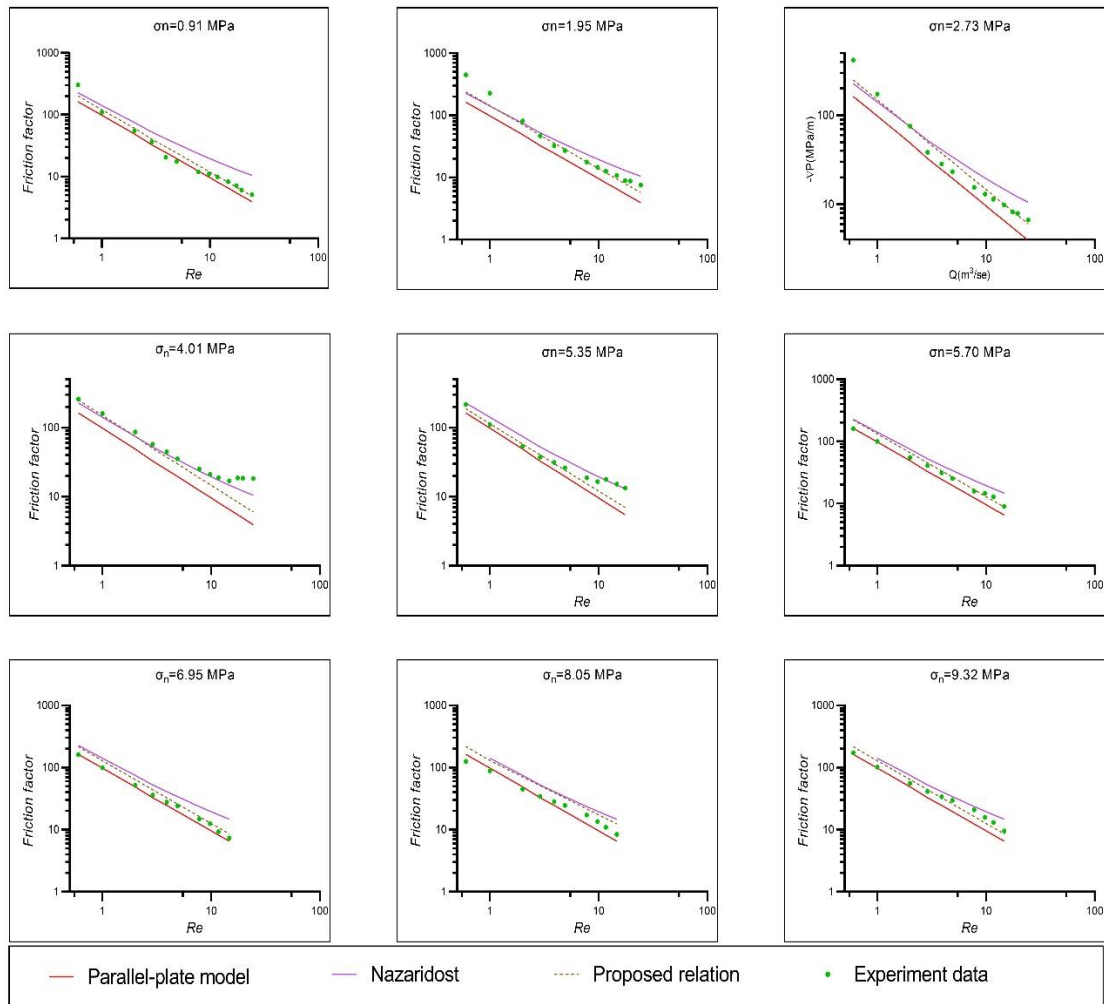
### Sample 2



شکل ۳-۳: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی،

ندری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F2

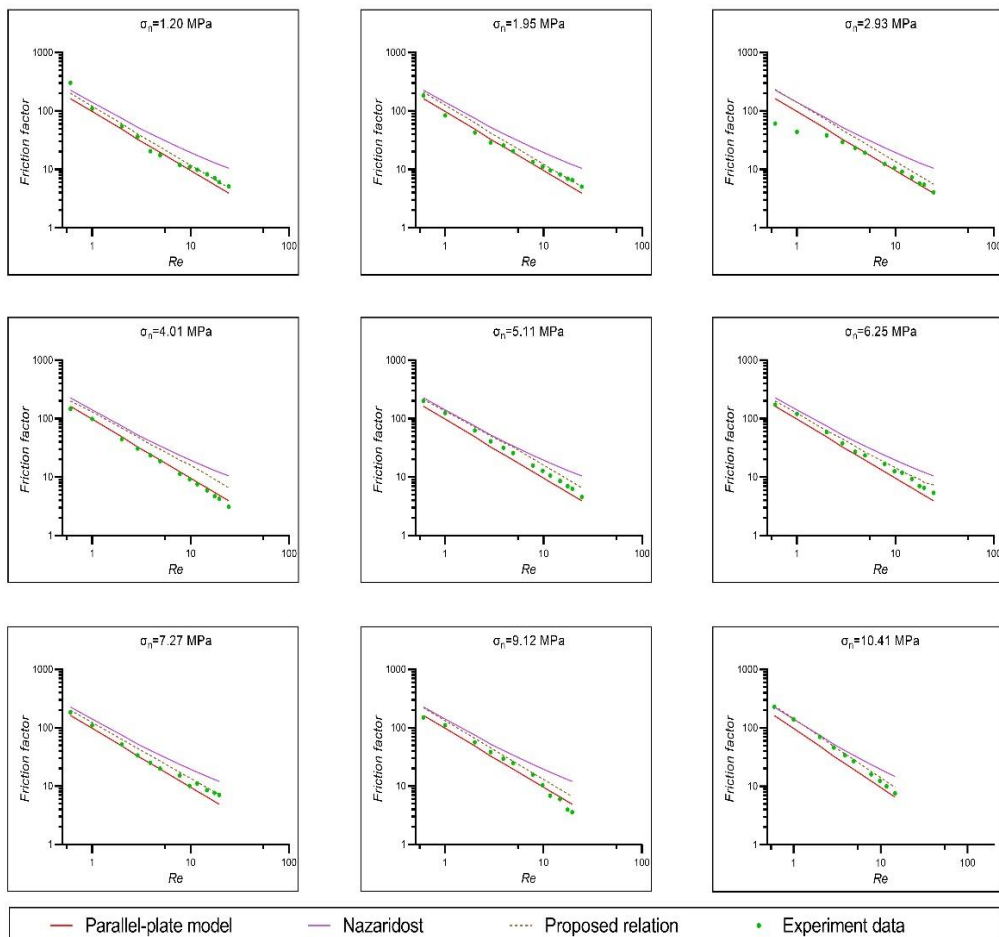
Sample 3



شکل ۳-۳: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی،

نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F3

### Sample 4



شکل ۳-۳۶: در مقایسه بین مقادیر ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش و پیش بینی‌های مدل صفحات موازی،

نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و رابطه پیشنهاد شده برای نمونه F4

به منظور ارزیابی بهتر این سه مدل (صفحات موازی، نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶) و مدل‌های

پیشنهادی)، از معیارهای هدف  $NOF^1$  استفاده شده است.  $NOF$  نسبت میانگین خطای مربع ( $RMSE^2$ )

به میانگین کلی  $X$  داده‌ها است که به صورت رابطه (۳-۱۳) تعریف می‌شود:

1- Normalized Objective Function

2- Root Mean Square Error



$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (13-3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{N}}, X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

در این رابطه مقدار  $x_i$  آزمایشگاهی ضریب اصطکاک،  $y_i$  مقدار پیش بینی شده توسط مدل ضریب اصطکاک و  $N$  تعداد کل داده‌ها است. مقادیر بهینه برای ارزیابی مدل  $NOF = 0$  است و چنانچه  $NOF$  بین ۰ تا ۱ باشد، مدل هنوز قابل اعتماد است و می‌توان با دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد (Sidiropoulou, et al. 2007; Zhou et al. 2016). مقادیر  $NOF$  با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در محدوده عدد رینولدز ( $1 < Re < 24$ ) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۷-۳: ارزیابی مدل‌های اصطکاک با استفاده از معیار  $NOF$

مدل پیشنهادی	نذری دوست و همکاران (۲۰۰۶)	مدل صفحات موازی	نمونه
۰/۱۸۲	۰/۳۴۸	۰/۴۱۶	۱
۰/۱۸۵	۰/۷۰۸	۰/۵	۲
۰/۴۹۲	۰/۶۱۲	۰/۷۸۸	۳
۰/۱۴۰	۰/۲۷۹	۰/۲۳۶	۴

همان‌طور که در جدول ۷-۳ ذکر شده، مقادیر  $NOF$  مدل پیشنهادی برای پنج نمونه کمتر از ۰/۴۹۲ است که نشان می‌دهد که بین پیش‌بینی‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی برقرار است و مدل پیشنهادی برای تخمین عامل اصطکاک قابل اعتماد است.

### ۳.۸.۵ بازشدگی هیدرولیکی

بازشدگی دهانه شکستگی پارامتر مهمی برای برآورد نفوذپذیری و آب‌گذری شکستگی‌های است. در بسیاری از مطالعات بازشدگی هیدرولیکی با جایگزینی شیب خط رگرسیون خطی منحنی  $\sqrt{P}$  در مقابل  $Q$  قانون مکعب مطابق رابطه (۱۴-۳) محاسبه شده است.

$$e = \left( \frac{12\mu Q}{w(dP/dx)} \right)^{1/3} \quad (14-3)$$

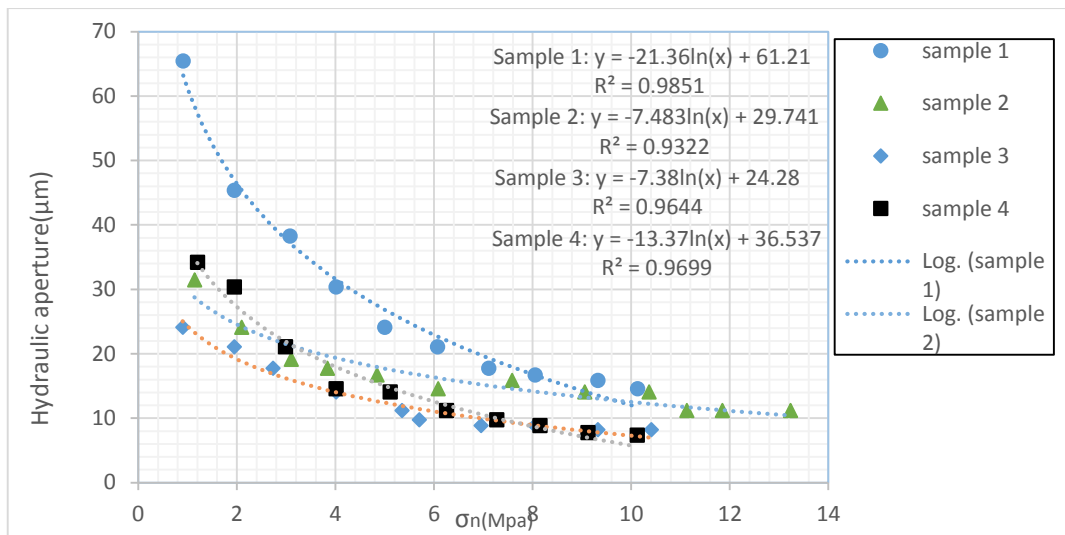
در این رابطه  $dP/dx$  گرادیان فشار است به صورت ماکروسکوپی معادل  $(P_i - P_o)/L$  که  $P_i$  فشار ورودی و  $P_o$  فشار خروجی و  $L$  طول مسیر جریان است. این رابطه برای جریان خطی صادق است و برای جریان غیرخطی نیز از این رابطه استفاده شده است.

در این پژوهش برای جریان غیرخطی سیال در شکستگی سنگ، بازشدگی هیدرولیکی ( $e_h$ ) با استفاده از بخش خطی معادله فورچهمر ( $A$ ) محاسبه شده است. این ضریب به در معادله (3-15) بیان شده است:

$$A = \frac{\mu}{kA_h} \quad (15-3)$$

در این رابطه  $A$  ضریب خطی معادله فورچهمر،  $k = e_h^2 / 12$  نفوذپذیری ذاتی و  $Ah = e_h w$  سطح مقطع شکستگی است. با بدست آوردن ضرایب معادله فورچهمر می‌توان بازشدگی هیدرولیکی را برای رفتار غیرخطی محاسبه کرد.

در شکل 3-37 تغییرات بازشدگی هیدرولیکی  $e_h$  به نسبت تغییرات تنش جانبی برای نمونه‌های 1، 2، 3 و 4 رسم شده است.



شکل ۳-۳۷: تغییرات بازشدگی هیدرولیکی با تنش جانبی

همان‌طور که در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده، تغییرات بازشدگی به نسبت تنش جانبی در هر چهار نمونه به صورت کاهشی و نمایی منفی است که از یک تنش جانبی به بعد این روند نزولی با شیب کمتر دنبال می‌شود. دهانه بازشدگی هیدرولیکی تحت تنش جانبی ۱ مگاپاسکال در نمونه شماره ۱ به نسبت سایر نمونه‌ها مقدار بیشتری است ولی با افزایش تنش جانبی تا  $15 \mu\text{m}$  کاهش می‌یابد. برای نمونه ۲، بازشدگی هیدرولیکی به آرامی کاهش می‌یابد و در مقدار  $10 \mu\text{m}$  (حتی در بالاترین تنش جانبی ۱۰ مگاپاسکال) ثابت باقی می‌ماند. بازشدگی هیدرولیکی نمونه ۳ به جز برای یک تغییر جزئی در تنش جانبی ۱۱ مگاپاسکال مشابه با نمونه ۲ تغییر می‌کند. برای نمونه ۴ روند کاهشی دهانه بازشدگی مشابه با دیگر نمونه‌ها است. مطابق این شکل با افزایش تنش عمودی شکستگی مطابق با رابطه هذلولی بندیس و همکاران (۱۹۸۳) بسته می‌شود و افزایش تنش جانبی موجب کاهش بازشدگی هیدرولیکی می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است، با استفاده از برازش آماری تغییرات بازشدگی به

نسبت تنش به صورت تابع لگاریتمی فرموله شده که به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$e_{h(res)} = e_{h0} - a \ln(\sigma_n) \quad (۳-۱۶)$$

در این رابطه  $e_{h0}$  بازشدگی هیدرولیکی در تنش جانبی صفر،  $\sigma_n$  تنش جانبی،  $e_{h(res)}$  بازشدگی هیدرولیکی باقیمانده و  $\alpha$  ثابت است بسته به سطح زبری سطح دیوار شکستگی است. این رابطه می‌تواند برای مدل‌سازی رفتار توامان هیدرومکانیک در برخی از نرم افزارهای عددی مانند  $UDEC$ ،  $3DEC$  مفید باشد.

### ۹.۳ جمع بندی

در این فصل مجموعه نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق آورده شده است. برای انجام مطالعات آزمایشگاهی با توجه به اهداف این تحقیق، تعدادی نمونه سنگ تهیه شده است. در تحقیقات پیشین اکثراً از نمونه‌هایی با شکستگی مصنوعی (ایجاد شکستگی در نمونه سنگ با برش ماشین و یا بارگذاری کششی) استفاده شده است. مشخصاً زبری و تغییرات بازشدگی در این نمونه‌ها، کوچک و متفاوت با شرایط نمونه شکستگی طبیعی است. در این تحقیق برای انجام آزمایش جریان سیال از نمونه شکستگی طبیعی استفاده شده تا این خلا جبران شود.

با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ژيومتریك استریو سه بعدی ناهمواری سطوح دیواره‌های شکستگی به دقت برداشت شده است. روش‌های گوناگونی برای تخمین دهانه بازشدگی شکستگی تاکنون ارائه شده است، در این تحقیق با استفاده از داده‌های رقومی برداشت شده از سطوح شکستگی، توزیع بازشدگی در شکستگی برآورد شده است. همچنین میزان زبری سطوح شکستگی با استفاده از سه روش تجربی، آماري و فرکتال ارزیابی شده است.

آزمون‌های آزمایشگاهی صورت گرفته در این تحقیق شامل آزمایش سه محوره و آزمایش جریان سیال توام با تنش جانبی است. در بخش پایانی این فصل به تحلیل نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

خصوصیات جریان خطی و غیرخطی بر مبنای داده‌های آزمایش در گستره وسیعی از سرعت و تنش جانبی بررسی شده است. اگر رابطه کلی  $Vp=f(Q^n)$  را برای تغییرات گرادیان فشار نسبت به نرخ جریان در نظر گرفته شود، نتایج آزمایش را می‌توان در سه بخش  $n$  کوچکتر از یک،  $n$  مساوی یک و  $n$  بزرگتر از یک دسته‌بندی کرد. مقادیر  $n$  مساوی یک نشان دهنده رفتار خطی جریان سیال و صحت و اعتبار قانون مکعب است. برای نتایج آزمایش که  $n$  بزرگتر از یک است جریان سیال به رفتار غیر خطی به دلیل اثر مضاعف اینرسی منتسب شده است، برای نمونه‌های که بازشدگی آن بیشتر است این نوع رفتار رخ داده است. برای  $n$  کوچکتر از یک، رابطه غیرخطی به رفتار اتساع شکستگی تحت اثر رفتار توامان هیدرومکانیک مرتبط شده است و برای نمونه شکستگی که بازشدگی آن کمتر و سطوح آن زبر است این رفتار اتفاق افتاده است.

با استفاده از برازش آماری، ضرایب دو رابطه ماکروسکوپی ایزباش و فورچهیمر برآورد شده است. با توجه به این که ضریب تشخیص ( $R^2$ ) در این برازش‌ها بزرگتر از ۰/۸۹ است، هر دو رابطه به خوبی رفتار غیرخطی را توصیف می‌کنند. البته با مقایسه روند تغییرات ضرایب این دو رابطه با تنش جانبی و حساسیت پایین ضریب‌های رابطه ایزباش به تغییر تنش جانبی به نظر می‌رسد که رابطه فورچهیمر، رابطه مناسب‌تری برای توصیف رفتار غیرخطی است. تاکنون چند رابطه برای تخمین ضریب اصطکاک ارایه شده است در این تحقیق ضریب اصطکاک به صورت تابعی از عدد رینولدز و بازشدگی نسبی دیده شده است و با استفاده از نتایج آزمایش رابطه جدیدی برای ضریب اصطکاک پیشنهاد شد. با مقایسه نتایج آزمایش برای رابطه‌های ارایه شده و رابطه پیشنهادی مشاهده می‌شود رابطه ارایه شده توانایی خوبی در برآورد ضریب اصطکاک دارد.

در نهایت پارامترهای بازشدگی هیدرولیکی و عدد رینولدز بحرانی بررسی شد که با افزایش تنش جانبی مقدار این دو پارامتر کاهش می‌یابند. کاهش عدد رینولدز بحرانی نشان دهنده انحراف سریع‌تر جریان از رابطه خطی به غیرخطی است.

## فصل چهارم: مدل‌سازی عددی

### آزمایش‌ها

## ۱.۴ مقدمه

محققین برای توضیح پدیده‌های طبیعی، از روش‌های مختلفی استفاده می‌نمایند. روش‌های مشاهده‌ای و آزمایشگاهی از جمله قدیمی‌ترین این روش‌ها به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر توسعه روش‌های مبتنی بر ریاضیات و استفاده از نرم‌افزارهای عددی در جهت تسهیل روند محاسبات ریاضیاتی وابسته کمک شایانی در جهت بررسی پدیده‌های طبیعی و پیش‌بینی آنها نموده است. از جمله مهمترین این روش‌ها، استفاده از روش‌های عددی است که به ابزار قدرتمندی در جهت حل مسائل مختلف مهندسی تبدیل شده است. مهمترین مزیت روش‌های عددی ارابه پاسخ قابل اطمینان در مدت زمان نسبتاً کم و نیز در بر داشتن هزینه‌های کمتر نسبت به روش‌های دیگر مانند روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

در فصل قبل به بررسی آزمایشگاهی جریان سیال در شکستگی تحت تنش جانبی پرداخته شد با توجه به محدودیت‌هایی آزمایشگاهی، امکان انجام آزمایش تحت دهانه بازشدگی باز میسر نبود. از آنجایی که در توده سنگ شکستگی با دهانه بازشدگی باز نیز وجود دارد. ضروری است برای این شرایط هم جریان سیال در شکستگی مورد مطالعه قرار گیرد. در این فصل با استفاده از روش عددی این موضوع بررسی شده است.

در گام نخست یکی از آزمایش‌های انجام شده در فصل قبل مدل‌سازی می‌شود، پس از اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی، از مدل مرجع برای تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری استفاده خواهد شد.

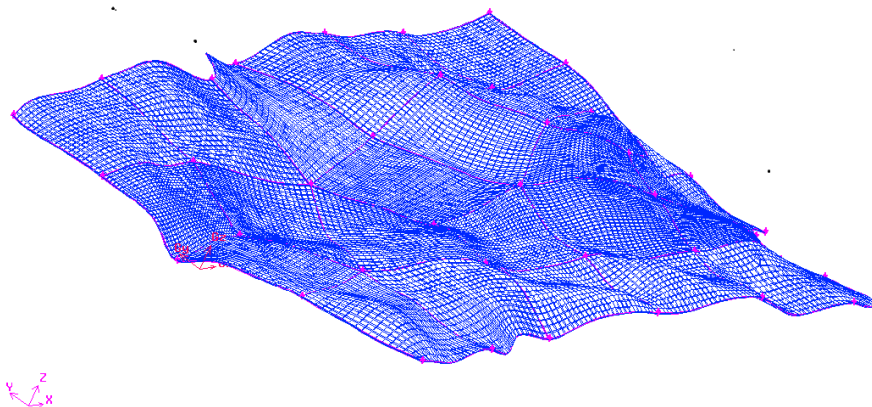
## ۲.۴ انتخاب نرم‌افزار مدل‌سازی عددی

در پژوهش‌های پیشین برای مدل‌سازی جریان سیال در شکستگی از نرم‌افزارهای تجاری نظیر (Koyama et al., 2008; Javadi et al., 2010) ABAQUS، Comsol Multiphysic، Fluent استفاده شده است. با توجه به طراحی نرم‌افزار Fluent اختصاصاً برای تحلیل جریان سیال در هندسه‌های

پیچیده، در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی این نرم افزار بکار گرفته شده است. این نرم افزار در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر مبنای روش عددی حجم محدود<sup>۱</sup> جریان سیال را در هندسه‌های پیچیده مدل‌سازی می‌کند.

