

مدل سازی عددی پدیده شکست هیدرولیکی با در نظر گرفتن درزه های از پیش موجود

عرفان عطاری^۱، علی اکبر گلشانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲*. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۵

چکیده

شکست هیدرولیکی روشی نوین و پرکاربرد برای دستیابی ذخایر و منابع انرژی موجود در اعماق زمین است. با توجه به افزایش مصرف انرژی از یک سو و اتمام ذخایر انرژی از سوی دیگر، در آینده ای نه چندان دور استفاده از این روش به عنوان امری ضروری مبدل خواهد شد. پارامترهای مهم زیادی در این روش تأثیرگذار هستند که از جمله آن ها می توان به فشار و چگونگی اعمال آن به منظور ایجاد شکستگی و پیشرفت درزه درون لایه های سنگی اشاره نمود. پارامتر مهم دیگر در این روش، اندرکنش میان شکستگی های طبیعی از پیش موجود با زوایای مختلف و شکست هیدرولیکی ایجاد شده، می باشد. با توجه به هزینه های بالای این فرآیند، هدف از انجام این پژوهش رسیدن به بهینه ترین حالت ممکن برای بیشترین میزان پیشرفت شکست هیدرولیکی و در عین حال استفاده از کمترین مقدار فشار شکست است که با استفاده از مدل سازی عددی به وسیله نرم افزار المان مجزاء PFC از شرکت آیتسکا به صورت دو بعدی روی نمونه سنگ های پوچئون گرانبه با رفتار شکننده و مقاومت بالا انجام می شود. برای ساخت نمونه به روش المان مجزاء در نرم افزار PFC از دیسک های دایره ای در دو بعد استفاده می شود که این ذرات به وسیله پیوندهایی با یکدیگر در تماس هستند و برای اعمال بارگذاری روی نمونه، دیوارهایی وجود دارند که با این دیسک ها در تعامل هستند. به منظور ایجاد پیوند میان ذرات از مدل پیوند مسطح و برای ایجاد شکستگی های طبیعی از پیش موجود از روش شبکه شکستگی استفاده می شود. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش نرخ اعمال بارگذاری، نمونه در زمان کمتری به فشار شکست رسیده و شکسته می شود ولی مقدار فشار شکست افزایش می یابد. همچنین با افزایش زاویه شکست طبیعی نسبت به افق (در جهت ساعتگرد)، نمونه در فشار شکست کمتری شکسته می شود. در نهایت هم با افزایش فاصله شکست طبیعی از مرکز نمونه، تأثیر حضور درزه در نمونه کاهش می یابد و فشار شکست به حالت بدون درزه نزدیک می شود.

واژگان کلیدی: شکست هیدرولیکی، شکست طبیعی، روش المان مجزاء، فشار شکست، نرم افزار کد جریان ذره

۱- مقدمه و تاریخچه پژوهش

انرژی های زمین گرمایی [1] موجود در اعماق زمین از جمله منابع انرژی تجدید پذیری هستند که پتانسیل بالایی برای استفاده در آینده دارند. این منابع انرژی معمولاً در سنگ های بکر موجود در اعماق زمین که نفوذ پذیری بسیار کمی دارند، یافت می شوند. بنابراین، استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی^۱ یک روش کارآمد برای ایجاد نفوذپذیری در این مخازن می باشد. شکست هیدرولیکی [2] عملیاتی است که در آن با استفاده از فشار سیال به عنوان منبع انرژی سبب تحریک لایه های سنگی و در نتیجه ایجاد و پیشرفت شکستگی و درزه درون آن ها می شود.

همان گونه که می دانیم با توجه به اتمام ذخایر انرژی از قبیل انرژی گرمایی و ... هم چنین روند افت فشار موجود در چاه های نفت، در آینده ای نزدیک استفاده از این روش به منظور دستیابی منابع تجدید پذیر که در مخازن سنگی موجود در اعماق زمین یافت می شوند، به عنوان امری ضروری مبدل خواهد شد. امروزه استفاده از این عملیات در بیشتر کشورهایی که دارای منابع هیدروکربنی هستند، به منظور افزایش بهره برداری از مخازن نفت و گاز مورد توجه واقع شده است.

شکست هیدرولیکی در طول دهه ۱۹۳۰ توسط شرکت شیمیایی داو کشف شد و برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت. امروزه در این روش از ترکیب نمودن سیال و پروپانت مواد شیمیایی مخصوصی ایجاد می شود که به منظور تهیه مناسب ترین سیال برای ایجاد شکستگی در مخازن سنگی مورد استفاده قرار می گیرد. از ماده پروپانت به منظور باز نگه داشتن درزه ها بعد از ایجاد شکستگی در مخزن سنگی و جلوگیری از بسته شدن دوباره آن ها استفاده می شود. سیال به وجود آمده را از طریق چاه به منطقه مورد نظر در اعماق زمین پمپ کرده و با استفاده از نرخ تزریق بالا و فشار کافی برای سیال، عملیات شکست در مخازن سنگی موجود آغاز خواهد شد. از جمله کاربردهای روش شکست هیدرولیکی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) افزایش بازدهی منابع و مخازن هیدروکربنی

(۲) دستیابی به منابع انرژی زمین گرمایی

(۳) اندازه گیری تنش های درجا

(۴) فعال سازی مجدد گسل در معدن

(۵) اصلاح خاک و سفره آب های زیرزمینی

برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی به تجهیزات سنگینی از قبیل کامیون هایی با پمپ های نصب شده روی آن ها، بلندرها یا همان ترکیب کننده ها، تانک های سیال و تانک های پروپانت نیاز است.

مدل سازی عملیات شکست هیدرولیکی به عنوان روشی برای پیش بینی شکاف ها و درزه های ایجاد شده از همان سال های ابتدایی اجرای این عملیات به صورت مدل های تئوری آغاز شد. با حل معادلات الحاقی بین سیال و سنگ، مدل سازی عددی برای پیش بینی شکاف ایجاد شده و فشار شکست اعمال شده توسعه یافت. با در نظر گرفتن اهمیت این موضوع و پیشرفت های چشمگیر در عرصه ی تکنولوژی به ویژه علم کامپیوتر و هم چنین ارائه کامپیوترهایی با توان محاسباتی بسیار زیاد و از طرفی نیاز به زمان و هزینه ی زیاد برای بررسی های آزمایشگاهی و تجهیزات میدانی مرتبط با این عملیات، روش های عددی به عنوان یکی از محبوب ترین آن ها در میان روش های موجود در نظر گرفته می شوند.