### ۳.۴ ساخت هندسه مدل

در این مطالعه، از داده‌های دیجیتالی برداشت شده از شکستگی طبیعی به منظور ساخت هندسه سه‌بعدی استفاده شده است. همان‌طور که در بخش ۳.۳ بیان شد از سیستم اندازه‌گیری ژئومتریک - استریو سه بعدی به منظور برداشت هندسه سطوح دیوارهای شکستگی استفاده شده است. در مرحله بعد هندسه سه بعدی بازشدگی با کمک نرم‌افزار *Gambit* ساخته می‌شود. در شکل ۵-۱ هندسه مش‌بندی شده برای نمونه ۲ آورده شده است.



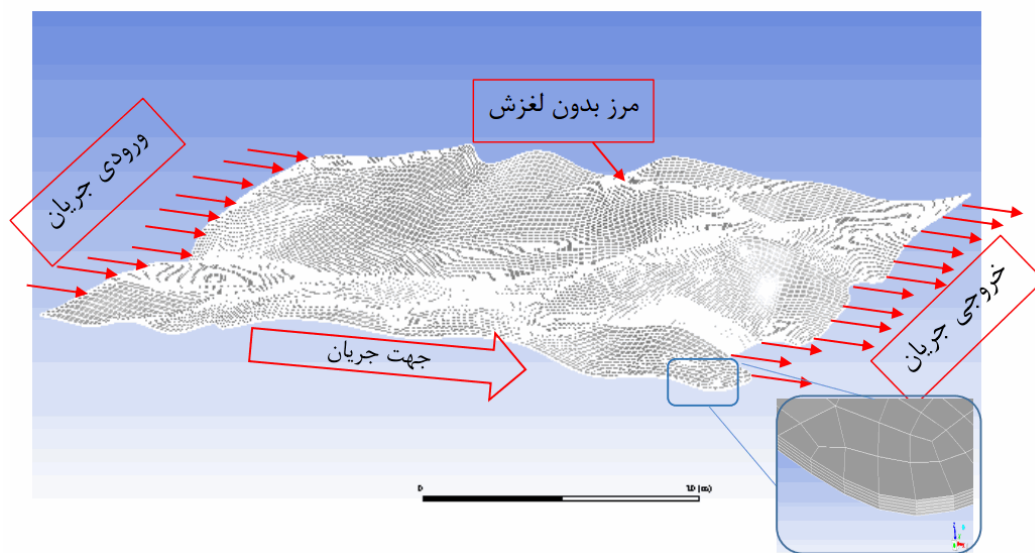
شکل ۴-۱: ساخت مش برای نمونه شماره F۲

برای مدل‌سازی عددی، معادله ناور-استوکس و معادلات پیوستگی جریان با استفاده از نرم‌افزار *Fluent* در هندسه (ایجاد شده توسط نرم‌افزار *Gambit*) حل شده است. حل عددی معادلات ناور استوکس برای شکستگی بسیار زمان‌بر است زیرا برای فایق آمدن بر ساختارهای بسیار کوچک که



در جریان مغشوش وجود دارد باید از مش ریز استفاده شود، برای حل این مشکل از معادلات میانگین رینولدز ناویر استوکس *RANS* به همراه مدل مغشوش  $k-\varepsilon$  برای شبیه‌سازی رفتار جریان مغشوش استفاده شده است. در مدل‌سازی وزن مخصوص  $998/2$  کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته دینامیکی  $0/001$  پواز به‌عنوان ویژگی‌های فیزیکی آب در نظر گرفته شده است. با توجه به ضخامت بسیار کم جریان سیال اثر جاذبه در مدل‌سازی لحاظ نشده و با توجه به محدودیت‌های موجود برای تولید مش کمترین مقدار بازشدگی  $0/05$  میلی‌متر لحاظ شده است.

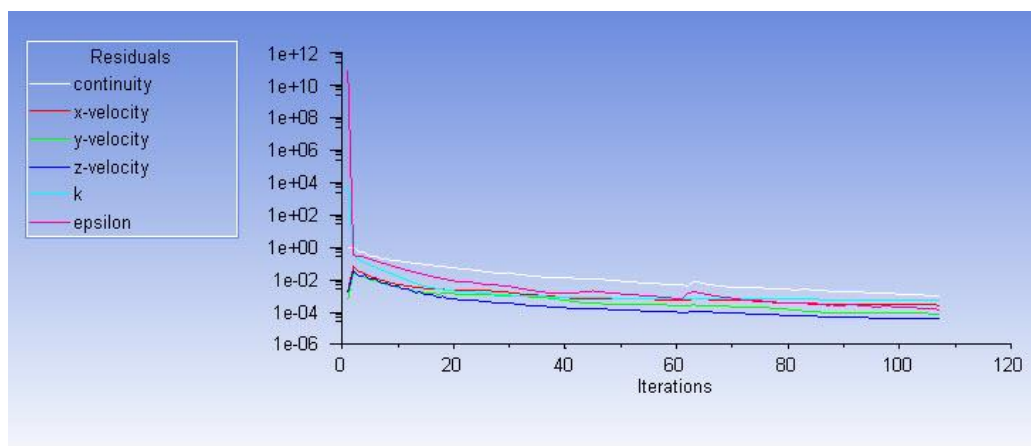
مطابق شرایط انجام آزمایش برای مدل عددی شرایط مرزی تعریف می‌شود. برای ناحیه ورودی شرط مرزی سرعت ورودی لحاظ شده است. توزیع سرعت در راستای محور  $y$  به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. سایر مرزهای موجود در مدل‌سازی با توجه به ناتراوا بودن ماده سنگ در دیواره‌های شکستگی به صورت دیواره‌های نفوذناپذیر (Wall) با شرایط مرزی غیرلغزش تعریف شده است. در شکل ۲-۴ شرایط مرزی لحاظ شده برای مدل عددی را نشان می‌دهد.



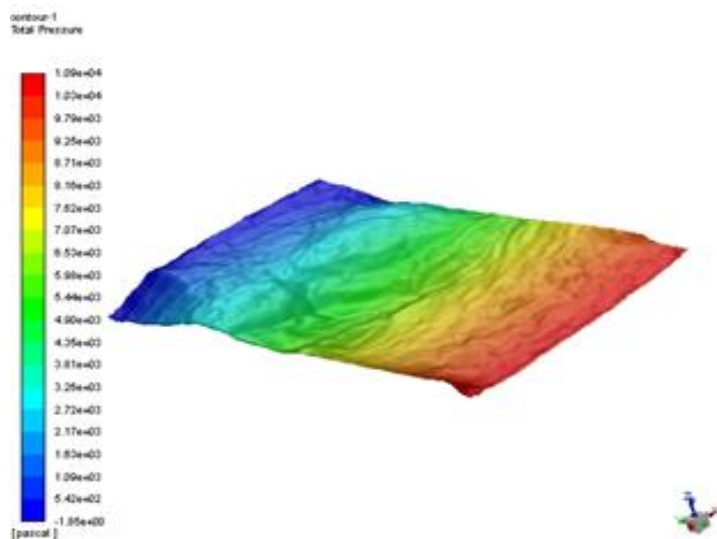
شکل ۲-۴: هندسه شرایط مرزی و دامنه جریان سیال برای نمونه F1

پس از حل مدل و همگرا شدن معادلات، تحلیل انجام شده است. در شکل ۳-۴، اتمام تحلیل در

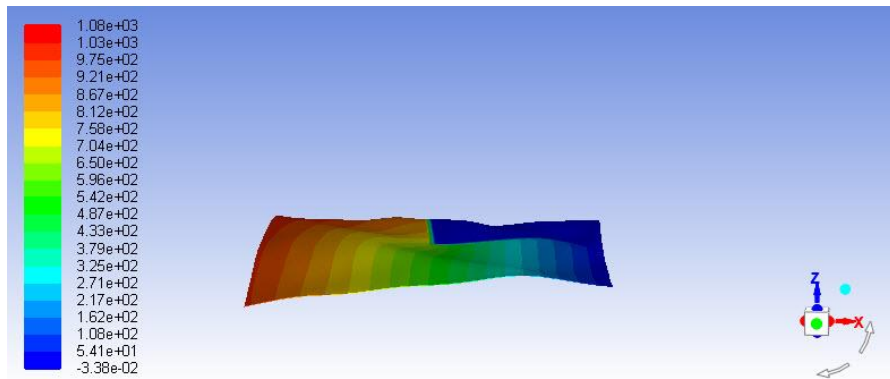
نرم‌افزار آورده شده است.



شکل ۳-۴: همگرا شدن معادلات و اتمام تحلیل



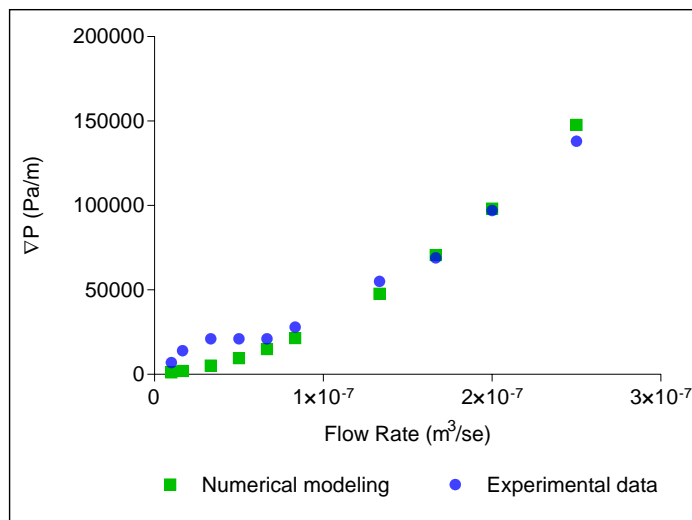
شکل ۴-۴: نتایج برای نمونه F3 تحت سرعت سیال  $0/01$  متر بر ثانیه



شکل ۴-۵: نتایج برای نمونه F2 برای دهانه بازشدگی ۰/۰۵ میلیمتر و سرعت ۰/۰۱ متر بر ثانیه

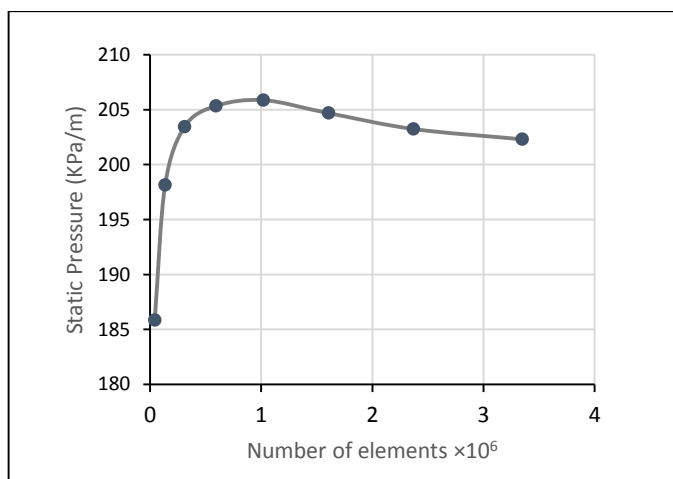
#### ۴.۴ اعتبار سنجی مدل عددی

از آنجاکه همواره نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی به صورت تقریب در نظر گرفته می‌شود بنابراین قبل از تحلیل نتایج مدل‌سازی، لازم است اعتبار مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گیرد. اعتبار سنجی در دو بخش مجزا بررسی شده و صحت محاسبات عددی و استقلال نتایج از مش انجام شده است. به منظور صحت سنجی نتایج محاسبات عددی، مقایسه‌ای بین مقادیر افت فشار بدست آمده از مدل‌سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی برای نمونه شکستگی F2 صوت پذیرفته است. شکل ۴-۶ این مقایسه را نشان می‌دهد. منظور از مقدار افت فشار استاتیکی، تفاضل مقادیر فشار استاتیک در ورودی و خروجی شکستگی است.



شکل ۴-۶: مقایسه بین افت فشار برای مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه F2

همان‌طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی تطابق خوبی برقرار است. بنابراین مدل عددی ساخته شده، به خوبی رفتار هیدرولیکی سیال در شکستگی زبر را نشان دهد. پس از اطمینان از صحت محاسبات عددی، استقلال مدل از تعداد المان در مدل‌سازی عددی انجام شده است. به منظور ارزیابی استقلال مدل از تعداد المان، مدل‌سازی‌های با تعداد متفاوت المان، انجام شده است. شکل ۴-۷، مقایسه بین نتایج مدل‌سازی با تعداد متفاوت المان را نشان می‌دهد. هر اندازه تعداد المان بیشتر شود نتایج دقیق‌تر و زمان حل افزایش می‌یابد، البته افزایش تعداد المان از مقداری معین تاثیری بر دقت نتایج نمی‌گذارد. بنابراین انتخاب تعداد کافی از المان برای مدل‌سازی، هم می‌تواند موجب ثبات دقت و کاهش زمان مدل‌سازی گردد.

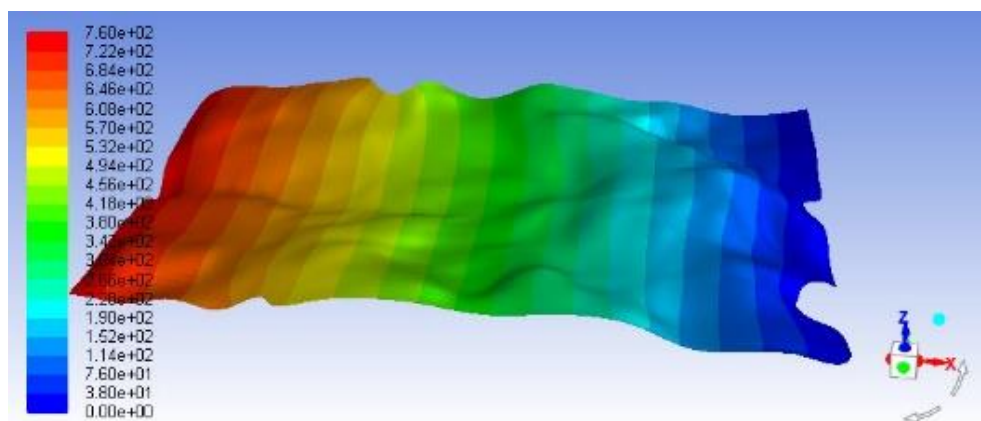


شکل ۴-۷: تغییرات افت فشار به نسبت تعداد المان به کار گرفته شده برای مدل‌سازی

## ۵.۴ تحلیل و بررسی نتایج

پس از اعتبارسنجی مدل عددی مرجع می‌توان به منظور بررسی پارامترهای مختلف در جریان سیال در شکستگی از آن استفاده کرد. با استفاده از این مدل عددی مرجع تاثیر هندسه (زبری و بازشدگی) سطح شکستگی بر رفتار جریان سیال بررسی شده است. بنابراین هندسه چهار نمونه سنگ با زبری

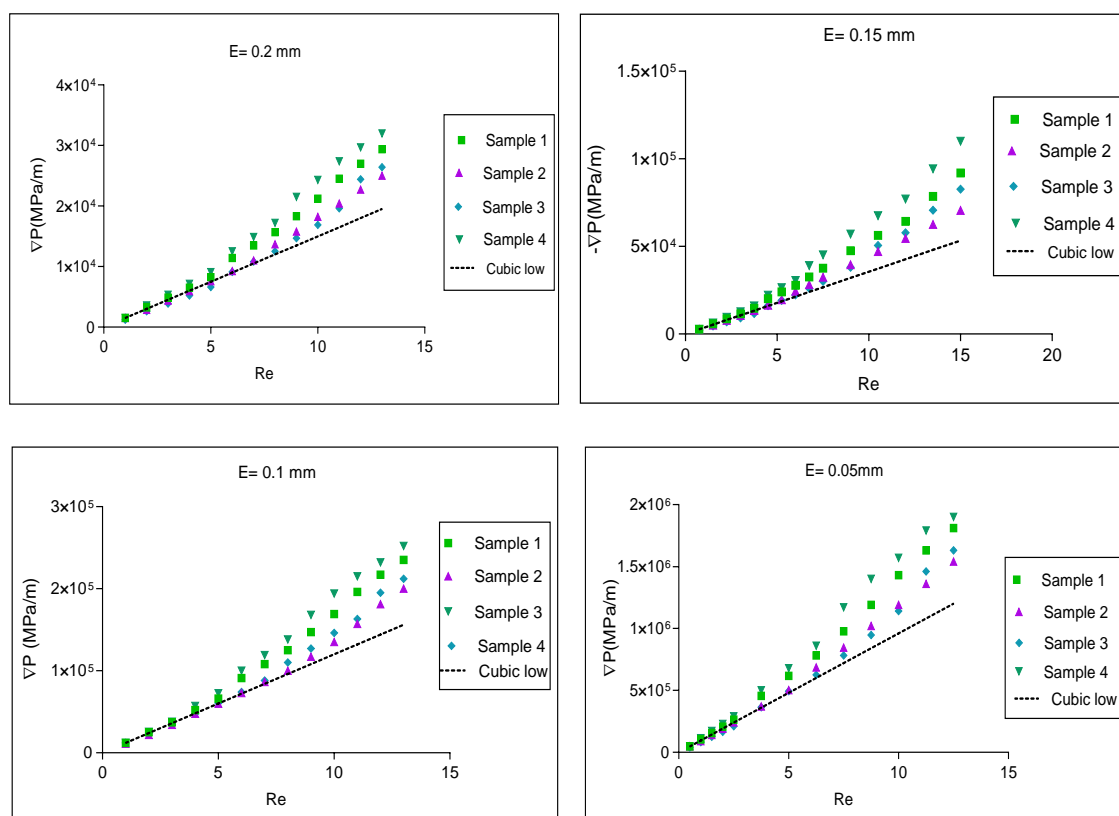
متفاوت و برای چهار بازشدگی ۰/۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ میلیمتر ساخته شد. جریان سیال با سرعت‌های متفاوت مدل‌سازی شد. شکل ۴-۸، توزیع فشار در طول نمونه سنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: توزیع فشار در طول نمونه F1 و بازشدگی ۰/۲ میلیمتر

نتایج مدل‌سازی، همانند شیوه مرسوم در تحلیل رفتار هیدرولیکی در سنگ، به شکل تغییرات افت فشار به نسبت نرخ جریان برای هر کدام از بازشدگی‌ها به صورت جداگانه ترسیم شده است. مقادیر افت فشار استاتیکی ناشی از حرکت سیال در شکستگی، از اختلاف مقادیر فشار استاتیکی در ورودی و خروجی شکستگی محاسبه می‌شود. این نمودارهای در شکل ۴-۹، نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج با قانون مکعب مقدار تخمینی افت فشار توسط رابطه مکعب نیز آورده شده است.

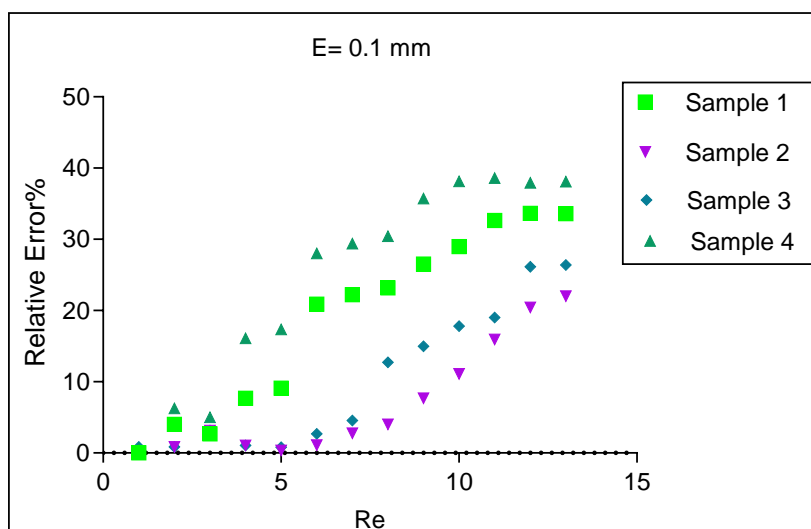
در هریک از مقادیر بازشدگی، مقادیر تخمینی افت فشار توسط قانون مکعب کمتر از نتایج مدل‌سازی عددی بوده است. بنابراین مقدار آب‌گذری تخمین‌زده شده توسط رابطه مکعب، بیشتر از مقدار واقعی است.



شکل ۴-۹: تغییرات افت فشار به نسبت عدد رینولدز

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با کاهش بازشدگی مقدار افت فشار افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده کاهش آب‌گذری با بازشدگی است. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که در هر یک از بازشدگی‌های ثابت، تغییر زبری سطوح شکستگی باعث افزایش مقدار افت فشار جریان سیال می‌گردد که با افزایش دبی جریان، این اختلاف به طور غیرخطی افزایش می‌یابد، ولی در بازشدگی‌های کوچک‌تر، مقادیر این تغییرات بزرگ‌تر است. از سوی دیگر در سرعت‌های کم جریان سیال زبری سطح شکستگی باعث پیچ و خم‌دار شدن مسیر جریان سیال می‌گردد که این مساله باعث افت فشار جریان سیال می‌شود. با افزایش دبی با توجه به ثابت بودن سطح مقطع شکستگی سرعت افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالا جریان افت فشار به مغشوش بودن سیال هم مرتبط می‌شود. در بازشدگی‌های کم به دلیل سطح مقطع کوچک‌تر شکستگی، جریان با سرعت بیشتر حرکت می‌کند و پیچ و خم‌داری مسیر هم بیشتر است این

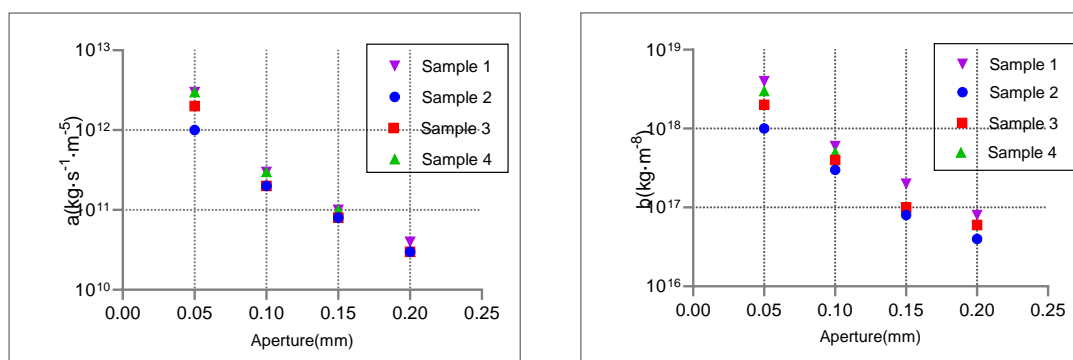
دو عامل باعث افزایش افت فشار می‌شود. در شکل ۴-۱۰، خطای نسبی بین افت فشار تقریب زده شده به روش مدل‌سازی و برآورد شده با قانون مکعب برای نمونه‌های مختلف آورده شده است.