در مدل سازی شکست هیدرولیکی از ترکیب سیال و جسم جامد استفاده می شود. این روش هیدرومکانیک نام دارد و مربوط به شاخه ای از مکانیک است که به تعادل و حرکت سیالات و اندرکنش آن ها با اجسام جامد می پردازد. در بررسی توماک و گوتیرز [3] با استفاده از ترکیب سیال و جسم جامد به عنوان نمونه، پدیده شکست هیدرولیکی مدل سازی شده است. در این پژوهش از روش المان مجزاء برای ساخت نمونه یا همان جسم جامد استفاده شده است.

در سال های اخیر مطالعات بسیاری روی پارامترهای تاثیرگذار در روند پدیده شکست هیدرولیکی انجام شده است. طبق مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده توسط فتاحی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [4] روی اندرکنش میان شکست هیدرولیکی و شکست طبیعی نشان داده شد که شکستگی های طبیعی موجود در مخازن سنگی بر گسترش شکست هیدرولیکی

با توجه به مطالب بیان شده هدف از انجام مدل سازی ها و بررسی های موجود در این پژوهش، در مرحله اول بررسی شکل های مختلف اعمال فشار با در نظر گرفتن نرخ های گوناگون بارگذاری به منظور افزایش احتمال وقوع شکست هیدرولیکی و در نهایت رسیدن به حالتی بهینه برای شکست نمونه سنگ گرانیست است. در مرحله دوم هم به اندرکنش میان شکست طبیعی از پیش موجود و شکست هیدرولیکی پرداخته می شود تا پارامترهایی از شکست طبیعی که روی شکست هیدرولیکی نمونه گرانیست تأثیرگذار هستند، مورد بررسی قرار گرفته شوند.

۲- روش مدل سازی عددی

PFC [9] یکی از نرم افزارهای کارآمد برای مدل سازی پدیده شکست است که مبنای کار آن روش اجزاء گسسته و ذره ای [10] می باشد. این نرم افزار در دو نسخه ی دوبعدی و سه بعدی در اختیار کاربر قرار گرفته است. با استفاده از روش المان مجزاء در نسخه ی دوبعدی، نمونه ی مورد نظر که در این جا سنگ است به صورت مجموعه ای از ذرات دایره ای که آن ها دیسک نام دارند، مدل می شود. در حالی که در نسخه سه بعدی از ذرات کروی به جای دیسک ها می توان استفاده نمود.

در این پژوهش از نسخه دوبعدی نرم افزار استفاده شده است. اساس کار نرم افزار در دوبعد به این صورت است که برای مدل سازی دو موجودیت پایه ای و صلب وجود دارند:

اول از همه می توان به دیسک ها یا ذرات دایره ای اشاره نمود که با یکدیگر و دیوارها تعامل دارند و از قوانین حرکت نیز پیروی می کنند. این دیسک ها به وسیله پیوندهایی به یکدیگر متصل می شوند و در کنار هم نمونه ی مورد نظر را تشکیل می دهند. به این پیوندها باند گفته می شود.

عنصر دوم دیوارها هستند که برخلاف دیسک ها از قوانین حرکت پیروی نمی کنند و فقط با دیسک ها (توپ ها) تعامل دارند. از دیوارها برای اعمال شرایط مرزی مانند سرعت یا همان نرخ بارگذاری استفاده می شود و هر کدام از دیوارها از تعدادی جزء کوچکتر ساخته می شوند.

اثر می گذارند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که با افزایش زاویه بین صفحه شکست طبیعی و جهت تنش افقی بیشینه، احتمال پیشرفت شکست هیدرولیکی افزایش می یابد و همچنین با قوی تر شدن مصالح پرکننده شکست طبیعی احتمال پیشرفت شکست هیدرولیکی نیز افزایش می یابد.

مطالعات عددی دیگری به منظور بررسی اندرکنش میان شکست هیدرولیکی و شکست طبیعی موجود به وسیله مدل پیوند مسطح^۲ توسط جیان ژو و همکاران [5] انجام شده است. از نتایج آن می توان به این موضوع اشاره نمود که با افزایش زاویه بین شکست طبیعی و جهت تنش افقی بیشینه، احتمال عبور مستقیم شکست ایجاد شده از شکستگی طبیعی از پیش موجود را در عملیات شکست هیدرولیکی افزایش می دهد، همچنین با افزایش اختلاف تنش میان تنش اصلی افقی و عمودی، احتمال عبور شکست هیدرولیکی از شکست طبیعی افزایش می یابد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان دهنده برابری بین مدل سازی عددی با استفاده از مدل درزه صاف و آنالیز تحلیلی است.

مطالعات آزمایشگاهی دیگری توسط ژانگ و همکاران [6] نشان می دهد که با افزایش تنش محدود کننده فشار شکست نیز افزایش و نفوذپذیری نمونه کاهش می یابد، همچنین با افزایش نرخ تزریق سیال، فشار شکست نیز افزایش و نفوذ پذیری در شکست نیز افزایش می یابد. به عنوان نتیجه پایانی هم این نکته ذکر شد که همراه با افزایش دما، فشار شکست کاهش می یابد اما رابطه مشخصی با نفوذ پذیری ندارد.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در روند این عملیات هم می توان به نوع سیال و ویسکوزیته [7] آن اشاره نمود.

مطالعات آزمایشگاهی ژوانگ و همکاران [8] اساس کار و مقایسه در این مقاله است. در سال ۲۰۱۸ بررسی هایی روی نمونه ی پوچئون گرانیست انجام شد که بر طبق آن نشان می دهد هر چقدر نرخ تزریق سیال افزایش یابد احتمال شکستگی نمونه و رخ دادن شکست هیدرولیکی نیز افزایش خواهد یافت و همین طور نمونه در فشار شکست بالاتری شکسته می شود.