شکل ۴-۱۰: خطای نسبی بین افت فشار تقریب زده شده به روش مدل‌سازی و برآورد شده با قانون مکعب برای

اعداد مختلف رینولدز

برای مقایسه رابطه مکعب با نتایج مدل‌سازی عددی، نتایج رابطه مکعب هم در شکل ۴-۹، آورده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که از یک عدد رینولدز مشخص، رابطه افت فشار با دبی جریان از رابطه خطی منحرف شده و رابطه بین نرخ جریان با افت فشار به صورت غیرخطی رفتار می‌کند. بنابراین از رابطه فورچهمر برای توصیف این الگوی رفتاری استفاده شده است و ضرایب خطی و غیرخطی این معادله توسط روش برازش آماری غیرخطی تعیین شده است. معادله فورچهمر به خوبی رفتار غیرخطی را توصیف می‌کند ( $R^2 > 0.9888$ ). در شکل ۴-۱۱، تغییر ضرایب‌های رابطه فورچهمر با افزایش بازشدگی برای هندسه‌های با زبری متفاوت آورده شده است.



شکل ۴-۱۱: روند تغییرات ضریب خطی و غیرخطی معادله فورچهمیر به نسبت بازشدگی

مقادیر این دو ضریب با تغییر میزان بازشدگی دهانه شکستگی از ۰/۰۵ تا ۰/۲ میلی‌متر به صورت نزولی کاهش یافته و در بازشدگی کم (۰/۰۵ میلی‌متر) اثر زبری هندسه بر روی این مقادیر مشخص است و البته با افزایش بازشدگی اثر زبری کاهش می‌یابد. بنابراین این ضرایب علاوه بر میزان بازشدگی تابعی از مقدار زبری شکستگی نیز هستند.

اگر ضریب خطی A به عنوان نفوذپذیری ذاتی شکستگی لحاظ گردد، مقادیر بیشتر آن بیانگر نفوذپذیری کمتر شکستگی و سطح مقطع کم جریان سیال است. از لحاظ ریاضی ضریب B کنترل کننده انحنای سهمی افت فشار به نسبت نرخ جریان است. با کاهش بازشدگی شیب منحنی افزایش خواهد یافت. بنابراین مقادیر بیشتری برای ضریب B باید انتخاب گردد. افزایش مقدار B بیانگر کاهش سطح مقطع جریان و افزایش پیچ و خم‌داری مسیر جریان است که با تغییرات انجام شده همخوانی خوبی دارد.

#### ۶.۴ جمع بندی

در این فصل اثر هندسه شکستگی بر رفتار غیرخطی جریان سیال در شکستگی زیر سه بعدی بررسی شده است. در این مطالعه از روش عددی المان حجم محدود برای حل جریان سیال در شکستگی سنگی استفاده شده است. نتایج مهم بدست آمده از این مدل‌سازی انجام شده به شرح ذیل است:



- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمون آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی مرجع به خوبی قادر است رفتار جریان سیال در یک شکستگی زبر را شبیه‌سازی کند.
- مقایسه‌ای بین نتایج تخمین‌زده شده توسط قانون مکعب و نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که قانون مکعب مقادیر بزرگتری را برای آب‌گذری برآورد می‌کند.
- با استفاده از نتایج مدل عددی مشخص شد که رابطه بین نرخ جریان با افت فشار به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. برازش غیرخطی از نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که رابطه فورچه‌یمر به خوبی قادر است رفتار غیرخطی را توصیف کند. مقادیر ضرایب خطی و غیرخطی معادله فورچه‌یمر برای هر یک از هندسه‌ها برآورد شده است.
- تغییرات هر دو ضریب خطی و غیرخطی نسبت به تغییر بازشدگی مورد بررسی قرار گرفته است که با افزایش بازشدگی از ۰/۰۵ به ۰/۲ میلیمتر مقادیر A از  $3 \times 10^{12}$  به  $3 \times 10^{10}$  (۱۰۰ درصد) و مقدار B از  $4 \times 10^{18}$  به  $3 \times 10^{16}$  (۱۳۳ درصد) کاهش یافته است.

## فصل پنجم: ارزیابی رفتار جریان

### سیال در توده‌سنگ

## ۱.۵ مقدمه

بسیاری از فعالیت‌های مهندسی سنگ (نظیر ساخت سازه‌های مهندسی در مجاورت توده‌سنگ، استخراج و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی، ذخیره‌سازی زباله‌های هسته‌ای و استحصال انرژی زمین گرمایی) مرتبط با فرآیند جریان سیال در توده‌سنگ است بنابراین طراحی و ساخت این فعالیت‌های مهندسی مستلزم شناخت رفتار جریان سیال در توده‌سنگ است (Benardos and Kaliampakos, 2005; Reeves et al., 2010).

در فصل‌های پیشین رفتار جریان سیال در یک شکستگی منفرد در مقیاس کوچک مطالعه شد. در این فصل برای بررسی این موضوع در مقیاس بزرگتر، برای ارزیابی رفتار جریان سیال در توده‌سنگ داده‌های شماری از آزمایش‌های فشار آب (لوژان) در سد و نیروگاه بختیاری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

در طرح مطالعاتی سد بختیاری مجموعه‌ای کاملی از برداشت‌های زمین‌شناسی و آزمایش فشار آب صورت پذیرفته است. همچنین از آنجایی که خود محقق در این طرح مطالعاتی مشارکت داشته اطلاعات کامل آن در دسترس می‌باشد.

در این فصل ابتدا مختصری در خصوص روش آزمایش فشار آب آورده شده است. سپس نحوه تحلیل نتایج و بررسی‌های صورت پذیرفته در خصوص رفتار الگوی جریان در توده‌سنگ آورده شده است در نهایت با به کارگیری معادلات ارائه شده در پژوهش‌های آزمایشگاهی به تعیین عدد رینولدز بحرانی در آزمایش‌های صحرایی پرداخته شده است.

## ۲.۵ روش انجام آزمایش فشار آب

مرسوم‌ترین روش ارزیابی تراوایی و تخمین تزریق‌پذیری در توده‌سنگ‌های درزه‌دار به صورت برجا، آزمایش فشار آب (لوژان) است. در این آزمایش مقدار آب خوری توده‌سنگ تحت یک فشار ثابت

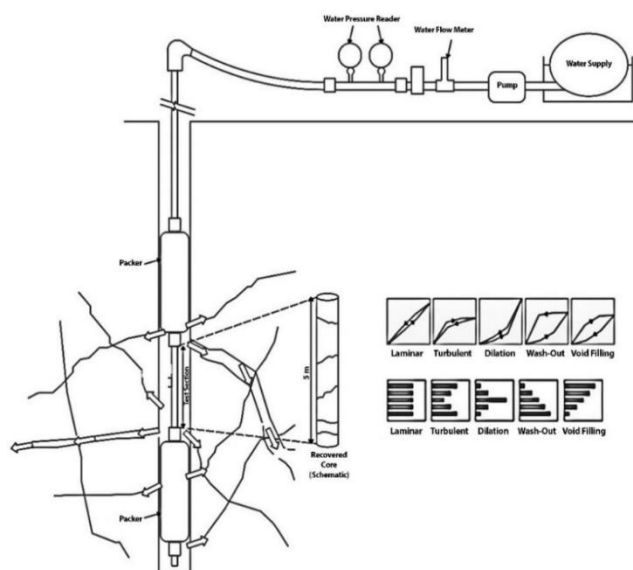
اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش اولین بار در سال ۱۹۳۳ توسط موریس لوژان به منظور برآورد تزریق‌پذیری و نفوذپذیری توده‌سنگ ارایه شده است (Karbala et al., 2009). ولی امروزه پیشرفت‌های چشم‌گیری در خصوص ارزیابی خصوصیات هیدرولیکی توده‌سنگ با استفاده از این آزمایش رخ داده است. معادله‌های بنیادی جریان شعاعی در شکستگی سنگی در آزمایش فشار آب مشابه معادله‌های ارایه شده توسط تیم در سفره آب محصور در آزمایش پمپاژ آب، با استفاده از فرض‌های داری برای جریان پایا قابل محاسبه است (Karamouz, 2011). البته در بررسی داده‌های آزمایش‌های هم فشار هیدرولیکی نظیر آزمایش فشار آب در توده‌سنگ، مقادیر آب‌گذری با استفاده از مدل ریاضی بر مبنای فرضیات جریان داری در شکستگی محاسبه می‌شود (Witherspoon et al., 1980). همان‌طور که در فصل دوم شرح داده شد، در جریان داری رابطه بین نرخ جریان  $Q$  با فشار هیدرولیکی به صورت خطی تغییر می‌کند و به همین دلیل جریان داری به جریان خطی نسبت داده می‌شود. پژوهش‌های بسیاری در خصوص بدست آوردن مقادیر آب‌گذری و یا نفوذپذیری از آزمایش‌های هم فشار هیدرولیکی بر حسب مدل ریاضی بر مبنای قانون داری صورت گرفته است اما در این پژوهش‌ها کمتر بر الگوی رفتاری جریان سیال توجه شده است. تعداد اندکی مطالعه با نگاه ویژه به تعریف الگوی جریان در این آزمایش‌ها صورت گرفته است و در همه این مطالعات شواهدی مبنی بر انحراف جریان از جریان خطی به غیرخطی موجود است. انحراف جریان سیال از حالت خطی به غیرخطی در آزمایش فشار آب، موجب افزایش خطا در تخمین پارامترهای هیدرولیکی توده‌سنگ می‌شود. بنابراین توجه به الگوی رفتار جریان سیال در آزمایش‌های هیدرولیکی درجا از اهمیت بالایی برخوردار است که تاکنون برخلاف آزمایش‌های در مقیاس آزمایشگاهی آنچنان که در خور توجه باشد این موضوع مطالعه نشده است.

از سوی دیگر در بررسی‌های آزمایشگاهی به طور گسترده‌ای از عدد رینولدز به عنوان معیاری جهت تعیین انحراف از رابطه خطی به غیرخطی استفاده شده است (Zimmerman and Bodvarsson, 1996a; Brush and Thomson, 2003; Zeng and Grigg, 2006; Javadi et al., 2014; Zhou et al., 2015)

اما در مطالعات صحرایی جریان سیال در توده سنگ به جز موارد اندکی به بررسی این موضوع پرداخته نشده است (Chen, Hu, et al., 2015).

در آزمایش فشار آب با هدف ثابت نگه داشتن فشار سیال در محدوده‌ای از گمانه مطالعاتی (ابتدا و انتهای محدوده‌ی ۵ متری از گمانه با استفاده از پکر مسدود می‌شود) تزریق آب صورت می‌گیرد و مقدار آب‌خوری گمانه (Q) در آن فشار ثبت می‌شود در نهایت دو پارامتر Q و فشار موثر P برحسب هم رسم می‌گردد و مقدار عدد لوژان برحسب شکل منحنی P-Q محاسبه می‌شود. خصوصیات هیدرولیکی در توده سنگ بر مبنای مقادیر P-Q و منحنی‌های طبقه‌بندی شده و مقادیر عدد لوژان ارزیابی می‌شود. البته این نکته باید مدنظر قرار بگیرد از آنجایی که آزمایش فشار آب تنها در یک گمانه انجام می‌شود و گمانه دومی برای مشاهده در این آزمایش وجود ندارد، نتیجه‌های آن به طور دقیق شرایط هیدرولیکی توده سنگ را توصیف نمی‌کند (Karbala et al., 2009).

در شکل ۵-۱، تجهیزات بکار رفته در آزمایش فشار آب و نحوه انجام آزمایش به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: شماتیک از آزمایش فشار سیال به همراه نتایج (Quinn et al., 2013)

فشارها در آزمایش فشار آب، در ۵ مرحله که سه پله ابتدایی فشار افزایش و در دو پله پایانی فشار کاهش می‌یابد طراحی شده است. به منظور اندازه‌گیری حجم آب تزریقی کنتوری بر روی مسیر آب نصب می‌شود. همچنین برای کنترل فشار در مقطع از یک عدد با فشارسنج (مانومتر) استفاده می‌شود (Stucky Pars Engineering Co., 2009).

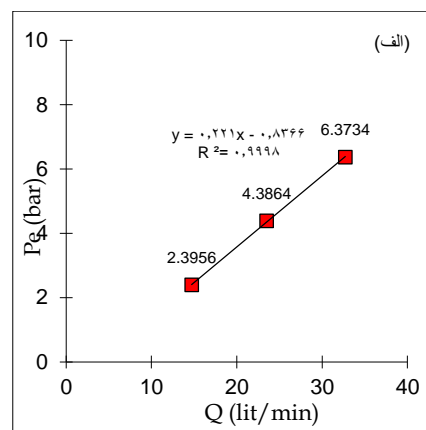
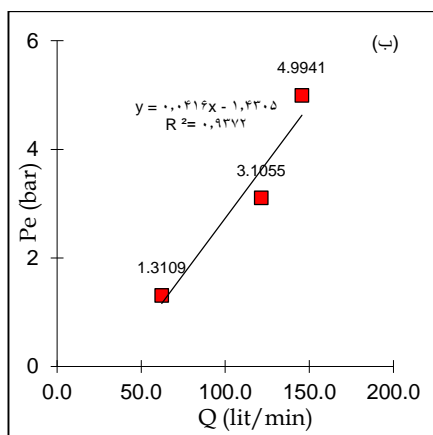
### ۵.۳ تحلیل نتایج آزمایش‌های فشار ثابت

مطابق روش مرسوم در آزمایش‌های هیدرولیکی، نتایج بدست آمده از آزمایش فشار آب به شکل نمودار گرادیان فشار در برابر نرخ جریان سیال رسم شده است. اطلاعات خام برای جریان در هر مرحله از یک آزمایش در یک گراف رسم شده تا رژیم جریان سیال مورد ارزیابی قرار بگیرد. به منظور تعیین نوع جریان با توجه به محدود بودن داده‌ها در آزمایش فشار آب، مشابه مطالعه انجام شده توسط کوین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از رسم نتایج نرخ تزریق آب به گمانه (Q) در برابر فشار موثر در گمانه (P) نوع الگوی جریان مشخص می‌شود. چنانچه برای داده‌های که خط بین دو نقطه از مبدا عبور کند جریان خطی ولی در غیر اینصورت جریان غیرخطی لحاظ می‌گردد (Quinn, Cherry, et al., 2011). شکل ۵-۲ این روش تعیین الگوی جریان برای گمانه‌های B 435 را نشان می‌دهد. در بعضی از آزمایش‌ها برای مقادیر کم نرخ جریان جریان کاملاً خطی است و از مبدا عبور می‌کند ولی با افزایش نرخ جریان نتایج از حالت خطی منحرف می‌شود.

در رفتار خطی جریان سیال مقدار  $\nabla P/Q$  مقدار ثابتی است ولی برای فشارهای تزریق بالا این مقدار تغییر می‌کند و به دلیل افت اصطکاکی بیشتر از حالت خطی منحرف می‌شود. بنابراین مقدار  $\nabla P/Q$  افزایش می‌یابد ولی چنانچه تحت فشار تزریق بازشدگی ناپیوستگی در سنگ افزایش یابد و اتساع رخ

1 -Quinn

دهد مقدار  $\nabla P/Q$  کاهش می‌یابد. البته نشت جریان سیال و فرار سیال از پکر به بالا و پایین محدوده آزمایش هم مشابه حالت اتساع اثر می‌گذارد.



شکل ۵-۲: نتایج آزمایش فشار آب در گمانه B435 در دو مقطع (الف) ۲۰-۲۵ متر (ب) ۵۵-۶۰ متر

#### ۴.۵ تحلیل نتایج آزمایش

از میان گمانه‌های پر تعدادی که برای مطالعه سد و نیروگاه بختیاری چهار گمانه B435، TG2، GL402 و GL404 با هدف بررسی نتایج آزمایش فشار آب انتخاب شده است. جدول ۵-۱ در خلاصه از مشخصات این چهار گمانه آورده شده است. طول مورد آزمایش در اغلب موارد ۵ متر بوده ولی در چند مورد برای ۳ متر هم آزمایش انجام شده است.

جدول ۵-۱: مشخصات گمانه‌های مورد مطالعه

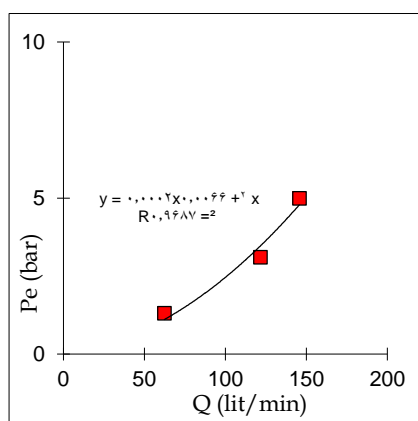
گمانه	محل	عمق گمانه (متر)	تعداد آزمایش
B435	فراز بند	۶۰	۱۱
B440	تکیه گاه راست	۱۵۰	۲۹
GL402	تکیه گاه چپ	۱۰۰	۱۹
GL404	تکیه گاه چپ	۱۵۰	۳۲

به منظور بررسی نتایج بدست آمده از ۹۱ آزمایش فشار آب در این گمانه‌ها، نتایج پله‌های افزایش فشار به صورت تابعی از نرخ جریان سیال رسم شده است تا رژیم جریان سیال مورد ارزیابی قرار بگیرد.

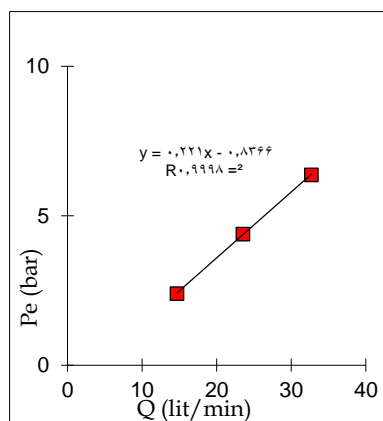
پس از بررسی نمودارها سه الگوی رفتاری برای جریان سیال در آزمایش فشار سیال مشخص شد که سه نوع رابطه بین نرخ جریان حجمی سیال با گرادیان فشار حاکم است.

الف- رابطه خطی: رابطه خطی بین نرخ جریان با فشار که با نام قانون دارسی شناخته می‌شود و در صورتی که اثرات اینرسی کم باشد این رابطه مشابه حالت (الف) شکل ۳-۵ پدیدار می‌گردد. در برخی از آزمایش‌ها گمانه‌های مورد مطالعه این نوع رفتار مشاهده شده است.

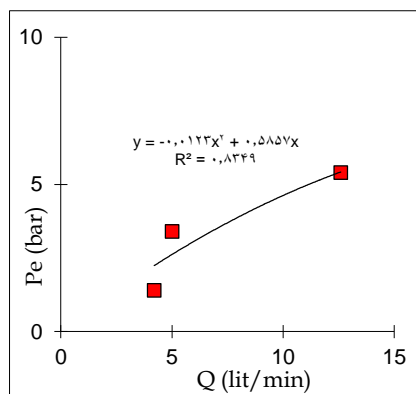
ب- رفتار غیرخطی به خاطر اثر اینرسی زیاد: مشابه حالت (ب) در شکل ۳-۵ انحراف از رفتار غیرخطی در این نوع رفتار مقدار گرادیان فشار بیشتر از مقدار نرخ جریان افزایش می‌یابد (مقدار آبخوری به نسبت فشار گمانه کمتر است) و به جریان غیر دارسی شناخته می‌شود.



(ب) مقطع مورد آزمایش ۵۵-۶۰ متری



(الف) مقطع مورد آزمایش ۳۰-۳۵ متری



(ج) مقطع مورد آزمایش ۱۰-۱۵ متری

شکل ۳-۵: رابطه بین نرخ جریان با گرادیان فشار در گمانه‌ی GL402



ج- غیرخطی به خاطر اتساع درزه: مطابق نمودار (ج) در شکل ۵-۳ برای برخی از آزمایش‌های در گمانه‌ها مقدار نرخ جریان بیشتر از فشار افزایش می‌یابد (مقدار آبخوری بیشتر گمانه در فشار بیشتر) که این می‌تواند به اتساع ناپیوستگی‌ها و افزایش آبخوری مقطع با افزایش فشار مرتبط باشد البته فرار سیال از اطراف پکر هم می‌تواند دلیل این نوع از رفتار سیال باشد. با توجه به پیچیدگی‌ها بسیار زیاد این نوع رفتار در این فصل مورد بررسی قرار نگرفته است.

در خصوص دلایل ایجاد رابطه غیرخطی به خاطر اثر اینرسی زیاد تحقیقات بسیاری در شکستگی سنگی انجام شده است. این انحراف از جریان خطی می‌تواند در نتیجه افت اینرسی قابل ملاحظه یا به دلیل اغتشاش القا شده با نوسانات سرعت باشد (Qian et al., 2005; Javadi et al., 2010). قبل از شروع اغتشاش، وقتی که اثر اینرسی به خاطر پیچ و خم داری مسیر جریان زیاد شود در اعداد رینولدز کم جریان غیرخطی رخ می‌دهد (Zimmerman and Bodvarsson, 1996b; Nazridoust et al., 2006; Zhang and Nemcik, 2013a)

به طور خلاصه عمده‌ترین دلیل برای رخداد غیرخطی را می‌توان در زبری سطح شکستگی، تغییر مسیر جریان سیال، تغییر بازشدگی مکرر در طول جریان می‌توان نام برد. همان‌طور که در فصل دو توضیح داده شد دو رابطه فورچه‌یمر و ایزلابش برای توصیف این جریان سیال در شکستگی سنگی ارائه شده است که رابطه فورچه‌یمر قادر است به خوبی این نوع رفتار را توصیف کند. برازش آماری چند جمله درجه دوم با صحت بالایی نتایج جریان غیرخطی آزمایش فشار آب را توصیف می‌کند ( $R^2 > 0.95$ ) و نشان دهنده تخمین خوب رابطه فورچه‌یمر برای این نوع از جریان است. در جدول ۵-۲ مقادیر ضرایب A و B نشان داده شده است.