با نیرو و ممان کلی در مرکز سطح هستند که به صورت زیر تعریف می شوند (شکل ۳):

$$\mathbf{F} = \sum_{\forall e} \mathbf{F}^{(e)} \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \sum_{\forall e} \{(\rho^{(e)} \times \mathbf{F}_n^{(e)} \mathbf{k}) + \mathbf{M}^{(e)}\} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_c + \mathbf{r}_n \quad N_r \quad (3)$$

شکل ۱. سمت چپ نشان دهنده پیوند باند مسطح و سمت راست نشان دهنده مواد باند مسطح [14, 15]

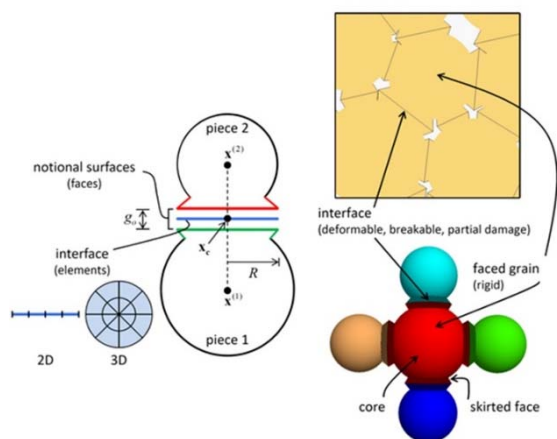


Fig. 1. The left side represents the flat joint contact and the right side represents the flat joint material [14, 15]

که در آن $\mathbf{F}^{(e)}$ و $\mathbf{M}^{(e)}$ نشان دهنده ی حد تحمل هر المان نسبت به ممان و نیروی وارد شده به آن هستند، R شعاع خط فرضی صفحه پیوند مسطح در دو بعد است و e نشان دهنده شماره هر المان است و در پایان N_r تعداد هر المان در راستای شعاعی است.

شکل ۲. عملکرد و رفتار مدل باند مسطح [16, 17]

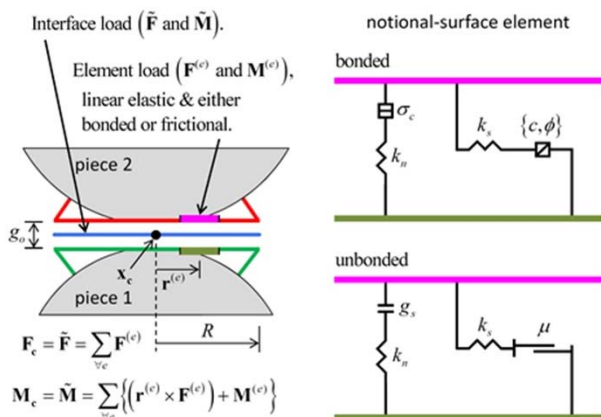


Fig. 2. Performance and behavior of the flat bond model [16, 17]

همان گونه که گفته شد ذرات یا دیسک ها به وسیله پیوندهایی به یکدیگر متصل می شوند که این پیوندها به مانند فنر هایی هستند که مشخصات نمونه از قبیل مقاومت کششی، فشاری، برشی و ... را مدل می نمایند. پیوندها دارای انواعی هستند که در این جا از مدل پیوند مسطح [11, 12] برای ساخت نمونه استفاده شده است. برای ایجاد درزه های طبیعی نیز از روش شبکه شکستگی [13] (DFN) کمک گرفته می شود.

از مدل پیوند مسطح زمانی که نسبت مقاومت فشاری تک محوره به مقاومت کششی نمونه عددی بزرگتر از ۶ باشد، می توان استفاده نمود. مدل باند مسطح نوعی پیوند بین ذرات دایره ای است به شکلی که یک سطح ما بین دو صفحه فرضی، شبیه سازی می شود. هر کدام از این صفحه های فرضی به صورت صلب به قسمتی از بدنه که همان دو دیسک هستند، متصل خواهند شد. این صفحه ها در مدل دوبعدی به صورت یک خط نشان داده می شوند، (شکل ۱). در این مدل هریک از ذرات دایره ای به عنوان مرکز در وسط قرار می گیرند و در چهار سوی آن به صورت دو سطح فرضی که توضیح آن در بالا آمد پیوند برقرار خواهد شد. این مدل پیوند می تواند بین دو ذره دایره ای شکل یا یک ذره و دیوار برقرار شود.

اساس این مدل به این شکل می باشد که وقتی المانی از نمونه تحت بارگذاری قرار می گیرد تعدادی از زیر المان های موجود در المان اصلی می توانند بشکنند و دیگر تحمل بارگذاری را نداشته باشند اما سایر المان ها همچنان کار خود را ادامه می دهند و می توانند قابلیت باربری داشته باشند. به صورت کلی اگر جابه جایی مرتبط در اتصال پیوند مسطح بزرگتر از قطر پیوند مسطح شود یا اگر مقدار بار وارد شده بیشتر از مقدار مجاز در نظر گرفته شده، باشد هر کدام از این المان ها شکسته خواهند شد و پیوند آن ها به مدل خطی مبدل می شود که از آن به بعد رفتار آن پیوند به صورت اصطکاکی در نظر گرفته خواهد شد، (شکل ۲).

هر کدام از این المان ها از قانون نیرو-جابه جایی پیروی می کنند که در هر مرحله با بروز رسانی مقدار ممان و نیرو همراه می باشند. در دو بعد مقدار کل ممان ها (M) و نیروها (F) برابر

با توجه به محدودیت‌های موجود در نرم‌افزار PFC به منظور مدل‌سازی سیال و استفاده از روابط CFD، می‌توان به عنوان راهکاری جدید از اعمال فشاری برابر با فشار سیال استفاده نمود. به این صورت که با استفاده از مدل سازی تعدادی دیوار که یک دایره کامل را با هم‌پوشانی یکدیگر تشکیل می‌دهند و با در نظر گرفتن روش سروو کنترل آن‌ها را در خلاف جهت بردارهای نرمالشان و به صورت خارج از مرکز حرکت داده و در نتیجه آن، فشاری همه جانبه در داخل گمانه نمونه ایجاد می‌شود که در واقع برابر با همان میزان فشار سیال می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع که در این جا نمونه‌ی مورد نظر گرانیت، پرمقاومت و شکننده است بنابراین شکست اصلی همان شکست ابتدایی خواهد بود و فشار شکست یا همان نقطه قله نمودار اهمیت اصلی را در مدل‌سازی خواهد داشت که با استفاده از این روش نتایج به دست آمده دقت خوبی دارند. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی از نکاتی استفاده شده است که در ادامه آورده می‌شوند.