جدول ۵-۲: مقادیر ضریب خطی و غیرخطی معادله فورچهمیر

$R^2$	B	A	مقطع (متر)	گمانه	$R^2$	B	A	مقطع (متر)	گمانه
۰/۹۶	۹۴۰۶۳	۳۴	۱۵-۱۰	B440	۰/۹۹	۱۹۲۶۹۱	۱۵۱	۱۰-۵	B435
۰/۹۳	۸۰۴۶۳	۸۲۷	۵۵-۵۰		۰/۹۸	۱۶۲۷۱	۵۰/۵	۲۰-۱۵	
۰/۹۲	۴۵۹۹۳۴	۲۰	۶۰-۵۵		۰/۹۱	۱۱۳۱۹۱	۴۵	۴۵-۴۰	
۰/۹۹	۴۱۲۹۰۱	۱۱۱	۶۵-۶۰		۰/۹۹	۱۹۰۰۵۰	۴۶	۵۵-۵۰	
۰/۹۲	۷۸۴۵۷۷	۵۲/۶۷	۱۳۰-۱۲۵		۰/۹۶	۶۴۹۸۸	۳۹/۳۷	۶۰-۵۵	
۰/۹۹	۲۳۷۳۰	۱۸۰/۶	۲۰-۱۵	GL404	۰/۹۸	۸۵۲۷	۵/۵	۲۰-۱۵	GL402
۰/۹۵	۶۰۳۴۰	۲۵۵	۳۱,۵-۲۹		۰/۹۸	۱۲۵۶۷۳	۱۹۴	۴۵-۴۰	
۰/۹۹	۱۷۷۴۹۳	۴۸/۴	۴۰-۳۵		۰/۹۹	۴۳۷۷	۵۵۹	۵۰-۴۵	
۰/۹۴	۲۲۴۹	۷۳/۶۶	۵۵-۵۳		۰/۹۶	۴۳۴	۹۵	۶۵-۶۰	
۰/۹۹	۱۲۳۴۸۷	۸۴/۴	۶۰-۵۵		۰/۹۴	۱۲۷۴۵۲	۴۲۰	۷۰-۶۵	
					۰/۹۹	۷۸۶۷۱	۶۱۵	۸۰-۷۵	

## ۵.۵ معیار عدد رینولدز

همان‌طور که در فصل دوم و سوم شرح داده شد، در مکانیک سیالات معیار تعیین الگوی رفتاری جریان، عدد رینولدز است اما در آزمایش‌های صحرایی استفاده از این معیار بسیار پیچیده است. با توجه به این حقیقت که عدد رینولدز به طور منحصر به فرد برای جریان شعاعی در آزمایش‌های برجا تعریف نشده است و به دلیل این‌که گرادیان هیدرولیکی در شکستگی با فاصله از دیواره گمانه کاهش می‌یابد بنابراین تمامی اعداد رینولدز برای جریان در دیواره گمانه (حداکثر مقدار سرعت) استفاده شده است.

موارد محدودی از تعیین عدد رینولدز بحرانی در آزمایش‌های برجا تاکنون گزارش شده است (Qian et al., 2011). در شرایط آزمون‌های صحرایی عدد رینولدز بحرانی به بازشدگی شکستگی‌ها، عرض و زبری شکستگی‌ها، مواد پرکننده شکستگی‌ها و اتصال شکستگی به یکدیگر بستگی دارد.

در هر بخش از گمانه تعداد شکستگی‌ها و جهت‌داری آن با استفاده از نگاره‌های زمین‌شناسی تعیین شده است. عدد رینولدز برای هر شکستگی به تنهایی تخمین زده نمی‌شود ولی عدد رینولدز معادل برای تمام مقطع آزمایش قابل محاسبه است.

در این فصل از رابطه (۲-۱۷) ارایه شده توسط جوادی و همکاران (۲۰۱۴) در مقیاس آزمایشگاهی،

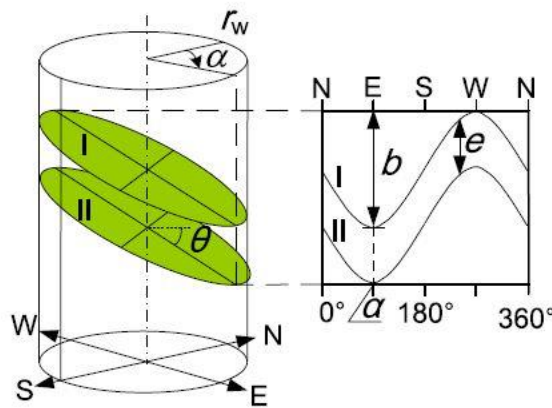
برای محاسبه عدد رینولدز بحرانی در آزمایش‌های برجا استفاده شده است و مقدار تخمینی برای  $W$

(عرض شکستگی) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است (مطابق شکل ۴-۵):

$$w = \frac{2\pi r_w}{\cos\theta} \quad (1-5)$$

که در این رابطه شعاع گمانه و  $\theta$  شیب شکستگی است. مقادیر تخمین زده شده برای عدد رینولدز

بحرانی برای مقاطع مختلف گمانه در جدول نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: محاسبه عرض شکستگی در دیواره گمانه (Chen et al., 2015)

جدول ۳-۵: اعداد رینولدز بحرانی

رینولدز بحرانی	مقطع (متر)	گمانه	رینولدز بحرانی	مقطع (متر)	گمانه
۲/۸	۱۵-۱۰	B440	۷/۰	۱۰-۵	B435
۵/۲	۵۵-۵۰		۳/۸	۲۰-۱۵	
۲/۱	۶۰-۵۵		۳/۰	۴۵-۴۰	
۲/۶	۶۵-۶۰		۳/۵	۵۵-۵۰	
۱/۷	۱۳۰-۱۲۵		۲/۹	۶۰-۵۵	
۱۴/۴	۳۱,۵-۲۹	GL404	۵/۲	۲۰-۱۵	GL402
۲/۷	۴۰-۳۵		۱۵/۱	۴۵-۴۰	
۷/۰	۶۰-۵۵		۱۳/۳	۷۰-۶۵	

همان‌طور که در جدول مشخص است مقادیر رینولدز بحرانی در گمانه‌های B435, B440, GL404 با افزایش عمق یک روند نزولی را طی می‌کند. شاید این مساله را بتوان به افزایش تنش‌های برجا وارده بر ناپیوستگی‌های موجود در گمانه تحت تاثیر افزایش عمق مرتبط دانست. همانگونه که در پژوهش‌های آزمایشگاهی مشاهده شده است، با افزایش تنش جانبی موجب انحراف زودتر رفتار جریان سیال از حالت خطی به غیرخطی در شکستگی می‌شود.

مقادیر رینولدز بحرانی در محدوده‌ی ۱۵ تا ۱/۵ تغییر می‌کند و برای برخی از مقاطع آزمایش فشار آب کمتر از مقدار آن در حالت آزمایشگاهی است. دلیل کمتر بودن عدد رینولدز بحرانی در آزمایش‌های درجا می‌تواند به عوامل متعددی مرتبط دانست. در آزمایش‌های درجا برخلاف آزمایش‌های آزمایشگاهی، در هر آزمایش با تعدادی شکستگی فعال در رفتار هیدرولیکی مواجه است. از آنجاکه شروع جریان غیرخطی وابسته به نرخ جریان است و به دلیل وجود چند شکستگی در محدوده آزمایش که هر یک بازشدگی متفاوتی دارند. جریان در هر شکستگی انتظار می‌رود که انحراف از رفتار خطی در هر شکستگی در نرخ جریان متفاوتی صورت پذیرد و این به تغییر تدریجی از جریان خطی خواهد کرد.

## ۵.۶ جمع بندی

در این فصل نتایج آزمایش‌های فشار آب در چهار گمانه مطالعاتی سد و نیروگاه بختیاری با هدف شناخت بهتر رفتار سیال در شکستگی سنگ در مقیاسی بزرگ‌تر از مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از منحنی‌های P-Q رژیم رفتاری جریان سیال مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها انحراف از رفتار خطی در نرخ تزریق کم را نشان می‌دهد. برآزش غیرخطی از نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رابطه فورچه‌یمر به خوبی قادر است، رفتار غیرخطی جریان سیال را توصیف کند. همچنین ضرایب خطی و غیرخطی این معادله مورد ارزیابی قرار گرفت.

با استفاده از روابطی که برای آزمون‌های آزمایشگاهی ارایه شده بود و با کمک نگاره‌های زمین‌شناسی عدد رینولدز بحرانی در توده‌سنگ محاسبه شد. مقادیر رینولدز بحرانی برای آزمایش‌های صحرائی مدنظر

در محدوده‌ی ۱۵ تا ۱/۵ تغییر می‌کند، این مقادیر از مقادیر رینولدز بحرانی بدست آمده در آزمایشگاه کمتر است. دلیل این تفاوت در آزمایش‌های درجا برخلاف آزمایش‌های آزمایشگاهی، در هر آزمایش با تعدادی شکستگی فعال در رفتار هیدرولیکی مواجه است. از آنجاکه شروع جریان غیرخطی وابسته به نرخ جریان است و به دلیل وجود چند شکستگی در محدوده آزمایش که هر یک بازشدگی متفاوتی دارند. جریان در هر شکستگی انتظار می‌رود که انحراف از رفتار خطی در هر شکستگی در نرخ جریان متفاوتی صورت پذیرد و این به تغییر تدریجی از جریان خطی خواهد کرد.

## فصل ششم: مطالعات میدانی

## ۱.۶ مقدمه

با توجه به رویکرد این پژوهش در بکارگیری مطالعات صورت گرفته در خصوص رفتار هیدرومکانیکی شکستگی سنگ در صنعت، مطالعه رفتار پرده آب در مغار ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام انتخاب شد. شرکت پایانه‌های نفتی ایران به عنوان متولی ذخیره‌سازی نفت خام در کشور، یکی از توده‌سنگ‌های در نظر گرفته شده برای ساخت مغار در محدوده سد شمیل را برای مطالعه موردی به این پژوهش معرفی کرد. برای مدل‌سازی توده‌سنگ مذکور نیاز به برداشت خصوصیات هندسی شکستگی‌ها می‌باشد. در این فصل به بیان مطالعه میدانی صورت گرفته در توده‌سنگ فوق‌الذکر پرداخته شده است. نخست ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ با استفاده از روش خط برداشت، جمع‌آوری شد، که این ویژگی‌ها شامل تعداد درزه، جهت‌داری، فاصله‌داری، طول خط اثر و بازشدگی ناپیوستگی می‌باشد. سپس توابع آماری منطبق بر هریک از این ویژگی‌ها برآورد شده است.

## ۲.۶ انتخاب ساختگاه مطالعه

شرکت پایانه‌های نفتی به عنوان سازمان متولی ذخیره‌سازی نفت خام در کشور، با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی موثر در مکان‌یابی مغارهای زیرزمینی اقدام به شناسایی محدوده‌های با پتانسیل ساخت مغار زیرزمینی نموده است. مهمترین الزامات مدنظر این شرکت در مکان‌یابی نزدیکی منطقه مورد مطالعه برای ساخت مغار بدون پوشش، انتخاب ساختگاهی در محدوده‌ای به پهنا ۱۰۰ کیلومتر از حاشیه خلیج فارس و دریای عمان است (علی وطنی، ۱۳۹۳).

از سوی شرکت پایانه‌های نفتی، مطالعات امکان‌سنجی فنی اقتصادی در خصوص مکان‌یابی مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت انجام شده است و توده‌سنگی در نزدیکی ساختگاه سدهای شمیل و نیان به عنوان یکی از گزینه‌های پیشنهادی مطالعه انتخاب گردید.

عنوان: مدل‌سازی رفتار توامان هیدرومکانیکی سنگ با نگاه ویژه به طراحی پرده آب در مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام

سدهای شمیل و نیان در شمال شرقی شهر بندرعباس و در بخش شمالی جاده اصلی بندرعباس-میناب قرار دارد. شکل ۶-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به ساختگاه توده‌سنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱: موقعیت جغرافیایی توده‌سنگ در محدوده سد شمیل

## ۱.۲.۶ مشخصات زمین‌شناسی عمومی منطقه

بلندی‌های گستره طرح را کوه‌های شمیل، نیان، پشتکوه تشکیل می‌دهند. رخنمون‌های گوناگون سنگ‌های رسوبی و آذرین گستره را در بر می‌گیرد. سنگ‌های آواری سازند آجاجاری، کنگلومرای شمیل و کنگلومرای بختیاری در این ناحیه رخنمون دارند. ساختار زمین‌شناسی ناحیه به لحاظ ویژگی رسوبی سازندهای یادشده، پایین بودن تراوایی و بالا بودن فرسایش پذیری، که خود متناسب با درجه سیمان‌شدگی و ماهیت لیتولوژیکی سنگ‌ها می‌باشد، از نوع بدبوم است. آبراهه‌ها و دره‌های فراوانی تپه‌ها را قطع می‌کنند. آبراهه‌ها به طور نسبی تنگ، ژرف و دیواره‌های آنها کم و بیش عمودی است. آبراهه‌ها در کنگلومرای با سیمان‌شدگی ضعیف، پهن‌ترند. از آنجایی که شکل بیشتر دره‌ها نامتقارن است، به این ترتیب دامنه‌هایی که در جهت گودی رودخانه قرار دارند پرشیب و گاهی به طور کامل عمودی هستند ولی دامنه‌های دیگر شیب عمومی کمتری دارند (طاهری و همکاران، ۱۳۸۴).



در این ناحیه سازندهایی از کرتاسه‌ی بالایی تا پلیوسن از واحد ساختاری زاگرس با سنگ‌های پلیوسن رخنمون دارند. گنبد‌های نمکی سری هرمز در شمال غربی و غرب ساختگاه در فاصله‌ی زیادی دیده می‌شوند.

گسترده‌ترین سازنده ناحیه که گسترده ساختگاه‌ها و دریاچه مشترک سدها را بوجود آورده است، سازند آغاچاری است (طاهری و همکاران، ۱۳۸۴).

### ۳.۶ برداشت صحرائی توده‌سنگ مورد نظر

ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر جهت‌داری، فاصله‌داری، فراوانی و هندسه سطح آن، با استفاده از برداشت صحرائی توده‌سنگ مشخص می‌شود. برداشت این مشخصات هندسی از روی مغزه‌های حفاری و برداشت از رخنمون‌های سنگی دو روش مرسوم برای برداشت ناپیوستگی‌ها هستند. در این پژوهش با توجه به در دسترس نبودن مغزه‌های حفاری برای توده‌سنگ امکان برداشت ناپیوستگی از روی مغزه‌های حفاری میسر نمی‌باشد بنابراین از روش برداشت از رخنمون استفاده شده است. دو روش خط برداشت و پنجره برداشت برای برداشت از رخنمون توده‌سنگ، تاکنون معرفی شده است.

در این تحقیق برای مطالعه مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها از روش خط برداشت استفاده شده است. طول کلی خط برداشت ۴۸۰ متر بود، مجموعاً تعداد ۵۵۷ شکستگی برداشت شده است. در شکل ۶-۲ نمونه برگه برداشت منطقه مورد مطالعه و در شکل ۶-۳ و شکل ۶-۴ برداشت صحرائی از ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ نشان داده شده است.

DISCONTINUITIES SURVEY DATA SHEET										
GENERAL INFORMATION										
Location موقعیت	Station No. شماره ایستگاه	Date تاریخ	Day روز	Month ماه	Year سال					
			16	1	1393					
Discontinuity data sheet No.										
3					7					
No.	Type	Dip	Dip direction	Permeance (cm)	Termination	Apertures (width)	Nature of filling	Spacing (cm)	IRI	Remarks
76	شکستگی	56	115	231	2	2	filled	23	2-4	
77	شکستگی	52	215	581	1	0.5	Crustal	35	14-16	
78	شکستگی	38	193	421	2	0.5	Crustal	43	14-16	
79	شکستگی	73	58	127	1	1	clean	52	2-4	
80	شکستگی	65	292	885	1	1	clean	32	4-6	
81	شکستگی	70	33	115	1	3	clean	29	16-18	
82	شکستگی	38	73	224	1	4	clean	163	14-16	

شکل ۶-۲: نمونه برگه ثبت ناپیوستگی‌ها با روش خط برداشت در منطقه مورد مطالعه

شکستگی در قالب سه شبکه شکستگی اصلی تفکیک و خصوصیات هندسی مورد نیاز برای هر سیستم شکستگی محاسبه شده است. از نتایج این برداشت صحرایی در ساخت هندسه توده‌سنگ در مدل‌سازی و برای مدل‌سازی هندسه از روش شبکه شکستگی مجزا (DFN) استفاده شده است. بنابراین ضروری است، ویژگی‌های هر دسته شکستگی و توابع آماری منطبق بر آن برآورد گردد. خصوصیات مورد نیاز در ساخت هندسه DFN برای هر شبکه شکستگی شامل: تابع توزیع طول خط اثر، جهت‌داری متوسط، ضریب فیشر، فراوانی و بازشدگی درزه می‌باشد که در ادامه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.



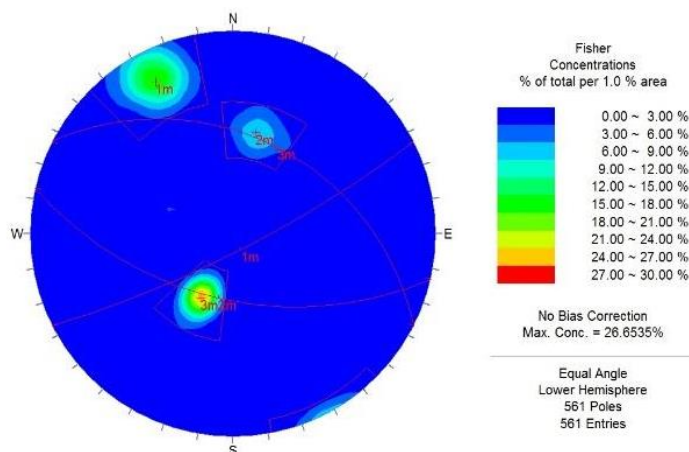
شکل ۶-۳: برداشت صحرایی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ



شکل ۴-۶: برداشت بازشدگی و مواد پرکننده شکستگی‌های موجود در رخنمون توده‌سنگ

### ۱.۳.۶ جهت داری شکستگی‌ها

بیش از ۵۰۰ داده از ناپیوستگی‌های موجود در رخنمون توده‌سنگ واقع در محدوده ساختگاه مورد مطالعه برداشت شد. با استفاده از نرم افزار *Dips* تعداد دسته درزه اصلی، ثابت فیشر و جهت داری تعیین گردید. تصاویر استریونوت دسته درزه‌ها، در (شکل ۵-۶) نشان داده شده است. با توجه به این تصاویر، توده‌سنگ مورد مطالعه شامل سه دسته درزه اصلی می‌باشد که در جدول ۱-۶ خصوصیات این دسته درزه‌ها شامل تعداد، جهت داری و ثابت فیشر برای هر دسته درزه بدست آمده است.



شکل ۵-۶: استریونوت دسته درزه‌های اصلی و جهت داری هر دسته درزه برای توده‌سنگ مورد مطالعه

جدول ۶-۱: خصوصیات دسته درزه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه

دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	ثابت فیشر K	متوسط طول خط اثر (cm)
J1	۸۰	۱۵۳	۱۰۱/۷۲	۳۳۲
J2	۵۳	۲۰۵	۱۰۰/۹۷	۳۳۱
J3	۴۰	۲۷	۱۵۲/۶۷	۳۹۰/۵

پس از تفکیک دسته درزه و تعیین درزه‌های غالب و باتوجه به داده‌های حاصله از برداشت‌های خطی، نوع و اولویت توابع توزیع آماری حاکم بر طول خط اثر و بازشدگی برای هر دسته درزه با استفاده از نرم افزار EasyFit بدست آمده است که نتایج آن در ادامه ارایه شده است.

۲.۳.۶ اندازه شکستگی‌ها

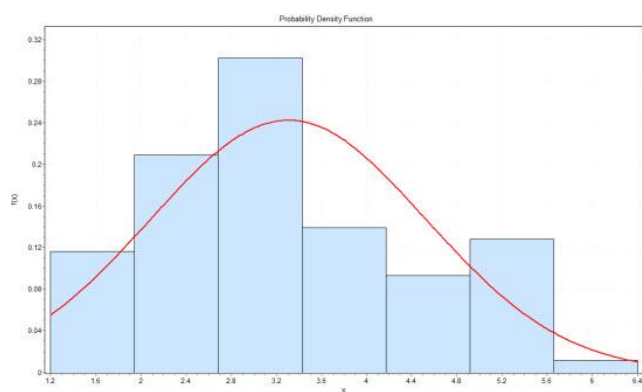
بر اساس برازش تابع توزیع‌های حاکم بر طول خط اثر برای هر دسته درزه، توابع توزیع حاکم بر طول خط اثر در جدول ۶-۲ اولویت‌بندی شده و همچنین در شکل ۶-۶، برازش تابع توزیع نرمال بر روی داده‌های خط اثر شکستگی‌ها نشان داده شده است.

جدول ۶-۲: اولویت‌بندی تابع توزیع‌های حاکم بر طول خط اثر هر دسته درزه

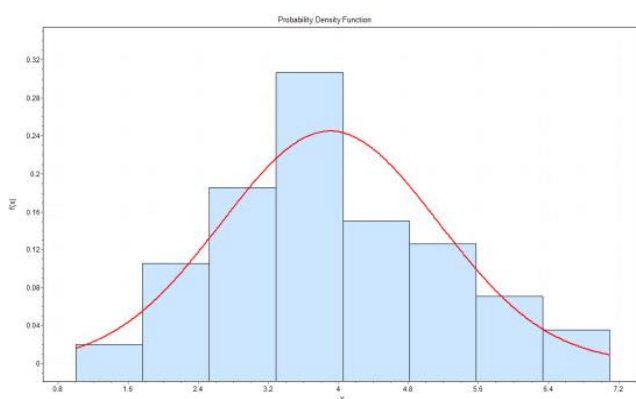
اولویت بندی توابع توزیع آماری				
۴	۳	۲	۱	
توان	لاگ نرمال	لاگ نرمال (3p)	نرمال	J <sub>1</sub>
توان	لاگ نرمال (3p)	لاگ نرمال	نرمال	J <sub>2</sub>
توان	لاگ نرمال	لاگ نرمال (3p)	نرمال	J <sub>3</sub>

با توجه به نتایج جدول بالا مشخص است که تابع توزیع آماری منطبق بر طول خط اثر ناپیوستگی‌ها تابع توزیع نرمال است. این نتیجه با مطالعات انجام شده در این خصوص در دیگر منابع هم منطبق است.