۳- مشخصات نمونه و واسنجی

ژوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با مطالعه روی سنگ پوچئون گرانیت رفتار آن را در آزمایش شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند که نتایج به دست آمده از مطالعات آن‌ها مبنای استفاده در این پژوهش و واسنجی قرار گرفته است. برای مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی در دوبعد از نمونه‌ای با قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر به نام ریف استفاده شده است که یک گمانه‌ی ۸ میلی متری در مرکز آن قرار دارد.

به منظور انتخاب شعاع توپ‌ها یا همان دیسک‌های موجود در نرم‌افزار، در ابتدا مدل‌سازی را با در نظر گرفتن میانگین اندازه دانه‌های سنگی با توجه به پژوهش ژوانگ و همکاران شروع کرده تا بهینه‌ترین حالت ممکن با توجه با واسنجی‌های انجام گرفته انتخاب شود. در این مدل‌سازی شعاع ذرات نمونه برابر با ۰/۱ تا ۰/۱۵ میلی متر، تخلخل برابر با ۵ درصد و چگالی ذرات برابر با $\frac{۲۶۰۹}{۲۶۰۹}$ در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی به منظور ساخت نمونه تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف یک دوره

شکل ۳. نیرو و ممان وارد شده بر المان در حالت دوبعدی [15, 14]

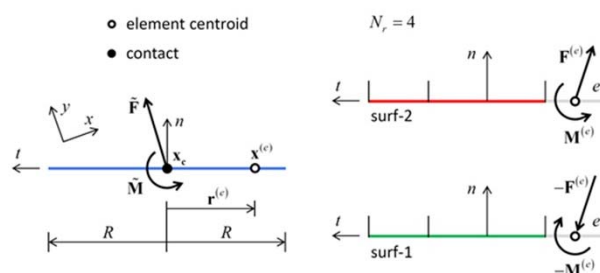


Fig. 3. Force and moment on the element in two-dimensional mode [15, 14]

از طرفی دیگر با به کارگیری از بخش DFN موجود در نرم‌افزار، شکستگی‌های موجود در یک توده سنگ به عنوان مجموعه‌ای از شکستگی‌ها به صورت گسسته، صفحه‌ای و با اندازه محدود در نظر گرفته می‌شوند. به طور پیشفرض، شکستگی‌های گسسته، دیسک شکل هستند. بخش DFN یک ابزار کارآمد برای تولید و تصویرسازی شکستگی‌ها ارائه می‌دهد که در این پژوهش با استفاده از آن درزه‌های از پیش موجود مدل‌سازی شده‌اند. روش مدل‌سازی DFN تصادفی است. ویژگی‌های هندسی یک مدل DFN فقط از طریق توزیع‌های آماری مستقل مربوط به خواص هندسی آن (نوع توزیع و پارامترهای مرتبط) محدود می‌شود. ویژگی‌های هندسی که در حال حاضر توسط بخش DFN پشتیبانی می‌شوند عبارتند از:

(۱) اندازه شکستگی (قطر)، جهت و توزیع موقعیت.

(۲) بسته به یک عدد تصادفی، از یک مدل DFN (تصادفی)

می‌توان هر تعداد DFN مختلف را ایجاد کرد.

در روش المان گسسته تمام مشخصات مکانیکی نمونه به صورت میکروپارامتر است یعنی نمی‌توان از مدول یانگ، ضریب پواسون و ... موجود در آزمایشگاه یا به عبارتی همان مشخصات ماکرومکانیک برای مشخصات پیوند میان ذرات استفاده نمود پس باید با استفاده از مدل‌سازی آزمایش‌های فشاری تک محوره و برزیلی مشخصات میکرومکانیک نمونه سنگ مورد نظر با مشخصات آزمایشگاهی مقایسه و واسنجی شوند. پس از انجام واسنجی، با در نظر گرفتن مشخصات میکرومکانیک موجود، نمونه اصلی مورد نظر برای آزمایش شکست هیدرولیکی مدل‌سازی خواهد شد.

محاسباتی با دوره محاسباتی قبلی، از نظر مشخصات سنگ مانند مقدار تخلخل، چگالی، شعاع ذرات و ... عددی کمتر یا برابر با $0/00001$ شود. دلیل استفاده از عددی به این اندازه کوچک، بالا بردن دقت کار است. عددهای کمتر از این مقدار هم امتحان شدند اما به جز بالا بردن زمان محاسبات، نتیجه آن‌ها تاثیری در دقت کار ایجاد نمی‌کردند.

با توجه به این که در روش المان مجزا (نرم‌افزار PFC) نمونه مورد نظر متشکل از تعداد زیادی دیسک در دو بعد است که مشخصات کلی آن براساس تعامل بین این ذرات شکل گرفته است تا نمونه مورد نظر را تشکیل دهند، بنابراین نیاز است که پارامترهایی به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار، دیسک‌های موجود و پیوند بین آن‌ها، داده شود که در انتها بعد از مدلسازی، نمونه به دست آمده همان مشخصات نمونه آزمایشگاهی را داشته باشد. این مشخصات و داده‌های ورودی به عنوان پارامترهای میکرو نمونه یاد می‌شوند و مشخصات نهایی که همان پارامترهای مکانیکی در آزمایشگاه است به عنوان پارامترهای ماکرو نمونه بیان می‌شوند. بنابراین قبل از مدلسازی نمونه اصلی برای آزمایش شکست هیدرولیکی نیاز است که این مشخصات میکرو مکانیکی به دست آیند.

برای پیدا کردن پارامترهای میکرو نمونه با استفاده از روش آزمون و خطا مدلسازی‌هایی انجام می‌شود تا بتوان نتیجه دلخواه را به دست آورد. در این جا مبنای مدلسازی‌ها آزمایش‌های برزیلی و فشاری تک محوره که توسط ژوانگ و همکاران در آزمایشگاه انجام شده‌اند است.

با استفاده از مدلسازی آزمایش فشاری تک محوره مقاومت فشاری نمونه و مدول الاستیک واسنجی می‌شوند. با تغییر در مقدار داده‌های ورودی می‌توان پارامترهای میکرو مورد نظر را به دست آورد که با استفاده از آن‌ها در پایان بعد از مدلسازی، نمونه همان مقاومت فشاری و مدول الاستیک حاصل از آزمایشگاه را داشته باشد. آن دسته از پارامترها که نتیجه مورد نظر را ارائه دهند همان پارامترهایی هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان نمونه اصلی خود را برای آزمایش شکست هیدرولیکی مدلسازی نمود.

علاوه بر آزمایش فشاری، با استفاده از آزمایش برزیلی نیز همین کار را انجام داده و با حفظ پارامترهای به دست آمده از مدلسازی آزمایش فشاری سایر پارامترهایی که مربوط به مقاومت کششی نمونه می‌شوند، واسنجی خواهند شد. اگر در هنگام انجام مدلسازی و انجام صحیح خطاهای لازم تغییری در پارامترهای قبلی ایجاد شود نیاز است که بار دیگر مدلسازی آزمایش فشاری را انجام داده تا در نهایت به نتیجه مشترکی برای پارامترهای ورودی در هر دو آزمایش رسید.

بعد از این که مدلسازی برای هر دو آزمایش انجام شد و خواص میکرو مکانیک ورودی مورد نظر یافته شد، می‌توان به مدلسازی اصلی خود برای شکست هیدرولیکی پرداخت.

در ابتدا آزمایش فشاری تک محوره [18] مدلسازی می‌شود: نمونه استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر تحت آزمایش فشاری تک محوره قرار گرفته است، شعاع ذرات دایره‌ای استفاده شده برای مدلسازی نمونه مانند نمونه اصلی برابر با $0/1$ تا $0/15$ میلی متر در نظر گرفته شده که بعد از مدلسازی، نمونه مورد نظر برای آزمایش فشاری با تعداد ۹۵۵۲۳ توپ ساخته شده است (شکل ۴).

به منظور بارگذاری از ۲ دیوار به عنوان دو فک بارگذاری استفاده می‌شود. این دو دیوار با حرکت به سمت یکدیگر نمونه را تا لحظه شکست تحت فشار قرار می‌دهند. با ثبت مقدار فشار و کرنش روی این دو دیوار در هر دوره محاسباتی می‌توان نمودار تنش کرنش مرتبط با آزمایش فشاری را به دست آورد.

پس از پایان بارگذاری می‌توان به نمودار نهایی تنش کرنش مرتبط با نمونه دست یافت که محور عمودی آن تنش، محور افقی آن کرنش و شیب این نمودار مقدار مدول الاستیک نمونه را نشان می‌دهد (شکل ۵):

ورودی مربوط به حالتی که نتایج عددی و آزمایشگاهی با هم هماهنگی خوبی دارند شکل (۵) می‌تواند به عنوان پارامترهای میکرو در نظر گرفته شوند و قابل اعتماد برای مدل‌سازی اصلی باشند (جدول ۱).

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی سنگ

	Laboratory	Numerical
Uniaxial Compression	220.01 MPA	222.8 MPA
E (Diagram slope)	57.53 GPa	55.1 GPa

Table 1. Rock mechanical properties

در مرحله بعدی برای تکمیل واسنجی آزمایش برزیلی [19] مدل‌سازی می‌شود:

دیسک‌هایی با قطر ۵۰ میلی متر و ضخامت ۲۵ میلی متر برای انجام مدل‌سازی‌های آزمایش برزیلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شعاع ذرات دایره‌ای استفاده شده در نرم‌افزار برای مدل‌سازی نمونه در این آزمایش مانند قسمت قبل برابر با ۰/۱ تا ۰/۱۵ میلی متر در نظر گرفته شده است که بعد از مدل‌سازی، نمونه با تعداد ۳۷۵۲۰ توپ ساخته شده است (شکل ۶). با استفاده از بیست دیواره در بالا و پایین نمونه (ده دیواره در بالا و ده دیواره در پایین) به عنوان فک‌های بارگذاری، اعمال فشار روی نمونه به وسیله حرکت دیوارها به سمت هم تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. در این جا به منظور بارگذاری با استفاده از فکی که انحنا دارد با مدل نمودن ۱۰ عدد دیواره در هر سمت انحنای مورد نظر برای بارگذاری در آزمایش برزیلی تأمین شده است. شکل ۶. الف) نمونه قبل از بارگذاری، ب) نمونه بعد از بارگذاری و گسیختگی آن به وسیله دو فک بارگذاری در بالا و پایین آن

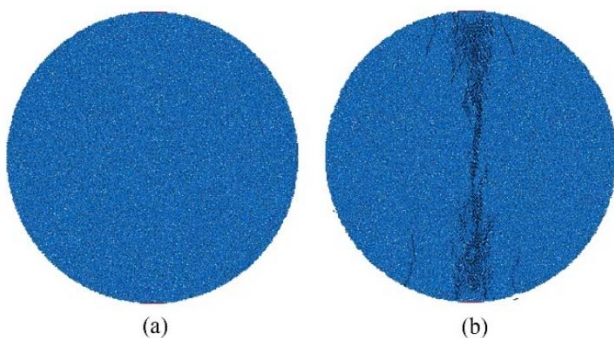


Fig. 6. a) Sample before loading, b) Sample after loading and breaking by 2 loading jaws on top and bottom of the sample

شکل ۴. الف) نمونه قبل از بارگذاری، ب) نمونه بعد از بارگذاری به وسیله ۲ فک بارگذاری که همان ۲ دیوار قرمز رنگ در بالا و پایین نمونه هستند، ج) نشان دهنده ترک‌های برشی قرمز رنگ و ترک‌های کششی مشکی رنگ بعد از بارگذاری