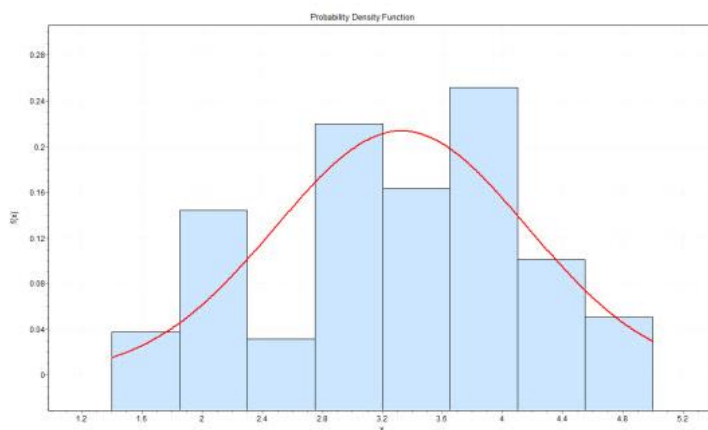
در جدول ۶-۳ نتایج تحلیل‌های تابع توزیع نرمال حاکم بر طول خط اثر دسته درزه آورده شده است:



(الف): شکستگی ۱



(ب): شکستگی شماره ۲



(ج): شکستگی شماره ۳

شکل ۶-۶: برازش تابع توزیع نرمال بر روی داده‌های خط اثر شکستگی‌ها

جدول ۶-۳: پارامترهای تابع توزیع نرمال بر اندازه شکستگی برای هر دسته درزه

دسته درزه	میانگین (متر)	انحراف از معیار (متر)
J <sub>1</sub>	۳/۳۲	۰/۸۴
J <sub>2</sub>	۳/۳	۱/۲۳
J <sub>3</sub>	۳/۹	۱/۲۴

۳.۳.۶ بازشدگی ناپیوستگی‌ها

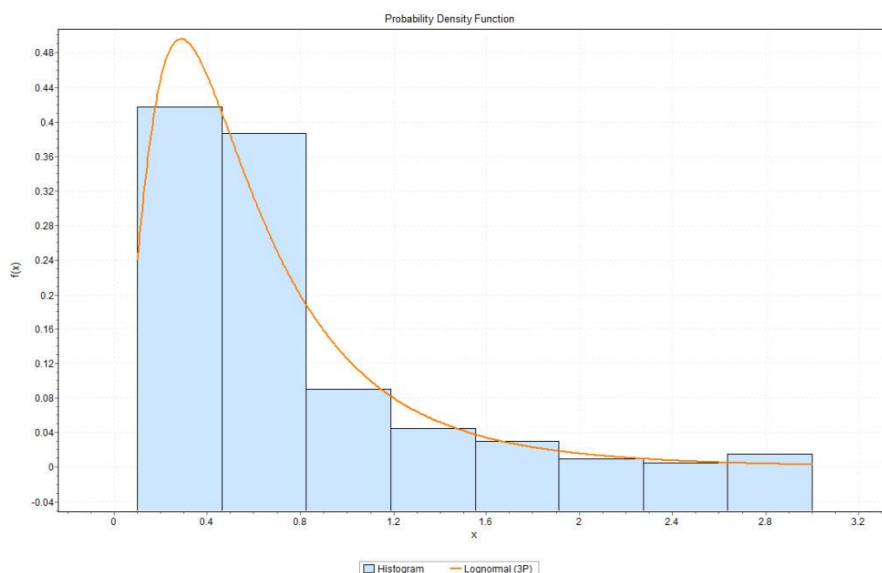
بازشدگی درزه همراه با زبری سطح درزه مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر جریان سیال عبوری از درزه می‌باشند. بنابراین برای ساخت DFN، لازم است تابع توزیع حاکم بر بازشدگی هر دسته درزه مشخص گردد. این تابع توزیع برای هر دسته با استفاده از نرم افزار EasyFit برازش شده و در جدول ۶-۴ نمایش داده شده است.

جدول ۶-۴: اولویت‌بندی تابع توزیع‌های حاکم بر بازشدگی شکستگی در هر دسته درزه

اولویت بندی توابع توزیع آماری		۱	۲	۳	۴
دسته درزه	J <sub>1</sub>	لاگ نرمال (3p)	لاگ نرمال	نمایی (2p)	نرمال
	J <sub>2</sub>	لاگ نرمال (3p)	نمایی (2p)	لاگ نرمال	نرمال
	J <sub>3</sub>	لاگ نرمال (3p)	لاگ نرمال	نمایی (2p)	نرمال

در شکل ۶-۷، برازش تابع توزیع لاگ نرمال بر روی داده‌های دسته درزه ۱ نشان داده شده است.

همچنین پارامترهای آماری حاصل از تحلیل صورت گرفته برای تابع توزیع لاگ نرمال حاکم بر بازشدگی دسته درزه در جدول ۶-۵ آورده شده است.



شکل ۶-۷: برازش تابع توزیع لاگ نرمال بر روی داده های بازشدگی شکستگی های دسته درزه ۱

جدول ۶-۵: پارامترهای تابع توزیع لاگ نرمال بر بازشدگی شکستگی همراه با میانگین و انحراف از معیار

دسته درزه	میانگین (سانتیمتر)	انحراف از معیار (سانتیمتر)
J <sub>1</sub>	۰/۷	۰/۵۶
J <sub>2</sub>	۰/۷۶	۰/۶۸
J <sub>3</sub>	۰/۶۳	۰/۵۳

### ۴.۳.۶ فراوانی ناپیوستگی

فراوانی ناپیوستگی شکستگی ها در یک دسته شکستگی، به صورت تعداد متوسط شکستگی در واحد حجم توده سنگ تعریف می گردد و یکی از مهمترین ویژگی های هندسی ناپیوستگی ها است که یکی از پارامترهای مورد نیاز برای تولید شبکه ی شکستگی های مجزا (DFN) است. به منظور محاسبه فراوانی ناپیوستگی های توده سنگ با توجه به اطلاعات برداشت های زمین شناسی، نخست فراوانی ناپیوستگی در

واحد طول پیمایش خط برداشت و سپس برای محاسبه فراوانی حجمی از روابط ارایه شده توسط جینگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷) مطابق روابط (۱-۶) برای شرایط همسانگرد استفاده شده است.

$$P_{10} = \frac{N}{L} ; P_{10} = \frac{P_{32}}{2} ; P_{21} = \frac{\pi}{4} P_{32} \quad (1-6)$$

در رابطه (۱-۶) N تعداد درزه در هر دسته درزه و L طول خط برداشت بر حسب متر  $P_{21}$ ،  $P_{10}$ ،  $P_{32}$  به ترتیب فراوانی طولی، سطحی و حجمی درزه‌ها است.

جدول ۶-۶ مقادیر محاسبه شده برای فراوانی طولی و شدت حجمی هر یک از دست درزه‌ها آورده شده است: فراوانی یکی از مهمترین ویژگی‌های هندسی درزه‌ها است که اندازه‌گیری می‌شود. محاسبه فراوانی برای ساختن DFN جهت مدل‌سازی درزه‌ها محاسبه شده و برای محاسبه فراوانی سطحی و حجمی از روابط ارایه شده توسط جینگ و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است که نتایج در جدول ۶-۶ نشان داده شده است.

جدول ۶-۶: فراوانی طولی، سطحی و حجمی درزه‌ها در منطقه مورد مطالعه

دسته درزه	فراوانی طولی ( $m^{-1}$ )	شدت حجمی ( $m^2/m^3$ )
J <sub>1</sub>	۰/۰۷۸	۰/۱۵۵
J <sub>2</sub>	۰/۰۴۷	۰/۰۹۵
J <sub>3</sub>	۰/۱۷۵	۰/۳۳

#### ۴.۶ جمع بندی

با توجه به رویکرد این رساله در بکار بردن نتایج پژوهش صورت پذیرفته در صنعت، از سوی شرکت پایانه‌های نفتی توده‌سنگی در اطراف سدهای شمالی و نیان به عنوان یکی از گزینه‌های ساخت مغار

1- Jing



ذخیره‌سازی مورد مطالعه میدانی معرفی گردید. با هدف مدل‌سازی هندسه این توده‌سنگ، شکستگی در سطح توده‌سنگ برداشت شده است. سیستم شکستگی اصلی در توده‌سنگ و ویژگی‌های این شبکه‌های شکستگی شامل جهت‌داری، بازشدگی و طول خط اثر در توده‌سنگ مدنظر با استفاده از نرم افزار Easy Fit مورد بررسی آماری قرار گرفت و توابع آماری حاکم بر هر یک از پارامترهای هندسی محاسبه شد. از داده‌های بدست آمده در این فصل برای ساخت شبکه هندسی توده‌سنگ در فصل پیش‌رو استفاده شده است.

## فصل هفتم: مدل‌سازی عددی سامانه

پرده آب مغار بدون پوشش

ذخیره‌سازی نفت خام

## ۱.۷ مقدمه

در چند دهه اخیر ذخیره‌سازی نفت خام و دیگر مشتقات آن در مغارهای زیرزمینی به دلایل گوناگون در کانون توجه کشورهای مختلف بوده است. از دیدگاه اقتصادی، ایمنی، امنیتی، زیست محیطی و عملکردی مغارهای سنگی به نسبت مخازن سطحی گزینه برتری محسوب می‌شوند. پایداری مکانیکی مغار و کنترل نشت مواد هیدروکربنی به عنوان دو چالش عمده در خصوص طراحی و ساخت مغار بدون پوشش سنگی محسوب می‌شوند البته کنترل نشت مواد هیدروکربنی به نسبت پایداری مکانیکی مغار مساله ناشناخته‌تری است. کنترل نشت مواد هیدروکربنی در مغارهای بدون پوشش، با بهره‌گیری از جریان آب زیرزمینی انجام می‌شود. به این‌گونه که اگر آب با فشار بیشتر از فشار مواد هیدروکربنی در داخل ریزترک‌ها، درزه‌ها و سایر ناپیوستگی‌های توده‌سنگ به صورت پیوسته به داخل مغار در جریان باشد، مانع از نشت مواد هیدروکربنی به خارج از مغار می‌گردد. استفاده از این تکنیک مستلزم این است که فشار آب در توده‌سنگ اطراف مغار از فشار مواد هیدروکربنی ذخیره‌شده در داخل مغار بیشتر باشد، این معیار کنترل نشت به صورت گسترده در مدل‌سازی عددی مغارهای سنگی بدون پوشش استفاده شده است.

همان‌طور که در بخش ۸.۲ روش‌های محاسبات عددی برای مدل‌سازی جریان سیال در توده‌سنگ شرح داده شده از بین روش‌های محاسباتی روش شبکه شکستگی مجزا گزینه بهتری برای مدل‌سازی مغار ذخیره‌سازی نفت خام می‌باشد زیرا این گونه مغارهای در توده‌سنگ با کیفیت خوب و تعدادی محدودی ناپیوستگی احداث می‌شوند. در این گونه توده‌سنگ‌ها، ماده‌سنگ به نسبت شکستگی آب‌گذری ناچیزی دارد در نتیجه ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های موجود مسیر اصلی جریان سیال در توده‌سنگ هستند.

در این فصل در سعی شده با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی برداشت شده در فصل هفتم و روش شبکه DFN، مدل هندسی از توده‌سنگ ساخته شود. همچنین خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی در

نظر گرفته شده برای مدل با استفاده از آزمایش‌های انجام شده در فصل چهارم این تحقیق بدست آمده است. با استفاده از روش عددی المان مجزا و نرم افزار 3DEC به مدل‌سازی مغار بدون پوشش پرداخته شده است و عملکرد سامانه‌ی پرده آب برای زاویه‌های مختلف گمانه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین نرخ آب ورودی به مغار برآورد شده است.

## ۲.۷ رفتار توامان هیدرومکانیک

با توجه به هدف این تحقیق در بررسی رفتار توامان هیدرومکانیک در مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام، حفاری مغار باعث توزیع مجدد تنش در در توده‌سنگ می‌گردد و این تغییر تنش موجب تغییر بازشدگی شکستگی‌های موجود در سنگ می‌شود. تغییر بازشدگی باعث تغییر نفوذپذیری توده‌سنگ می‌گردد و فشار آب موجود در توده‌سنگ تغییر می‌کند. همزمان با این فرآیندها تغییر فشار آب موجب تغییر تنش توزیع تنش می‌گردد (Itasca Consulting Group, 2005).

در تحلیل رفتار توامان هیدرومکانیک در نرم افزار 3DEC، بازشدگی هیدرولیکی معادل تحت تنش جانبی صفر و جابجایی عمودی درزه به صورت رابطه (۱-۷) نشان داده می‌شود.

$$e = e_0 + u_n \quad (1-7)$$

در این رابطه  $e_0$  بازشدگی هیدرولیکی اولیه و  $u_n$  بسته شدگی عمودی درزه است که توسط مدل مکانیکی درزه بدست می‌آید. فشار سیال بر شکستگی به صورت رابطه (۲-۷) بیان می‌شود:

$$F_i = p n_i L d \quad (2-7)$$

که در این رابطه  $F_i$  فشار اعمالی به شکستگی توسط جریان،  $d$  عرض بلوک قطع شده توسط شکستگی،  $n_i$  بردار نرمال واحد از سطح درزه،  $L$  طول درزه است همچنین مقدار  $p$  از رابطه (۳-۷) محاسبه می‌شود:

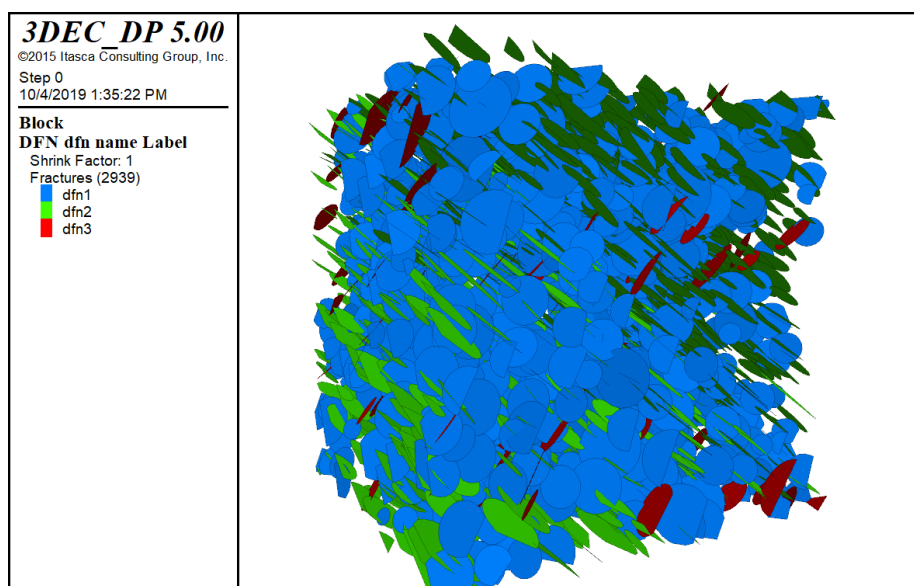
$$p = p_0 + K_w Q \frac{\Delta t}{V} - K_w \frac{\Delta V}{V_m} \quad (3-7)$$

در این رابطه،  $p_0$  فشار اولیه سیال،  $K_w$  مدول تغییر شکل پذیری حجمی سیال،  $Q$  مجموع نرخ جریان ورودی به دامنه از تمامی نقاط مجاور  $V$  حجم سیال  $\Delta t$  بازه گام زمانی است. در رابطه (3-7) عبارت اول و دوم و سوم نشان دهنده فشار اولیه سیال، فشار القایی سیال به دامنه و فشار القا شده فشرده‌گی دیواره شکستگی است. با این روش رفتار مکانیکی درزه مرتبط با رفتار جریان سیال می‌شود (Itasca Consulting Group, 2005).

### ۳.۷ ساخت هندسه مدل

از آنجایی که معمولا مغارهای بدون پوشش در توده‌سنگ با کیفیت خوب و تعدادی معدودی ناپیوستگی احداث می‌شود. در این گونه توده‌سنگ‌ها ماده‌سنگ به نسبت شکستگی آب‌گذری ناچیزی دارد در نتیجه ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های موجود مسیر اصلی جریان سیال در توده‌سنگ می‌باشند. بنابراین تحلیل واقعی تری از جریان سیال در توده‌سنگ مدل‌سازی شکستگی‌ها موجود است. روش شبکه شکستگی‌ها مجزا (DFN) روش مناسبی برای تحلیل جریان سیال در توده‌سنگ به نظر می‌رسد.

در این فصل سعی شده با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی برداشت شده و روش شبکه DFN هندسی ناپیوستگی موجود در توده‌سنگ ساخته شود. شکل ۱-۷، شبکه شکستگی‌هایی ایجاد شده در شبکه DFN را نشان می‌دهد. ابعاد در نظر گرفته شده برای شبکه DFN،  $40 \times 40 \times 40$  متر است.

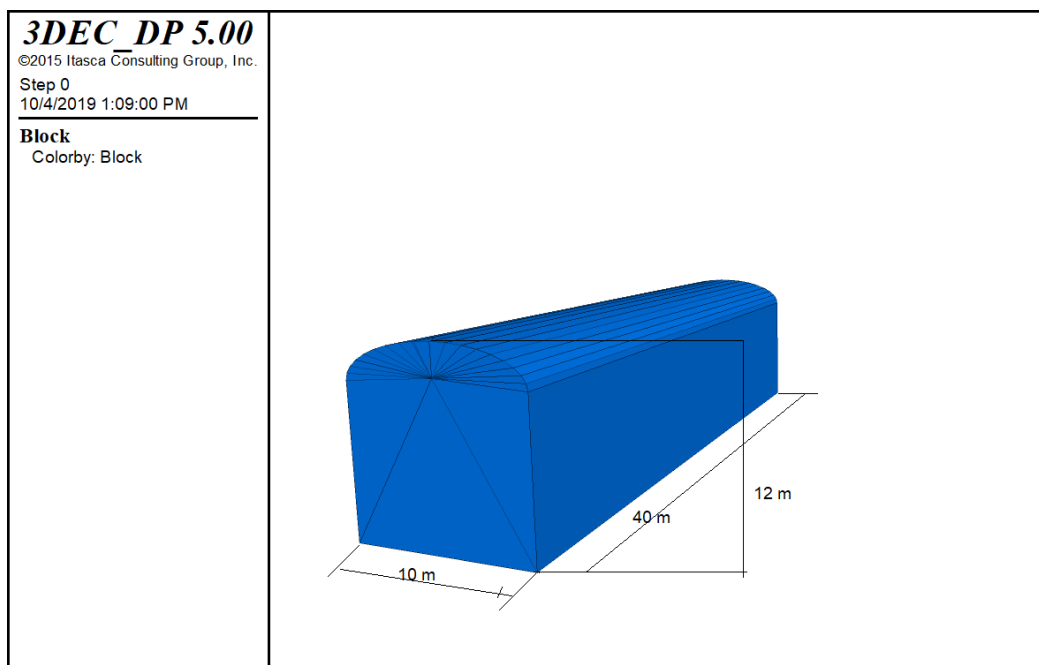


شکل ۷-۱: شبکه شکستگی ناپیوستگی DFN

در این شبکه DFN، از شکستگی‌های زیادی تشکیل شده است که در تحلیل و مدل‌سازی هیدرو-مکانیکی دیگر قابل استفاده نیست بنابراین باید تعداد شکستگی‌های به نحوی کاهش یابد که خصوصیات شبکه شکستگی اصلی حفظ شود. اقدامات انجام شده برای ساده‌سازی شبکه DFN شامل مراحل ذیل است:

- برای مطالعه جریان سیال در شکستگی‌ها باید اتصال بین شکستگی‌ها در DFN بررسی می‌شود. شکستگی‌های که با سایر شکستگی‌ها متصل نیستند و مشارکتی در مسیر سیال ندارند از مدل DFN حذف شده‌اند.
- شکستگی‌هایی که شیب و امتداد شیب تقریباً مشابه‌ای دارند باهم ترکیب شده و یک شکستگی بزرگ‌تر را تشکیل بدهند.
- با توجه به فاصله بین مغار با سامانه پرده آب، شکستگی‌هایی که از مرز مغار فاصله بیشتری دارند (بیشتر از ۲۰ متر) از شبکه شکستگی حذف می‌شوند.

در گام بعدی برای ساخت هندسه مدل ایجاد شکل مغار و انتخاب اندازه بلوک مورد مطالعه است. در این مطالعه شکل مغار مشابه نمونه‌های متداول در دنیا و با مقطع به شکل نعل اسبی با عرض ۱۰ متر و ارتفاع آن ۱۲ متر و شعاع نیم دایره بالایی ۲ متر برای مدل‌سازی انتخاب شده است. شکل ۲-۷ ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی مغار را نشان می‌دهد.

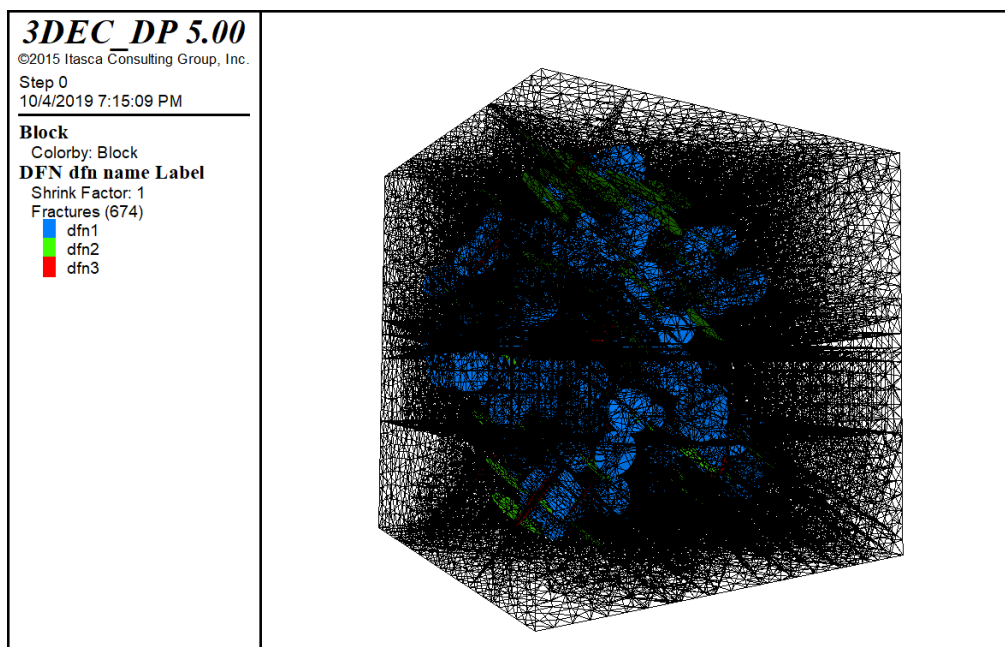


شکل ۲-۷: ابعاد و اندازه در نظر گرفته شده برای مغار

ابعاد توده‌سنگ برای مدل‌سازی متاثر از ابعاد لحاظ شده برای مغار است و یک بلوک به ابعاد  $40 \times 40 \times 40$  متر برای ساخته هندسه توده سنگ در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳-۷ بلوک مورد استفاده برای مدل‌سازی نشان داده شده است.

پس از ساخت هندسه توده‌سنگ و مغار، هندسه سامانه پرده آب می‌بایست در این توده‌سنگ ساخته

شود.