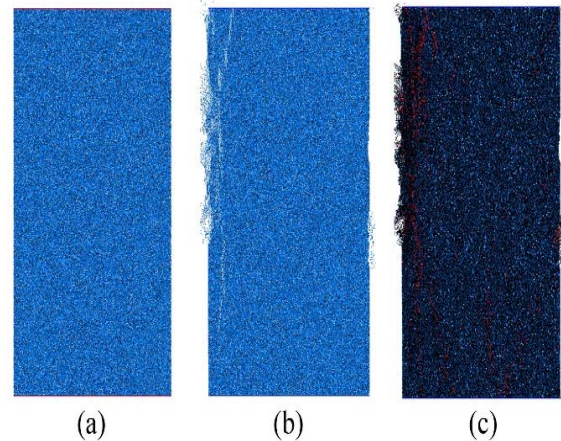


Fig. 4. a) Sample before loading b) Sample after loading by 2 loading jaws which are the 2 red walls on top and bottom of the sample c) Indicates red shear cracks and black tensile cracks after loading

شکل ۵. نمودار تنش (مگاپاسکال) - کرنش نمونه تحت بارگذاری

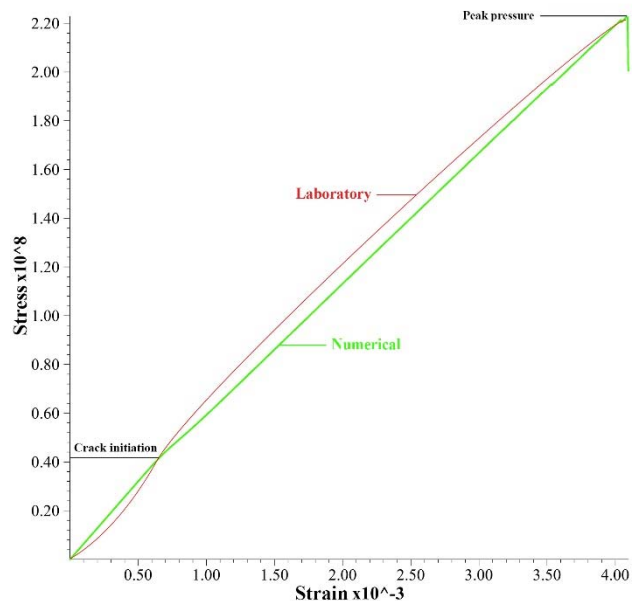


Fig. 5. Stress (MPa) - strain diagram of the sample under loading

استفاده از روش صحیح خطا و بررسی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها با مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند مناسب‌ترین حالت ممکن که نتایج نهایی با تقریب خوبی نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی باشند را نشان دهد. آن دسته از پارامترهای

قسمت قبل برای مدل پیوند مسطح جدول (۳) در دو بعد مدل سازی می شود که در نهایت بعد از اتمام مرحله ساخت، نمونه مورد نظر دارای ۴۵۹۸۲ دیسک با شعاع بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ میلی متر است.

جدول ۳. مشخصات میکرو مکانیکی نمونه

Micro-parameters of sample	Value
Minimum grain radius, R_{min} (mm)	0.1
Maximum grain radius, R_{max} (mm)	0.15
Density ($\frac{kg}{m^3}$)	۲۶۰۹/۰
Porosity	۰/۰۵
Effective modulus, E_{mod} (GPA)	۵۷/۰
Normal-to-shear stiffness ratio, $K^* = \frac{K_N}{K_S}$	۳/۵
Tensile strength [stress], MPA	۱۲/۳
Cohesion [stress], MPA	۸۵/۰
Friction angle [degrees]	۴۸/۰
Friction coefficient	۰/۱
Number of elements in radial direc, N_r	۲

Table 3. Micromechanical parameters of the sample

با مدل سازی نمونه برای آزمایش شکست هیدرولیکی به سراغ اعمال فشار به وسیله حرکت ۳۹۲۷ دیواره با سرعت ثابت، خارج از

مرکز گمانه و خلاف جهت بردار نرمال برای حالت های گوناگون

سرعت رفته که برای انجام این کار در نرم افزار از روش سرور کنترل

مقاومت کششی در مدل سازی آزمایش برزلی برابر با ۵/۹۹ استفاده می شود. فشار محصور کننده در شرایط یکسان با مطالعه

مگاپاسکال به دست آمده که با تقریب مناسبی برابر با مقدار آزمایشگاهی صفر در نظر گرفته شده است. همان شکل که بیان شد

آزمایشگاهی است و در نتیجه می توان از مقادیر میکرو ورودی سنگ استفاده شده در این پژوهش، سنگ گرانتیت با مقاومت بسیار بالا

است. این سنگ شکننده است و شکست اصلی نمونه در همان نقطه

قله نمودار اتفاق می افتد و برای ما آن نقطه ارزشمند است. در رابطه با

ادامه روند شکست هم نکاتی در نظر گرفته شده است که دقت

مدل سازی را بالا ببرند. اولین نکته استفاده از تعداد بالای دیوار در مرز

گمانه به منظور افزایش اندرکنش دیوارها و نمونه و ایجاد فشار همه

جانبه ای نزدیک به فشار سیال است. دومین موضوع هم توزیع

دیسک هایی با شعاع بسیار کم (۰,۰۰۹۱ میلی متر تا ۰,۰۱۳۶ میلی متر)

نمونه ای با قطر ۵۰ میلی متر و گمانه ای با قطر ۸ میلی متر در مرکز و بدون هیچ گونه پیوندی در مرز ۲۳۸ گمانه است که تنها

بعد از انجام صحیح خطاهای لازم و مدل سازی های مورد نیاز می توان به حالت مناسبی از همانگی بررسی عددی و آزمایشگاهی دست یافت که در نتیجه ی آن نمودار بارگذاری تا لحظه ی گسیختگی به دست می آید، (شکل ۷).

شکل ۷. نمودار نیرو (نیوتون) در مقابل تعداد سیکل در آزمایش برزلی

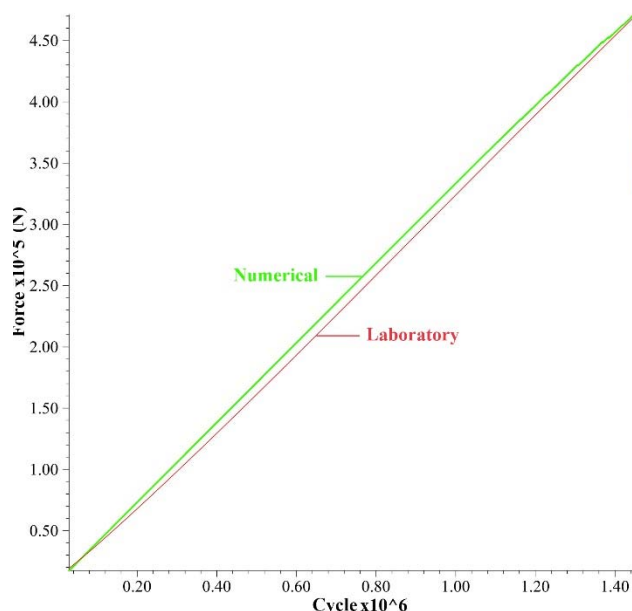


Fig. 7. Force (N) – cycles diagram of the sample under loading

همان گونه که از نمودار مشخص است نقطه قله نمودار برابر با

۰/۴۷ مگانیوتون است. با توجه به رابطه مورد نظر مقاومت کششی

به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\tau = \frac{\pi \times D}{\pi \times 0.05} = 5.99 \text{ MPA} \quad (4)$$

مقاومت کششی در مدل سازی آزمایش برزلی برابر با ۵/۹۹

مگاپاسکال به دست آمده که با تقریب مناسبی برابر با مقدار آزمایشگاهی صفر در نظر گرفته شده است. همان شکل که بیان شد

آزمایشگاهی است و در نتیجه می توان از مقادیر میکرو ورودی سنگ استفاده شده در این پژوهش، سنگ گرانتیت با مقاومت بسیار بالا

است. این سنگ شکننده است و شکست اصلی نمونه در همان نقطه

قله نمودار اتفاق می افتد و برای ما آن نقطه ارزشمند است. در رابطه با

ادامه روند شکست هم نکاتی در نظر گرفته شده است که دقت

مدل سازی را بالا ببرند. اولین نکته استفاده از تعداد بالای دیوار در مرز

گمانه به منظور افزایش اندرکنش دیوارها و نمونه و ایجاد فشار همه

جانبه ای نزدیک به فشار سیال است. دومین موضوع هم توزیع

دیسک هایی با شعاع بسیار کم (۰,۰۰۹۱ میلی متر تا ۰,۰۱۳۶ میلی متر)

نمونه ای با قطر ۵۰ میلی متر و گمانه ای با قطر ۸ میلی متر در مرکز و بدون هیچ گونه پیوندی در مرز ۲۳۸ گمانه است که تنها

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

آن را با توجه به مشخصات میکرو مکانیک به دست آمده از

شکل ۸ شکست هیدرولیکی نمونه

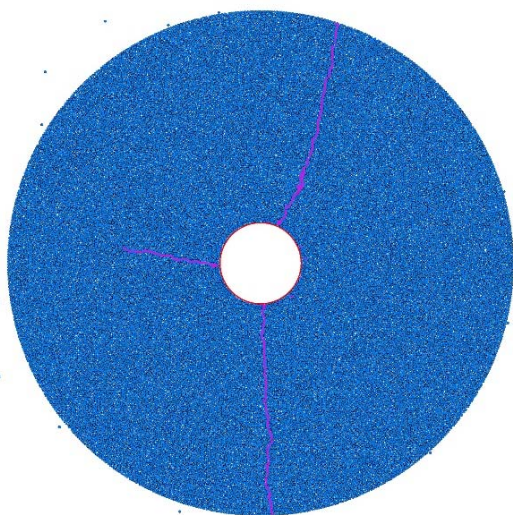
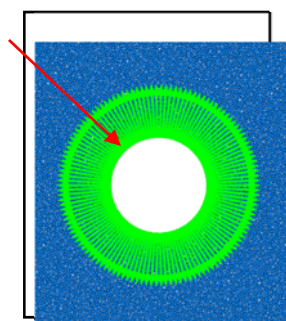
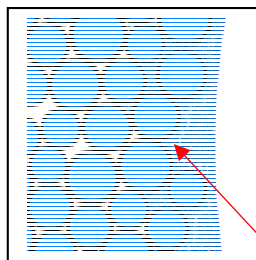


Fig. 8. Sample hydraulic fractured

به منظور افزایش اندرکنش دیوارها و خود نمونه سنگی و همچنین فراهم کردن شرایطی برای امکان نفوذ این دیسک‌های ریز در داخل دیسک‌های اصلی نمونه است. با استفاده از این دو نکته سعی بر این بوده که شرایط مرزی نمونه به شرایط حضور سیال نزدیک‌تر شود تا محدودیت موجود در نرم‌افزار برای مدل‌سازی جریان جبران شود.

به منظور مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، هر یک از سرعت‌های در نظر گرفته برای دیوارها را با یک حالت خاص از دبی در آزمایشگاه متناظر در نظر گرفته می‌شود. در این جا به عنوان نمونه، این برابری را برای حالتی که سرعت برابر با ۰/۰۰۱ است بررسی شده است:

$$Q = V \times A = V \times \pi \times r^2 \quad (5)$$

که در آن Q نشان دهنده دبی، V نشان دهنده سرعت و A برابر با مساحت گمانه است.