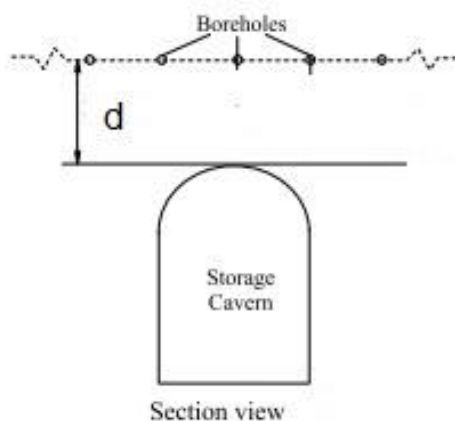


شکل ۷-۳- بلوک ساخته شده برای مدل‌سازی هندسه شکستگی

سامانه پرده آب از مجموعه از گمانه‌های منظم یا غیرمنظم تشکیل شده تا با استفاده از تزریق آب در این گمانه‌ها فشار منفذی در شکستگی‌های اطراف مغار افزایش یابد. طول گمانه‌های پرده آب بستگی به عرض مغار ذخیره‌سازی دارد. در این پژوهش طول گمانه‌های پرده آب ۵ متر از اندازه مغار ذخیره‌سازی بیشتر است. قطر گمانه‌ی پرده آب ۲۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است. فاصله‌داری گمانه‌های نسبت به هم ۲ متر است.

اختلاف ارتفاع بین گمانه‌ها و تاج مغار ذخیره‌سازی یکی از مهمترین پارامترهای طراحی سیستم پرده آب است (شکل ۷-۴). از لحاظ نظری، با توجه به این که فشار بخار گاز در تاج مغار ۰/۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است سیستم پرده آب باید حداقل ۱۰ متر بالاتر از تاج مغار باشد. در مغارهای اجرا شده در دنیا برای ایمنی، اختلاف ارتفاع بین گمانه‌ها و تاج مغار معمولاً بین ۲۰-۳۰ متر انتخاب شده است. تا حاشیه اطمینان ۵ تا ۱۵ متری از هد آب را فراهم کند. در این مدل با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی این اختلاف تراز همان ۱۰ متر لحاظ شده است.





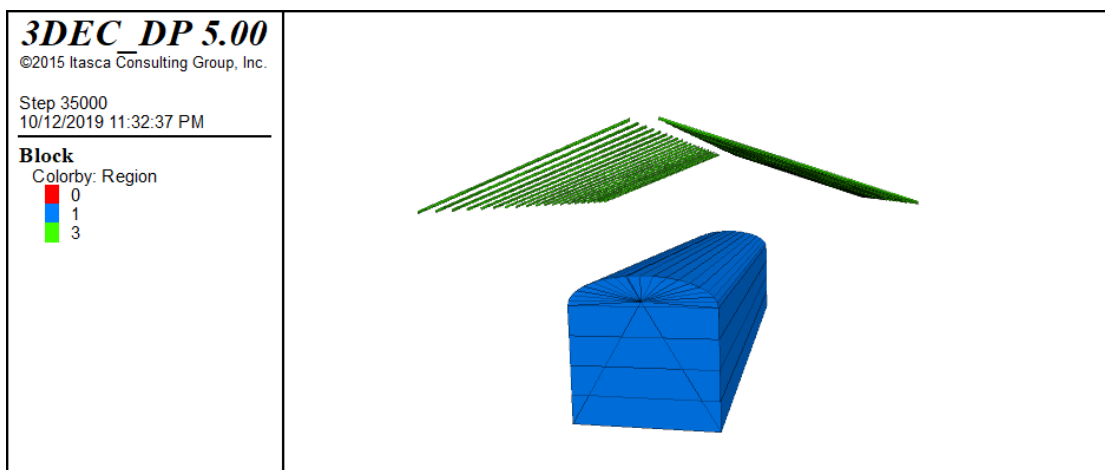
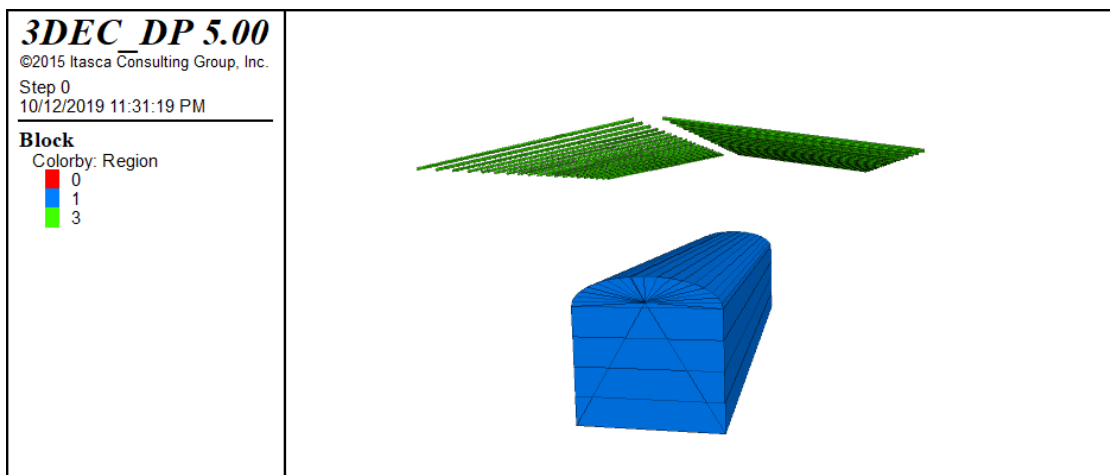
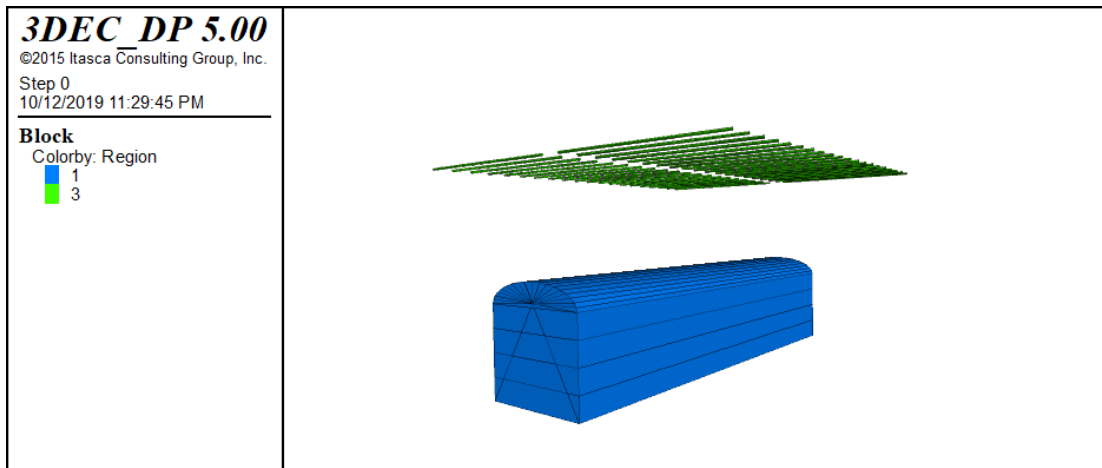
شکل ۴-۷: شماتیکی از جانمایی پرده آب در اطراف مغار

شکل ۵-۷ مهندس ساخته شده برای مغار ذخیره سازی به همراه گمانه های پرده آب نشان می دهد. در این تحقیق تعداد ۳ هندسه برای پرده آب در زوایای ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به افق ساخته شده است. زاویه گمانه ها نسبت به افق به عنوان پارامتر هندسی مورد مطالعه در این تحقیق انتخاب شده است.

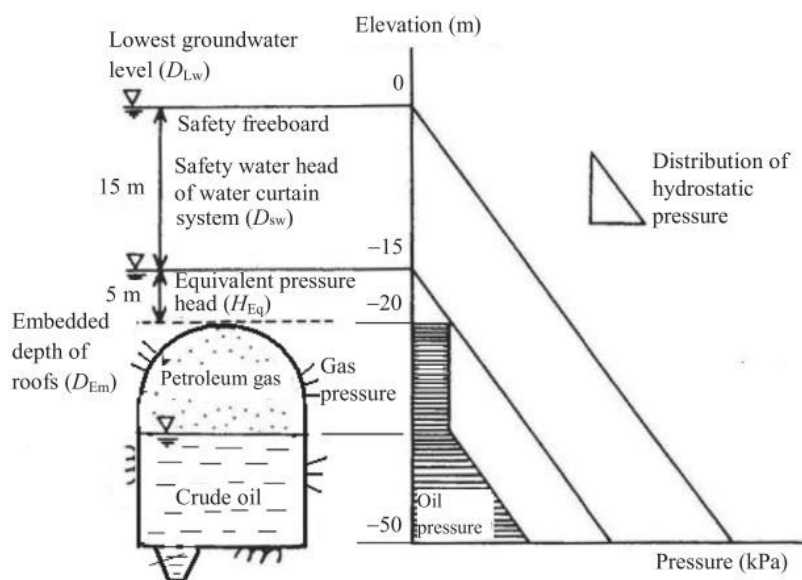
فشار در گمانه های پرده آب، به ارتفاع ذخیره سازی در مغارهای زیرزمینی، فشار گاز نفت خام در تاج مغارها، سطح آب زیرزمینی در توده سنگ، است (شکل ۶-۷):

$$P_{wct} > D_{Em} + H_{Sa} + H_{Eq} - D_{Lw} \quad (۴-۷)$$

در این رابطه فشار پرده آب،  $D_{Em}$  کمترین سطح آب در مرحله بهره برداری از مغار،  $H_{Sa}$  هد آب برای ضریب اطمینان (در مطالعات قبلی ۱۵ متر لحاظ شده است)، فشار نفت خام معادل فشار آب و  $D_{Em}$  ارتفاع است.



شکل ۷-۵: هندسه در نظر گرفته شده برای مغار، گمانه‌های پرده آب در مدل عددی (شیب گمانه‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به افق)



شکل ۶-۷: پارامترهای موثر در طراحی پرده آب (Li et al., 2016)

واضح است که رابطه (۴-۷) مبانی اساسی فشار آب را در طراحی سیستم پرده آب بیان می‌کند و تعیین فشار برای سیستم پرده آب و پس از بررسی دقیق در مورد جنبه‌های مهندسی هیدروژئولوژیکی توده سنگ پروژه می‌توان با دقت تعیین گردد. در این پژوهش فشار در داخل گمانه‌ی پرده آب ۱/۵ بار در نظر گرفته شده است.

#### ۴.۷ تخصیص خصوصیات مکانیکی

برای تخصیص خصوصیات مقاومتی توده سنگ از آزمایش‌ها سه محور انجام شده در فصل ۴ به همراه اطلاعات مربوط به طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ساختگاه استفاده شده است. خواص توده سنگ مطابق جدول ۱-۷ تعیین شده است.

جدول ۱-۷: مقادیر نهایی پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ

چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت فشاری (MPa)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
۳/۰۲۴	۳۸/۴۶	۸	۲۰/۶	-۰/۳۶۹

جدول ۲-۷: مقادیر لحاظ شده برای پارامترهای ژئومکانیکی شکستگی سنگ

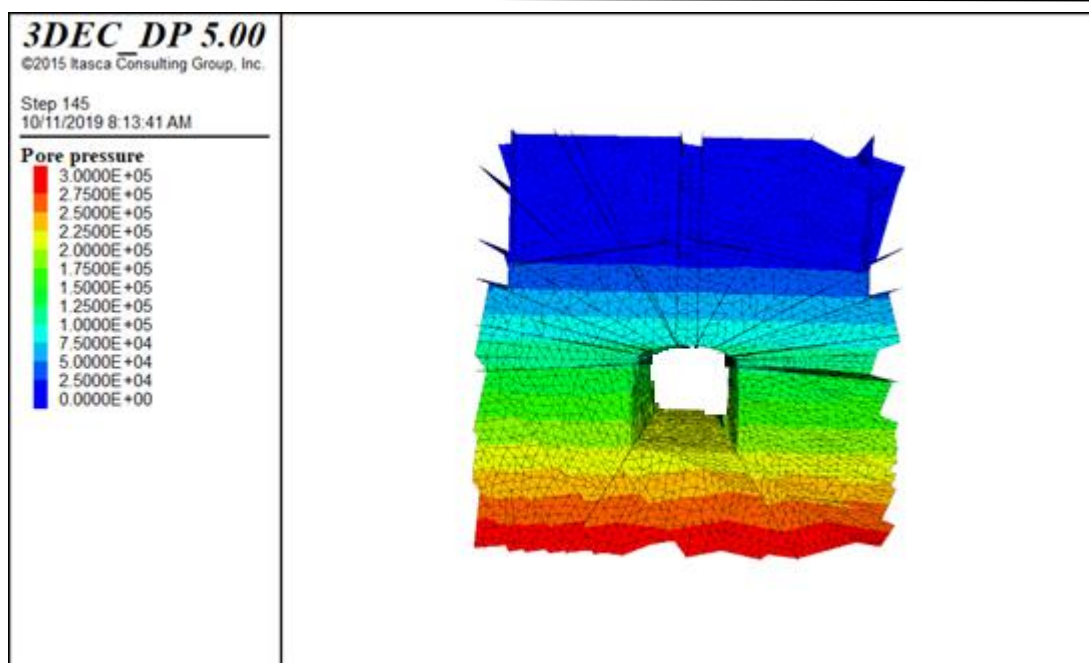
$K_S$	$K_n$	چسبندگی	ضریب اصطکاک	دسته درزه
$1/5 \times 10^6$	$7 \times 10^6$	$0.75 \times 10^6$	۳۸/۱	J <sub>1</sub>
$1/5 \times 10^6$	$7 \times 10^6$	$0.75 \times 10^6$	۳۸/۱	J <sub>2</sub>
$7/9 \times 10^5$	$3/94 \times 10^6$	$0.75 \times 10^6$	۳۸/۱	J <sub>3</sub>

## ۵.۷ فرآیند مدل‌سازی

پس از تخصیص خصوصیات مکانیکی به شکستگی و توده سنگ، به مدل اعمال می‌گردد. مدل مکعبی به طول، عرض و ارتفاع ۴۰ متر و عمق در نظر گرفته شده برای مغار ۱۰۰ متر است.

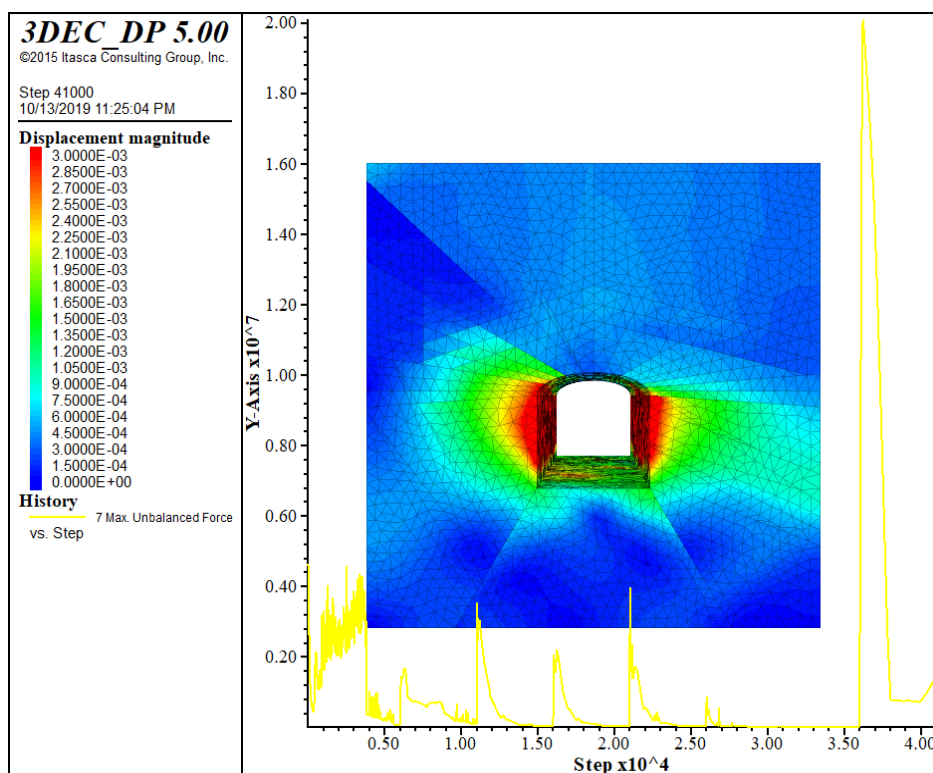
مقدار تنش عمودی براساس عمق قرار گیری مغار و وزن مخصوص سنگ محاسبه شده است. برای تنش‌های افقی هم با اعمال نسبت تنش برجا (نسبت تنش افقی به عمودی) می‌بایست تعیین گردد که نیازمند انجام مطالعات صحرایی و تخمین تنش‌های برجاست. در این پژوهش این مقدار ۰/۵ فرض شده است، همچنین سطح آب زیرزمینی ۱۰ متر بالاتر از تاج مغار لحاظ شده است.

پس از اعمال شرایط تنش مرزی مدل به تعادل اولیه رسیده و سپس مدل تا ارتفاع ۱۰ متر بالای تاج مغار اشباع شده است. شکل ۷-۷، مدل اشباع شده قبل از حفاری مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۷: اشباع شدن مدل تا ارتفاع ۱۰ متر بالاتر از تاج مغار

برای پایداری بیشتر سطح مغار در پنج مرحله به صورت گام به گام حفاری و به پایداری رسیده است، در شکل ۷-۸ نمودار نیروهای نامتعادل کننده قبل و پس از هرگام حفاری نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، مقادیر نیروهای نامتعادل پس از تعداد گام مشخصی، حداقل می‌شود و مدل به تعادل می‌رسد. کنترل جابجایی در هر مرحله و پس از حفاری کل مغار حاکی از آن است که مدل به پایداری رسیده و به دلیل مقادیر کم کرنش نیاز به سیستم نگهداری موقت به منظور پایدارسازی نخواهد بود.



شکل ۷-۸: نمودارهای نامتعادل کننده و متادیر جابجایی در دیواره‌های اطراف مغار

پس از اتمام حفاری مدل برای شرایط هیدرولیکی مدل می‌شود. شرایط هیدرولیکی که بر اثر ذخیره سازی نفت خام بر دیواره‌های مغار اعمال گردد. متناسب با چگالی و حجم نفت خام ذخیره‌سازی شده درون مغار به دیواره و کف مغار فشار وارد می‌شود. این فشار سبب خروج محصول از درزه‌های متقاطع با مرز مغار شده و لذا می‌بایست فشار منفذی آب ناشی از سفره زیرزمینی و یا پرده آب بیشتر از فشار محصول درون مغار باشد تا از هدر رفتن محصول جلوگیری گردد. با فرض این که ۱۰ متر از ارتفاع مغار توسط نفت خام با چگالی متوسط ۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب پر شده، فشار وارده از طرف نفت خام به دیواره‌ها و کف مغار در حدود ۰/۹ است. همچنین بخار نفت خام فشاری معادل ۱ بار بر تاج مدل وارد می‌کند. سپس در داخل گمانه‌های پرده آب فشاری معادل ۱/۵ بار اعمال می‌شود. با حل مدل به صورت توامان هیدرومکانیک رفتار هیدرومکانیک مغار ذخیره سازی مورد بررسی شده است.

به منظور کنترل نشت نفت خام از مغار به بیرون باید شرایط زیر حاکم باشد (Li et al., 2016):

۱- فشار هیدرواستاتیک آب در شکستگی‌های موجود در اطراف مغار بدون پوشش باید از فشار هیدرواستاتیک ناشی از سیال ذخیره شده (نفت یا گاز) درون مغار بیشتر باشد.

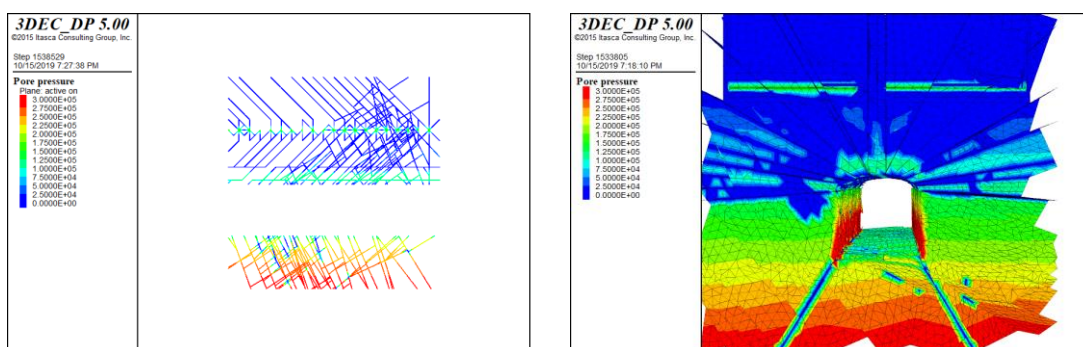
۲- جهت گرادیان فشار در اطراف مغار همواره به سمت داخل مغار باشد.

۳- شرط دیگری که برای اجرای موفقیت آمیز محصور نمودن هیدرودینامیکی باید رعایت شود اشباع نگاه داشتن کامل منافذ و درزه‌های اطراف توده سنگ در تمام مدت بهره‌برداری است. چون حتی یک حالت غیر اشباع کوچک هم می‌تواند سبب نشت نفت خام شود.

در ادامه دو پارامتر فشار منفذی در شکستگی‌های موجود در توده سنگ و نرخ جریان سیال ورودی به مغار بررسی شده است.

#### ۶.۷ تخمین فشار منفذی درون شکستگی‌های موجود در توده سنگ

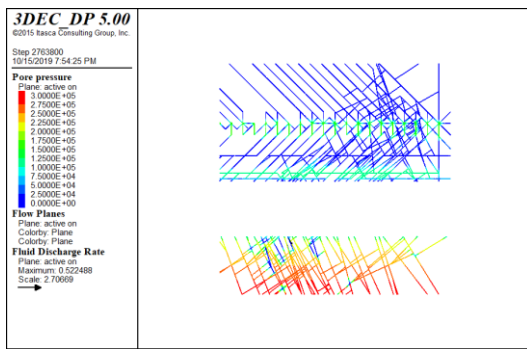
با توجه به تحلیل‌های انجام شده در مدل عددی، مقادیر فشار منفذی درون شکستگی‌های موجود در توده سنگ، برای سه حالت مختلف حضور پرده‌ی آب آرایه و در شکل ۷-۹ آورده شده است.



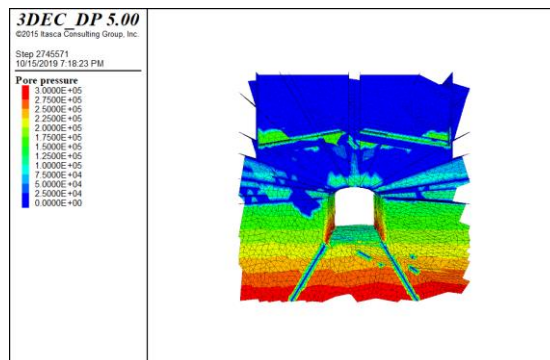
(ب) مقطع در راستای تونل از مرکز مغار

(الف) نمای کلی

شکل ۷-۹: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب صفر درجه

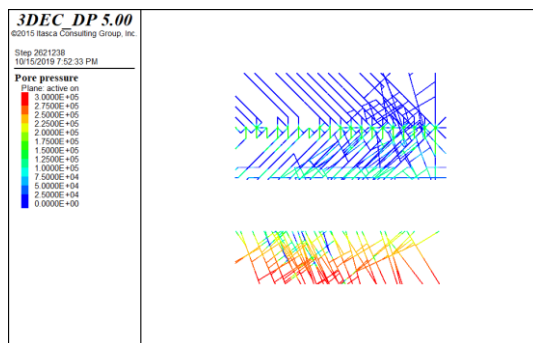


(ب) مقطع در راستای تونل از مرکز مغار

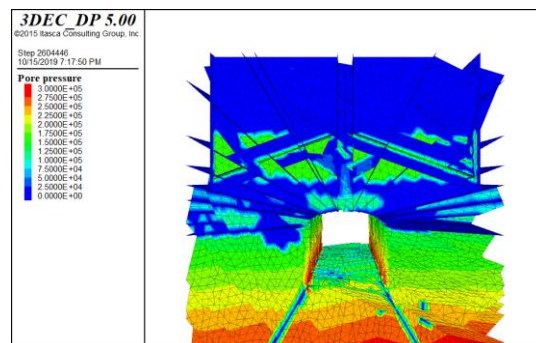


(الف) نمای کلی

شکل ۷-۱۰: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب ۱۵ درجه



(ب) مقطع در راستای تونل از مرکز مغار



(الف) نمای کلی

شکل ۷-۱۱: توزیع فشار منفذی آب ناشی از سیستم پرده‌ی آب برای گمانه با شیب ۳۰ درجه

همان‌گونه که از شکل ۷-۹، شکل ۷-۱۰ و شکل ۷-۱۱ پیدا است، در حضور سیستم پرده آب با شیب گمانه ۳۰ درجه، فشار منفذی در شکستگی‌های متقاطع با مرز مغار به‌طور بهتری توزیع می‌گردد و عملکرد سامانه پرده آب مناسب‌تر است.

## ۷.۷ تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار

نرخ آب ورودی به داخل مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام از مهم‌ترین پارامترها جهت کنترل عملکرد سیستم نشت می‌باشد. در این راستا به منظور ارزیابی وضعیت آب‌گذری و تخمین نرخ آب ورودی به درون مغار در مدل عددی و همچنین محاسبه فشار منفذی درون ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار از برنامه‌نویسی FISH در نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. بدین منظور درزه‌های موجود

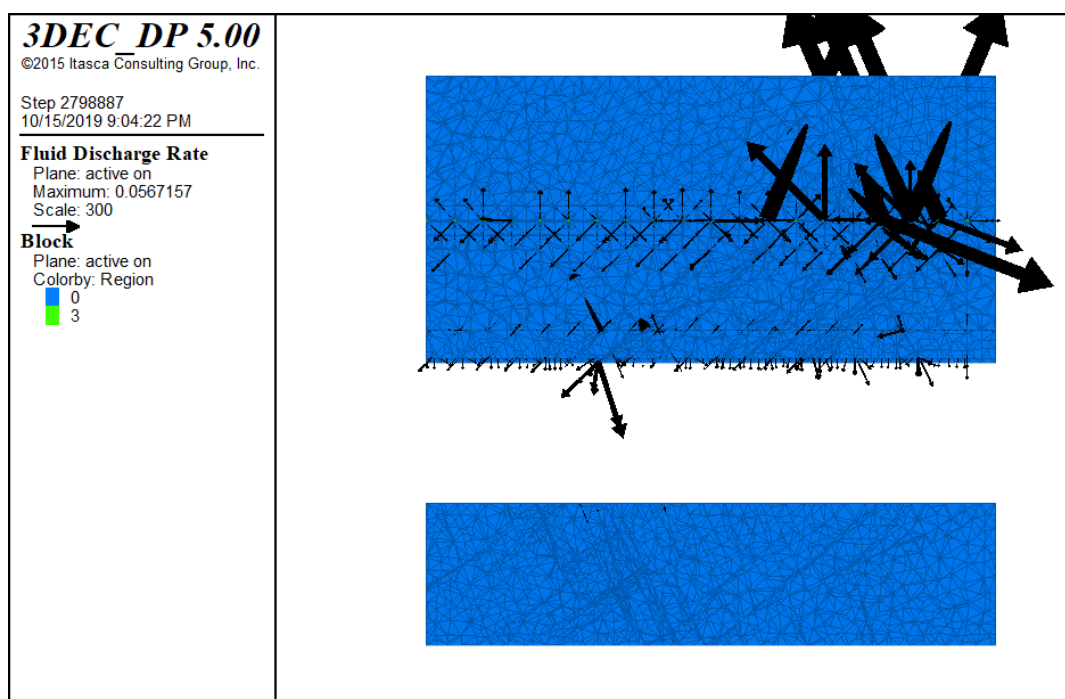


در مدل عددی فیلتر شده و تنها درزه‌هایی که با مرز مغار تقاطع دارند مدنظر قرار داده شده‌اند. در جدول ۳-۷ مقادیر نرخ آب ورودی به درون مغار برای سه حالت مختلف گمانه آورده شده است.

جدول ۳-۷: نرخ آب ورودی به مغار بر حسب Lit/sec ناشی از سفره آب زیرزمینی (بدون پرده آب)

۳۰	۱۵	۰	شیب گمانه سامانه پرده آب
۳۶/۱۱۱	۳۴/۰۷۸	۳۱/۲۲۰	نرخ آب ورودی به مغار ( $m^3/se$ )

همان‌طور که از جدول جدول ۳-۷ مشخص است با افزایش شیب گمانه‌های پرده آب نرخ آب ورودی به مغار افزایش پیدا می‌کند و در حالتی که شیب گمانه ۳۰ درجه است حجم بیشتری از آب به داخل مغار جریان می‌یابد. در شکل ۷-۱۲، بردارهای نرخ جریان ورودی به داخل مغار در مقطعی عرضی برای سامانه پرده آب با گمانه‌های با شیب ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۲: بردارهای نرخ جریان آب به داخل مغار در مدل عددی در مقطع طولی

## ۸.۷ جمع بندی

در این فصل با استفاده از نرم‌افزار *3DEC* مغار ذخیره‌سازی نفت خام مدل‌سازی شده است. هندسه شکستگی‌های موجود در توده سنگ توسط روش *DFN* ساخته شده است. نفت خام ذخیره شده درون مغار متناسب با حجم ذخیره‌سازی، به دیواره و کف فشار وارد کرده که سبب نفوذ نفت به داخل ناپیوستگی‌های متقاطع با مرز مغار و در نتیجه نشت محصول به بیرون می‌شود. به منظور کنترل نشت نفت خام از مغار، سامانه پرده آب به کار گرفته شده است. فشار آب در سامانه پرده آب ۱,۵ بار لحاظ گردید. با تغییر زاویه‌ی گمانه‌های پرده آب نسبت به افق، اثر زاویه‌داری گمانه‌های پرده آب در توزیع فشار اطراف مغار بررسی شده است. در بین سه زاویه صفر، پانزده و سی درجه، گمانه‌های با زاویه سی درجه توزیع فشار مناسب‌تری در اطراف مغار ایجاد می‌کند. نرخ آب ورودی به مغار درون شکستگی‌های متقاطع با مرز مغار محاسبه شده است. با افزایش شیب گمانه نرخ جریان ورودی به مغار افزایش می‌یابد.

## فصل هشتم: نتیجه گیری و

## پیشنهادات مطالعات آتی

## ۱.۸ مقدمه

در این پژوهش رفتار هیدرولیکی جریان سیال در شکستگی طبیعی سنگ آهک تحت تنش جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. وجه تمایز این مطالعه با تحقیقات پیشین انتخاب نمونه شکستگی طبیعی برای انجام آزمایش است. در اکثر آزمایش‌های پیشین، شکستگی به صورت مصنوعی (ماشین برش یا بارگذاری کششی) در نمونه سنگ ایجاد شده است. زبری و تغییرات بازشدگی در این نمونه‌ها با نمونه شکستگی طبیعی متفاوت است.

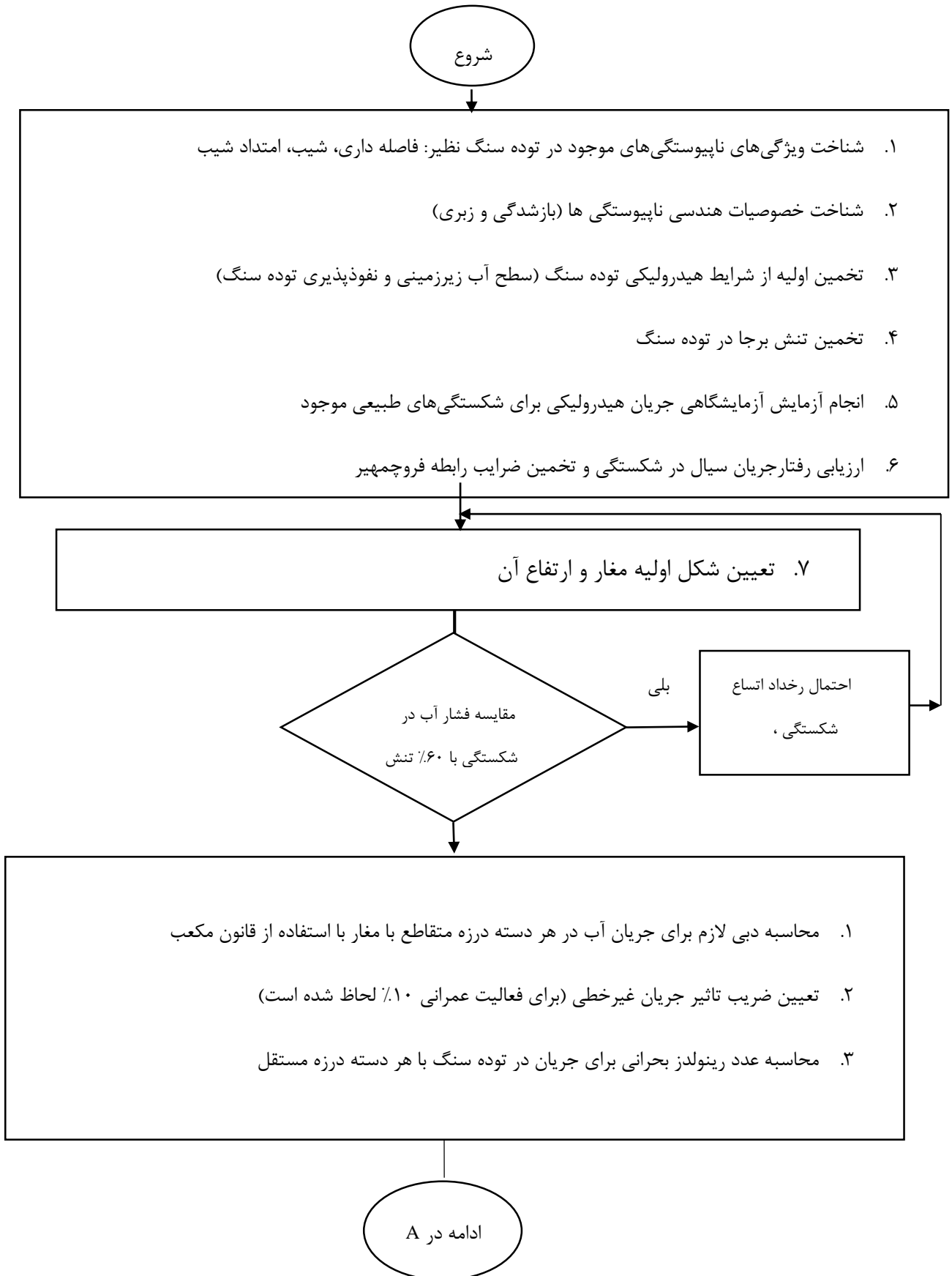
در این فصل در بخش اول نتایج مهم بدست آمده از این پژوهش آورده شده است و در بخش بعدی مواردی برای مطالعه در آینده پیشنهاد شده است.

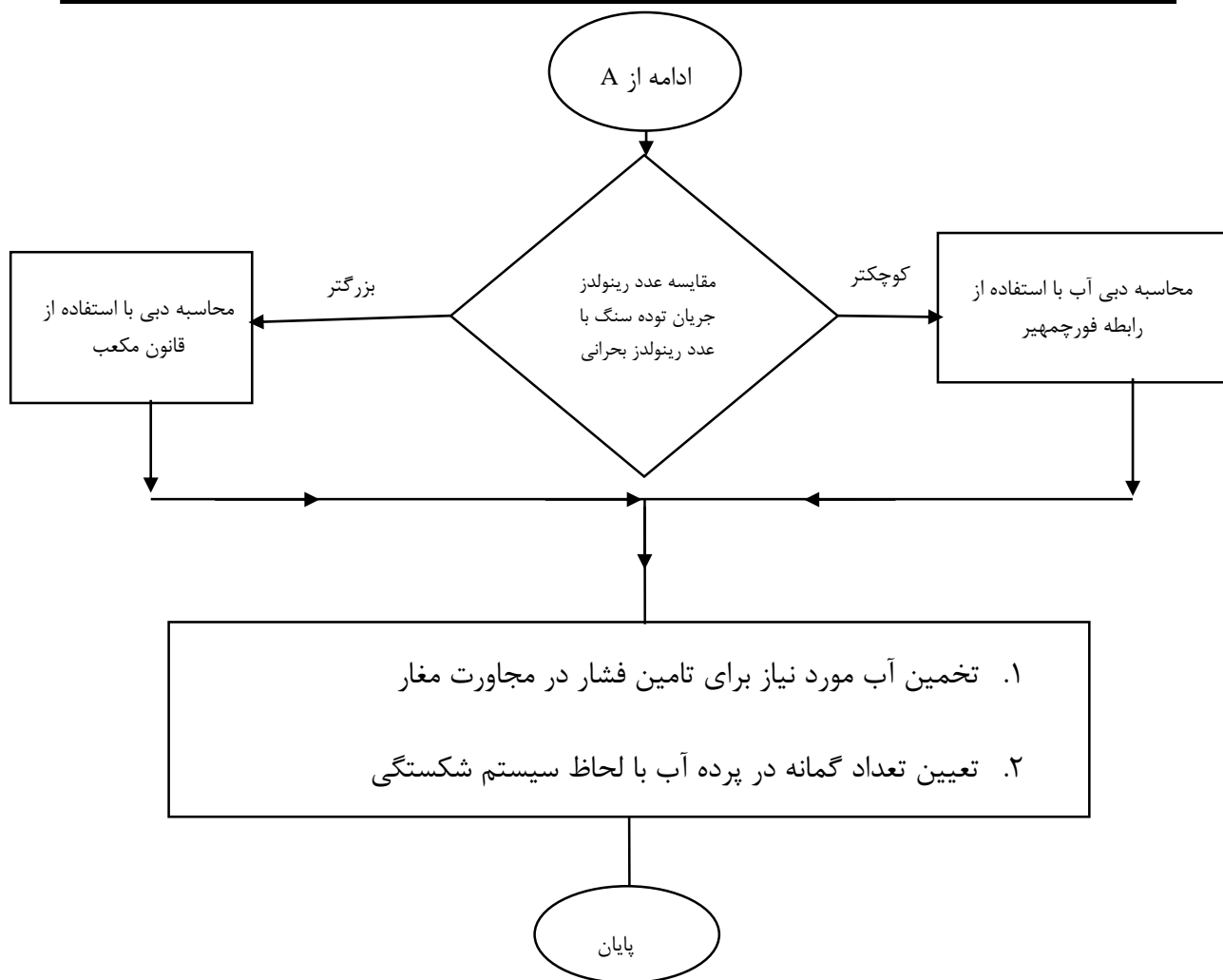
## ۲.۸ نتیجه‌گیری از پژوهش انجام شده

- در این تحقیق با استفاده از داده‌های رقومی سطوح شکستگی، توزیع بازشدگی در شکستگی برآورد شده است. از این روش می‌توان برای تخمین بازشدگی شکستگی استفاده کرد.
- الگوی رفتار جریان سیال در شکستگی طبیعی مطالعه شد. اگر رابطه کلی  $\nabla P = f(Q^n)$  برای تغییرات گرادیان فشار نسبت به نرخ جریان در نظر گرفته شود نتایج آزمایش را می‌توان در سه بخش  $n$  کوچکتر از یک،  $n$  مساوی یک و  $n$  بزرگتر از یک دسته بندی کرد. مقادیر  $n$  مساوی یک نشان دهنده رفتار خطی جریان سیال و صحت و اعتبار قانون مکعب است. برای نتایج آزمایش که  $n$  بزرگتر از یک است جریان سیال به رفتار غیرخطی به دلیل اثر مضاعف اینرسی منتسب شده است، برای نمونه‌ای که بازشدگی آن بیشتر است این نوع رفتار رخ داده است. برای  $n$  کوچکتر از یک، رابطه غیرخطی به رفتار اتساع شکستگی تحت اثر رفتار توامان هیدرومکانیک مرتبط شده است و برای نمونه شکستگی که بازشدگی آن کمترین و سطوح آن زبرترین نمونه است این رفتار اتفاق افتاده است.

- با استفاده از برازش آماری، ضرایب دو رابطه ماکروسکوپی ایزباش و فورچهیمر برآورد شده است. با توجه به این که ضریب تشخیص ( $R^2$ ) در این برازشها بزرگتر از ۰/۸۹ است، هر دو رابطه به خوبی رفتار غیرخطی را توصیف می کنند. البته با مقایسه روند تغییرات ضرایب این دو رابطه با تنش جانبی و حساسیت پایین ضریبهای رابطه ایزباش به تغییر تنش جانبی به نظر می رسد که رابطه فورچهیمر، رابطه مناسب تری برای توصیف رفتار غیرخطی است.
- در این پژوهش ضریب اصطکاک به صورت تابعی از دو مولفه عدد رینولدز و بازشدگی نسبی شکستگی دیده شده است و با استفاده از نتایج آزمایش رابطه جدیدی برای ضریب اصطکاک پیشنهاد شد. با مقایسه بین نتایج آزمایش با رابطه های موجود در خصوص ضریب اصطکاک مشخص شد رابطه ارایه شده در این پژوهش به نسبت سایر روشها توانایی بهتری در برآورد ضریب اصطکاک دارد.
- پارامترهای دهانه بازشدگی هیدرولیکی و عدد رینولدز بحرانی در آزمایشها ارزیابی شد که با افزایش تنش جانبی مقدار این دو پارامتر کاهش می یابد. کاهش عدد رینولدز بحرانی نشان دهنده انحراف سریع تر جریان از رابطه خطی به غیرخطی است.
- با استفاده از نرم افزار *Fluent* و داده های آزمایش یک مدل مرجع برای مدل سازی جریان سیال در شکستگی ساخته شد. مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمون آزمایشگاهی نشان می دهد که مدل عددی مرجع به خوبی قادر است رفتار جریان سیال در یک شکستگی زبر را شبیه سازی کند. همچنین این مدل نشان داد قانون مکعب مقادیر بزرگتری را برای آب گذاری شکستگی برآورد می کند.

- تغییرات هر دو ضریب خطی و غیرخطی رابطه فورچمپیر نسبت به تغییر بازشدگی مورد بررسی قرار گرفته است که با افزایش بازشدگی از مقدار A و مقدار B کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دهانه بازشدگی شکستگی اثر زبری سطح کاهش می‌یابد.
- رفتار جریان سیال در توده‌سنگ با استفاده از نتایج آزمایش فشار آب مورد بررسی قرار گرفت. سه الگوی رفتاری جریان سیال در آزمایشگاه را می‌توان در نتایج میدانی هم مشاهده کرد. همچنین عدد رینولدز بحرانی در توده‌سنگ محاسبه شد که این عدد از نتایج آزمایشگاهی کوچکتر است.
- مدل‌سازی سامانه پرده آب در مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام، با استفاده از نرم‌افزار 3DEC انجام شد و سه حالت متفاوت از زاویه گمانه پرده آب نسبت به افق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد طراحی سامانه پرده آب با شیب ۳۰ درجه نسبت به افق عملکرد مناسب تری نسبت به سایر زوایا دارد. از طرفی نرخ آب ورودی به داخل مغار با افزایش شیب گمانه افزایش می‌یابد.
- در نهایت با توجه به مطالعات انجام شده روند نما طراحی سامانه پرده آب در مغار ذخیره‌سازی نفت خام به شکل ۹-۱۰ ارائه می‌گردد.





شکل ۸-۱: روند نما طراحی سامانه پرده آب



### ۳.۸. پیشنهادات برای انجام پژوهش جدید

- ارتقاء تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌ها جریان سیال موجب افزایش دقت آزمایش‌ها خواهد شد. در این راستا پیشنهاد می‌شود ابعاد سلول آزمایشی بزرگتر شود تا نمونه شکستگی با مقیاس بزرگتر مورد آزمایش قرار بگیرد. سامانه اعمال تنش جانبی به سیستم خود کنترل مجهز گردد.
- در این مطالعه از نمونه‌هایی با ماده‌سنگ نفوذناپذیر استفاده شد که جریان سیال تنها در شکستگی بررسی گردید پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی جریان سیال به صورت همزمان در ناپیوستگی و ماده سنگ مورد مطالعه قرار گیرد.
- در این آزمایش شکستگی طبیعی در سنگ آهک مورد مطالعه قرار گرفت، پیشنهاد می‌شود شکستگی طبیعی در سایر سنگ‌ها نیز مورد آزمایش قرار بگیرد.
- ضریب اصطکاک جریان سیال پارامتری است که قابلیت تبدیل نتایج مطالعات آزمایشگاهی به مقیاس بزرگتر را دارد پیشنهاد می‌شود، برای مطالعات آتی در خصوص این پارامتر در مقیاس بزرگ پژوهش صورت پذیرد.
- در این پژوهش رفتار جریان سیال در توده‌سنگ با استفاده از آزمایش فشار آب مورد ارزیابی قرار گرفت پیشنهاد می‌گردد در آینده آزمایش‌های درجا دقیق‌تر برای این بررسی بکار گرفته شود.
- عدد رینولدز بحرانی معیار مناسبی برای تخمین الگوی جریان سیال در شکستگی است پیشنهاد می‌گردد در خصوص این عدد در توده‌سنگ مطالعات بیشتر انجام شود.
- نرم افزار 3DEC با استفاده از قانون مکعب معادلات هیدرولیکی در توده‌سنگ را محاسبه می‌کند که برای فعالیتهای حرفه‌ای منطقی به نظر می‌رسد ولی برای کارهای تحقیقاتی پیشنهاد

می‌شود در خصوص کد محاسباتی که بر مبنای قانون ناویر-استوکس یا رابطه ماکروسکوپی

فورچه‌یمر به حل موضوع رفتار جریان سیال در توده‌سنگ مورد مطالعه قرار گیرد.

• به دلیل حجم زیاد و زمان‌بر بودن، در این مطالعه تنها یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی

نفت خام مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق و گسترده‌تر پیشنهاد

می‌شود مجموعه‌ای از مغارهای موازی و با فواصل مشخص از یکدیگر مدل‌سازی شود.

پیوست (۱)

**GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)**  
 From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

STRUCTURE	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	DECREASING SURFACE QUALITY →				
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10
	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				

شکل ۸-۲: نمودار کلی برای برآورد GSI از مشاهدات زمین شناسی (Marinos et al., 2005)

## منابع و مراجع

## منابع فارسی

- شریف زاده مصطفی؛ سیرائی صدیقه. طراحی و ساخت دستگاه زبری سنجی سه بعدی لیزری. نشریه مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر (۱) ۴۴؛ ۱۳۹۱.
- طاهری داریوش؛ نیکودل محمدرضا؛ شریفی ابراهیم. بررسی‌های پارامترهای زمین شناسی مهندسی ساختگاه سدهای شمیل و نیان. کنفرانس زمین شناسی مهندسی. هشتمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. ۱۳۸۴.
- امیرشاه کرمی عبد العظیم. رفتار برش درزه های سنگ. جهاد دانشگاهی، انتشارت واحد صنعتی امیرکبیر. ۱۳۸۱.
- علی وطنی. طرح کلان ملی ذخیره سازی زیرزمینی نفت و گاز. تهران. ۱۳۹۳.
- قزوینیان عبدالهادی؛ محبی محسن؛ یاراحمدی بافقی علیرضا. امکان سنجی تخمین تاریخچه مولفه‌های تنش برجا بر اساس آنالیز سه بعدی زبری سطوح درزه. پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. ۱۳۹۳.

## منابع لاتین

- Barton, N.. and Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 10(1-2): 1-54, <https://doi.org/10.1007/BF01261801>.
- Barton, N.; Bandis, S. and Bakhtar, K. 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and* 22(3): 121-140, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9).
- Batchelor, G.K. 2000. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge Mathematical Library. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>.
- Benardos, A.G. and Kaliampakos, D.C. 2005. Hydrocarbon storage in unlined rock caverns in Greek limestone. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20(2): 175-182, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.005>.
- Bordier, C. and Zimmer, D. 2000. Drainage equations and non-Darcian modelling in coarse porous media or geosynthetic materials. *Journal of Hydrology* 228: 174-187.
- Brush, D.J. and Thomson, N.R. 2003. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations. *Water Resour. Res.* 39(4): 1085, <https://doi.org/10.1029/2002WR001346>.
- Cappa, F.; Guglielmi, Y.; Rutqvist, J.; Tsang, C.-F. and Thoraval, a. 2006. Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze Laboratory site, France. *International Journal*

- of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(7): 1062–1082, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.03.006>.
- Chen, Y.-F.; Hu, S.-H.; Hu, R. and Zhou, C.-B. 2015. Estimating hydraulic conductivity of fractured rocks from high-pressure packer tests with an Izbash's law-based empirical model. *Water resources Research* 2096–2118, <https://doi.org/10.1002/2014WR016458>. Received.
- Chen, Y.F.; Zhou, J.Q.; Hu, S.H.; Hu, R. and Zhou, C.B. 2015. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures. *Journal of Hydrology* 529: 993–1006, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.021>.
- Chen, Z.; Qian, J.; Luo, S. and Zhan, H. 2009. Experimental study of friction factor for groundwater flow in a single rough fracture. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 21(6): 820–825, [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60218-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60218-8).
- Cherubini, C.; Giasi, C.I. and Pastore, N. 2012. Bench scale laboratory tests to analyze non-linear flow in fractured media. *Hydrology and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/hess-16-2511-2012>.
- Crandall, D.; Ahmadi, G. and Smith, D.H. 2010. Computational Modeling of Fluid Flow through a Fracture in Permeable Rock. *Transport in Porous Media* 84(2): 493–510, <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9516-9>.
- Develi, K. and Babadagli, T. 2015. Experimental and visual analysis of single-phase flow through rough fracture replicas. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 73: 139–155, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.11.002>.
- Division, E.G. 1998. Quantification of Natural Fracture Surfaces Using 30(8): 971–998.
- El-Soudani, S.M. 1978. Profilometric analysis of fractures. *Metallography* 11(3): 247–336, [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(78\)90045-9](https://doi.org/10.1016/0026-0800(78)90045-9).
- Forchheimer, P.H. 1901. Wasserbewegung durch Boden [Movement of Water through Soil]. *Zeitschrift fur Acker und Pflanzenbau* 49: 1736-1749..
- Ge, Y.; Kulatilake, P.H.S.W.; Tang, H. and Xiong, C. 2014. Investigation of natural rock joint roughness. *Computers and Geotechnics* 55: 290–305, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.09.015>.
- van Genabeek, O. and Rothman, D.H. 1999. Critical behavior in flow through a rough-walled channel. *Physics Letters A* 255(May): 31–36, [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(99\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00152-8).
- Goodall, D.; Åberg, B. and Brekke, T. 1988. Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 21: 235–258.
- Hassanizadeh, S.M. and Gray, W. 1987. High velocity flow in porous media. *Transport in Porous Media* (2): 521–531.
- Indraratna, B. 2001. *Hydromechanical aspects and unsaturated flow in jointed rock*. Exton, PA : A.A. Balkema Publishers,.
- Itasca Consulting Group, I. 2005. 3DEC Manual2005.
- Iwano, M. 1995. Hydromechanical characteristics of a single rock joint. Massachusetts Institute of Technology June.

- Izbash, S. V. 1931. O Filtracii V Kropnozernstom Materiale. In . *Leningrad, USSR, (in Russian)*..
- Javadi, M. and Sayadi, S. 2018. Stochastic discontinuum analysis of hydrocarbon migration probability around an unlined rock cavern based on the discrete fracture networks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 81(July 2017): 41–54, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.030>.
- Javadi, M.; Sharifzadeh, M. and Shahriar, K. 2010. A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures. *Journal of Hydrology* 389(1–2): 18–30, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.010>.
- Javadi, M.; Sharifzadeh, M.; Shahriar, K. and Mitani, Y. 2014. Critical Reynolds number for nonlinear flow through rough-walled fractures: The role of shear processes. *Water Resources Research* 50(2): 1789–1804, <https://doi.org/10.1002/2013WR014610>.
- Jing, L. and Stephansson, O. 2000. Introduction. In *Fundamentals of Discrete Element methods for Engineering*, pp. 1–21.
- Jing, L. and Stephansson, O. 2007. Fluid flow and coupled hydro-mechanical behavior of rock fractures. In *Developments in Geotechnical Engineering*, pp. 111–144. Elsevier-engineering, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-1250\(07\)85004-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-1250(07)85004-8).
- Karamouz, M. 2011. *Groundwater hydrology*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Karbala, M.; Katibeh, H. and Sharifzadeh, M. 2009. Numerical and analytical hydraulic characterization of a horizontal single joint based on radial flow in water pressure test. *Journal of Applied Sciences* 9(10): 1859–1869, <https://doi.org/10.3923/jas.2009.1859.1869>.
- Komada, H. and Nakagawa, K. 1980. Study on Seepage Flow Through Rock Mass Surrounding Caverns for Petroleum Storage. *ISRM International ... i*.
- Konzuk, J.S. and Kueper, B.H. 2004. Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture. *Water Resources Research* 40(2), <https://doi.org/10.1029/2003WR002356>.
- Koyama, T.; Neretnieks, I. and Jing, L. 2008. A numerical study on differences in using Navier–Stokes and Reynolds equations for modeling the fluid flow and particle transport in single rock fractures with shear. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45(7): 1082–1101, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.11.006>.
- Krahn, J. and Morgenstern, N.R. 1979. The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 16(2): 127–133, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91449-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91449-9).
- Lee, C. and Chang, K. 1995. Analysis of permeability change and groundwater flow around underground oil storage cavern in Korea. In *8th ISRM Congress*, pp. 779–782.
- Lee, C. and Song, J. 2003. Rock engineering in underground energy storage in Korea.

- Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless* 18(February): 467–483, [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00046-4).
- Lee, H.S. and Cho, T.F. 2002. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 35(4): 299–318, <https://doi.org/10.1007/s00603-002-0028-y>.
- Lee, Y.-H.; Carr, J.R.; Barr, D.J. and Haas, C.J. 1990. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics* 27(6): 453–464, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)90998-H](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)90998-H).
- Levinsson, G.A.; Ajling, G. and Nord, G. 2004. Design and construction of the Ningbo underground LPG storage project in China. In *In: Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress.* , pp. 374–375. Singapore.
- Li, S.; Wang, Z.; Ping, Y.; Zhou, Y. and Zhang, L. 2014. Discrete element analysis of hydro-mechanical behavior of a pilot underground crude oil storage facility in granite in China. *Tunnelling and Underground Space Technology* 40: 75–84, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.010>.
- Li, Z.; Lu, B.; Zou, J.; Xu, B. and Zhang, Z. 2016. Design and operation problems related to water curtain system for underground water-sealed oil storage caverns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8(5): 689–696, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.06.003>.
- Li, Z.; Wang, K.; Wang, A. and Liu, H. 2009. Experimental study of water curtain performance for gas storage in an underground cavern. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 1(1): 89–96, <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2009.00089>.
- Lindblom, U. 1977. Rock mechanics research on rock caverns for energy storage. In *The 18th US Symposium on Rock Mechanics ( ...*
- Lindblom, U.E. 1994. History and present status of hydrocarbon storage in excavated rock caverns. In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, pp. 663–670. Delft: Society of Petroleum Engineers, <https://doi.org/10.2118/28112-MS>.
- Louis, C. 1969. *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. Rock Mech. Res. Rep., Imp. Coll.10. London: Eng: Imperial College of Science and Technology..
- Marinos, V.; Marinos, P. and Hoek, E. 2005. The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 64(1): 55–65, <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0270-5>.
- Moutsopoulos, K.N.; Papaspyros, I.N.E. and Tsihrintzis, V.A. 2009. Experimental investigation of inertial flow processes in porous media. *Journal of Hydrology* 374(3–4): 242–254, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.015>.
- Myers, N. 1962. Characterization of surface roughness. *Wear* 5(3): 182–189, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90002-9).
- Nakagawa, K.; Komada, H.; Miyashita, K. and Murata, M. 1987. Study on compressed air storage in unlined rock caverns. In *6th ISRM*, pp. 199–202.



- National Research Council. 1996. *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*. The National Academies Press.
- Nazridoust, K.; Ahmadi, G. and Smith, D.H. 2006. A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures. *Journal of Hydrology* 329(1–2): 315–328, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.032>.
- Nowamooz, A.; Radilla, G. and Fourar, M. 2009. Non-Darcian two-phase flow in a transparent replica of a rough-walled rock fracture. *Water Resources Research* 45(7): W07406, <https://doi.org/10.1029/2008WR007315>.
- Odling, N.E. 1994. Natural Fracture Profiles , Fractal Dimension and Joint Roughness Coefficients. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 27(3): 135–153, <https://doi.org/doi.org/10.1007/BF01020307>.
- Olsson, R. and Barton, N. 2001. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38(3): 317–329, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00079-4).
- Oron, A.P. and Berkowitz, B. 1998. Flow in rock fractures: The local cubic law assumption reexamined. *Water Resources Research* 34(11): 2811–2825, <https://doi.org/10.1029/98WR02285>.
- Panfilov, M. and Fourar, M. 2006. Physical splitting of nonlinear effects in high-velocity stable flow through porous media. *Advances in Water Resources* 29(1): 30–41, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.002>.
- Panfilov, M.; Oltean, C.; Panfilova, I. and Buès, M. 2003. Singular nature of nonlinear macroscale effects in high-rate flow through porous media Nature singulière des effets macroscopiques non linéaires dans un écoulement à hautes vitesses en milieux poreux 331: 41–48, [https://doi.org/10.1016/S1631-0721\(02\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0721(02)00012-8).
- Petrovitch, C.; Pyrak-nolte, L.J. and Nolte, D.D. 2010. The effect of initial contact area on the mechanical and hydraulic properties of single fractures. 1: 201–210.
- Qian, J.; Chen, Z.; Zhan, H. and Guan, H. 2011. Experimental study of the effect of roughness and Reynolds number on fluid flow in rough-walled single fractures: A check of local cubic law. *Hydrological Processes* 25(4): 614–622, <https://doi.org/10.1002/hyp.7849>.
- Qian, J.; Zhan, H.; Luo, S. and Zhao, W. 2007. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture. *Journal of Hydrology* 339(3–4): 206–215, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.015>.
- Qian, J.; Zhan, H.; Zhao, W. and Sun, F. 2005. Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture. *Journal of Hydrology* 311(1–4): 134–142, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.013>.
- Quinn, P.M.; Cherry, J.A. and Parker, B.L. 2011. Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock. *Water Resources Research* 47(9), <https://doi.org/10.1029/2010WR009681>.
- Quinn, P.M.; Parker, B.L. and Cherry, J.A. 2011. Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology*

- 126(1-2): 85-99, <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.07.002>.
- Quinn, P.M.; Parker, B.L. and Cherry, J.A. 2013. Validation of non-Darcian flow effects in slug tests conducted in fractured rock boreholes. *Journal of Hydrology* 486: 505-518, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.024>.
- Ranjith, P.G. and Darlington, W. 2007. Nonlinear single-phase flow in real rock joints. *Water Resources Research* 43(9): 1-9, <https://doi.org/10.1029/2006WR005457>.
- Ranjith, P.G. and Viete, D.R. 2011. Applicability of the "cubic law" for non-Darcian fracture flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 78(2): 321-327, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.07.015>.
- Rasouli, V. and Hosseinian, A. 2011. Correlations developed for estimation of hydraulic parameters of rough fractures through the simulation of JRC flow channels. *Rock mechanics and rock engineering* 44(4): 447-461, <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0148-3>.
- Raven, K.G. and Gale, J.E. 1985. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and* 22(4): 251-261, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92952-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)92952-3).
- Reeves, D.M.; Pohlmann, K.F.; Pohll, G.M.; Ye, M. and Chapman, J.B. 2010. Incorporation of conceptual and parametric uncertainty into radionuclide flux estimates from a fractured granite rock mass. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 24(6): 899-915, <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0385-0>.
- Roman, A. 2012. Permeability of Fractured Media under Confining Pressure: A Simplified Model. *The Open Petroleum Engineering Journal* 5(1): 36-41, <https://doi.org/10.2174/1874834101205010036>.
- Rong, G.; Yang, J.; Cheng, L. and Zhou, C. 2016. Laboratory investigation of nonlinear flow characteristics in rough fractures during shear process. *Journal of Hydrology* 541: 1385-1394, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.043>.
- Rutqvist, J. and Stephansson, O. 2002. The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal* (510): 1-143, <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0241-5>.
- Sidiropoulou, M.G.; Moutsopoulos, K.N. and Tsihrintzis, V.A. 2007. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. *Hydrological Processes* 21(4): 534-554, <https://doi.org/10.1002/hyp.6264>.
- Skjetne, E.; Hansen, A. and Gudmundsson, J.S. 1999. High-velocity flow in a rough fracture. *Journal of Fluid Mechanics* 383: 1-28, <https://doi.org/10.1017/S0022112098002444>.
- Stucky Pars Engineering Co. 2009. Engineering geology and rock mechanics report on completion of site investigations phase I & II: Revision 1. Tehran.
- Sun, J. and Zhao, Z. 2010. Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(5): 629-637, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.04.009>.
- Tatone, B.S.A. and Grasselli, G. 2010. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*

- Sciences* 47(8): 1391–1400, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.006>.
- Tsang, Y.W. 1984. The Effect of Tortuosity on Fluid Flow Through a Single Fracture. *Water Resources Research* 20(9): 1209–1215, <https://doi.org/10.1029/WR020i009p01209>.
- Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. 1981. Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress. *Journal of Geophysical Research* 1–59.
- Tse, R. and Cruden, D.M. 1979. Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and* 16(5): 303–307, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90241-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90241-9).
- Wang, L.; Cardenas, M.B.; Slotke, D.T.; Ketcham, R.A. and Sharp, J.M. 2015. Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness. *Water Resources Research* 51(4): 2064–2080, <https://doi.org/10.1002/2014WR015815>.
- Wang, Z.; Li, S. and Qiao, L. 2015. Design and test aspects of a water curtain system for underground oil storage caverns in China. *Tunnelling and Underground Space Technology* 48: 20–34, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.01.009>.
- White, F.M. 2003. Fluid Mechanics. McGraw-Hill. Boston.
- Witherspoon, P.; Wang, J.; Iwai, K. and Gale, J. 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Research*. file:///C:/Users/Novin Pendar/Downloads/rpt29105.PDF (accessed 20 July 2014)
- Yu, L.; Liu, R. and Jiang, Y. 2017. A review of critical conditions for the onset of nonlinear fluid flow in rock fractures. *Geofluids* 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/2176932>.
- Zeng, Z. and Grigg, R. 2006. A criterion for non-darcy flow in porous media. *Transport in Porous Media* 63(1): 57–69, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2006.01169.x>.
- Zhang, Z. 2013. *Hydromechanical behaviour and nonlinear flow characteristics of rock fractures*.
- Zhang, Z. and Nemcik, J. 2013a. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures. *Journal of Hydrology* 477: 139–151, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.024>.
- Zhang, Z. and Nemcik, J. 2013b. Friction factor of water flow through rough rock fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(5): 1125–1134, <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0328-9>.
- Zhang, Z.; Nemcik, J. and Ma, S. 2013. Micro- and macro-behaviour of fluid flow through rock fractures: an experimental study. *Hydrogeology Journal* 21(8): 1717–1729, <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1033-9>.
- Zhang, Z.; Nemcik, J.; Qiao, Q. and Geng, X. 2014. A Model for Water Flow Through Rock Fractures Based on Friction Factor. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48(2): 559–571, <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0562-4>.
- Zhou, J.-Q.Q.; Jia-Qing, Z.; Chen, Y.F.; Wang, M.; Zhou, C.B.; Hu, S.H.; Chen, Y.F.; Wang, M. and Zhou, C.B. 2016. The Friction Factor in the Forchheimer Equation

- for Rock Fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49(June): 3055–3068, <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0960-x>.
- Zhou, J.Q.; Hu, S.H.; Fang, S.; Chen, Y.F. and Zhou, C.B. 2015. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 80: 202–218, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.027>.
- Zimmerman, R. and Yeo, I. 2000. Fluid Flow in Rock Fractures: From the Navier- Stokes Equations to the Cubic Law. *Dynamics of fluids in fractured rock* 213–224.
- Zimmerman, R.W.; Al-Yaarubi, A.; Pain, C.C. and Grattoni, C.A. 2004. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures. In *Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium*, pp. 163–169, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.036>.
- Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. 1996a. Effective transmissivity of two-dimensional fracture networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 33(4): 433–438, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00067-4).
- Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. 1996b. Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media* 23(1993): 1–30, <https://doi.org/10.1007/BF00145263>.
- Zimmerman, R.W.; Chen, D.-W. and Cook, N.G.W. 1992. The effect of contact area on the permeability of fractures. *Journal of Hydrology* 139(1–4): 79–96, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90196-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90196-3).
- Zoorabadi, M.; Indraratna, B. and Nemic, J. 2012. A new equation for the equivalent hydraulic conductivity of rock mass around a tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 54: 125–128, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.05.017>.
- Zoorabadi, M.; Saydam, S.; Timms, W. and Hebblewhite, B. 2015. Non-linear flow behaviour of rough fractures having standard JRC profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 76: 192–199, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.004>.
- Zou, L.; Tarasov, B.G.; Dyskin, A. V.; Adhikary, D.P.; Pasternak, E. and Xu, W. 2012. Physical Modelling of Stress-dependent Permeability in Fractured Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(1): 67–81, <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0254-x>.

# Abstract

Understanding the fluid flow behavior of rock masses is of great importance in engineering activities such as dam, hydrocarbon extraction and storage, geothermal and nuclear waste storage. One of the most important factors affecting hydraulic behavior of rock mass is its discontinuity. The present study investigates the hydro-mechanical behavior of fractures by conducting fluid flow tests in parallel with confining stresses in natural limestone fractures. Three behavioral patterns of linear relationship, conventional nonlinear relation (inertia effect) and nonlinear relation due to fracture dilation were observed in the experimental results. At low levels of lateral stress and low flow rates, the fluid behavior is linear.

At higher stresses and flow rates, the flow pattern is determined by the fracture geometry (Aperture and roughness). In laboratory results, it can be observed that for a sample with the smallest Aperture opening and the roughest fracture surface the nonlinear flow behavior pattern is due to dilation, whereas the conventional nonlinear flow occurs if the crack opening is large.

The results of the two-way coefficients of Forchmeier and Izbach were calculated using statistical fit. Both of these relationships describe nonlinear behavior well, but the coefficients of the Forchmeier equation are more sensitive to stress change. The critical Reynolds number was calculated for the laboratory results. This number decreases as the confining stress ratio decreases, indicating earlier initiation of nonlinear behavior in confining stress rock samples.

The coefficient of friction for fluid flow in a fracture is defined as a function of Reynolds number and relative fracture roughness. Comparison of the results of the experiment with the presented relationships shows that the proposed relation to the previous relationships yields a better estimate of the coefficient of friction. Using Fluent software, a reference model of laboratory results was developed to aid in further studies on the behavior of fractures in fluid. This software well models the nonlinear behavior of fluid flow. The results of water pressure test at Bakhtiari Dam were used to study the fluid behavior on a larger scale than the laboratory scale. The three behavioral patterns observed in the laboratory results can also be seen in the in situ test results. The critical Reynolds number for fluid flow in rock mass was also investigated. The critical Reynolds. Finally, using numerical modeling, the behavior of the coupled hydro-mechanical effect of jointed rock mass has been investigated. First, using 3DEC software and based on data obtained from DFN field harvesting for rock mass and permeability status and The rock mass drainage rate is analyzed and modeled to estimate the base reagent volume element (REV) under hydro-mechanical coupling behavior. The values of permeability obtained in the coupling and uncoupled conditions were also compared. The modeling results show that, it is impossible to control leakage without the construction of a water curtain system.

**Keywords: Fluid Flow, Rock Fracture, Nonlinear Flow, Unlined Rock Cavern, Water curtain**



Shahrood University of  
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Rock Mechanics.

# Modeling hydro-mechanical behavior of rock to design water curtain in unlined rock cavern for underground storage of crude oil

By: Mohammad Javad Nasri Fakerdavood

Supervisor:  
Dr. Ahmad Ramezanzadeh

September, 2019