با فرض برابری سرعت سیال در مرکز و مرکز گمانه:

$$Q = 0.001 \times 1000 \times \pi \times 4 \times 4 = 50.26 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \quad (6)$$

در قسمت دوم درزه‌های از پیش موجود با زوایای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ درجه در داخل نمونه به عنوان شکستگی‌های طبیعی مدل‌سازی می‌شوند و تاثیر حضور این درزها در نمونه بر روند شکست هیدرولیکی بررسی خواهد شد. در ابتدا مدل‌سازی بدون حضور درزه برای سرعت‌های متفاوت اعمال بارگذاری انجام خواهد شد، (شکل ۸):

همان‌گونه که از نمودارهای شکل (۹) نمایان است با کاهش سرعت بارگذاری (سرعت دیوارها)، نمونه منعطف‌تر شده، از حالت شکننده خارج شده و فشار شکست کاهش یافته است اما شکست در مدت زمان (تعداد سیکل) بیشتری اتفاق می‌افتد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده درستی مدل‌سازی انجام شده است.

شکست هیدرولیکی که در نمونه ایجاد شده است، می‌توان مشاهده نمود:

شکل ۱۰. نمودار فشار شکست در مقابل تعداد سیکل برای درزه دو طرفه با زوایای ۰ تا ۸۰ درجه و سرعت ۰,۰۰۵ متر بر ثانیه

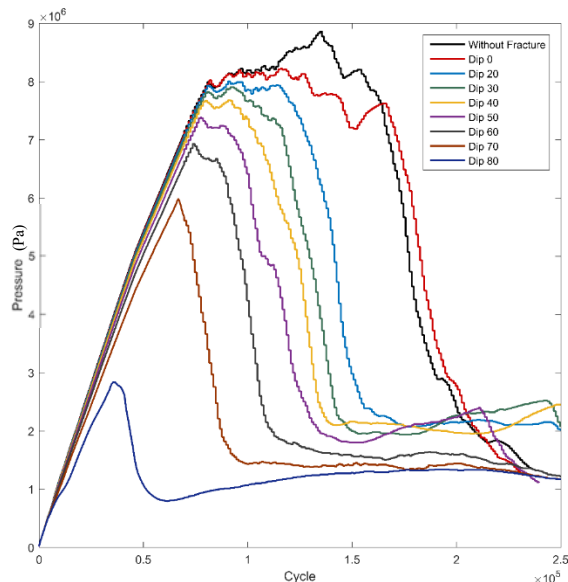


Fig 10. Pressure vs cycle diagram for 2 side joints with angles of 0 to 80 degrees and velocity of 0.005 m/s

شکل ۱۱. شکست هیدرولیکی در نمونه با شکستگی طبیعی با زاویه ۶۰ درجه

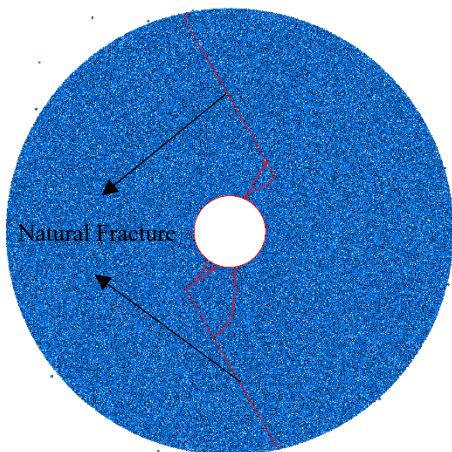


Fig 11. Specimen hydraulic fracture with an angle of 60 degree

نمودار موجود در شکل (۱۱) بیانگر این موضوع است که با افزایش زاویه درزه از پیش موجود نسبت به افق (در جهت ساعتگرد) فشار شکست کاهش می‌یابد و همچنین نمودار بعد از رسیدن به نقطه قله خود در تعداد سیکل کمتری دچار افت از مقدار اوج خود می‌شود.

شکل ۹. نمودار فشار در مقابل تعداد سیکل بدون حضور درزه از پیش موجود برای سرعت ۰,۰۱ تا ۰,۰۰۱ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

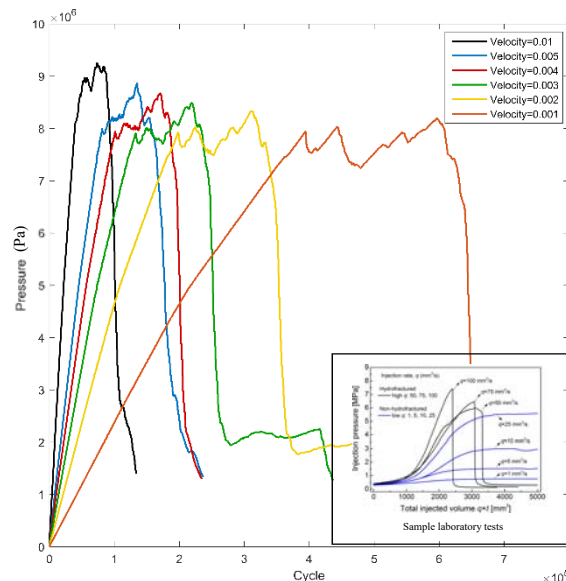


Fig. 9. Pressure vs cycles diagram without the presence of pre-existing joints with different velocities (0.01 to 0.001) and comparison with laboratory results

جدول ۴ فشار شکست برای سرعت‌های متفاوت و بدون در نظر گرفتن درزه از پیش موجود در نمونه را نشان می‌دهد:

جدول ۴. فشار شکست برای سرعت‌های متفاوت در آزمایش شکست هیدرولیکی

Velocity (m/s)	Q ($\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$)	Numerical breakdown Pressure (Mpa)	Laboratory breakdown Pressure (Mpa)
0/0005	25	8/14	7/17
0/001	50	8/19	8/14
0/0015	75	8/25	7/93
0/002	100	8/33	8/38
0/003	150	8/49	-
0/004	201	8/68	-
0/005	251	8/87	-
0/01	502	9/26	-

Table 4. Breakdown pressure for different velocities in hydraulic fracture test

در ادامه درزه‌های طبیعی از پیش موجود برای زوایای ۰ تا ۸۰ درجه در دو سمت نمونه مدلسازی می‌شوند و به اندرکنش میان این شکستگی‌های طبیعی از پیش موجود با شکست هیدرولیکی پرداخته خواهد شد. در این قسمت دیوارها با سرعت بارگذاری ۰,۰۰۵ متر بر ثانیه فشار همه جانبه مورد نظر را ایجاد می‌نمایند (شکل ۱۰). در شکل (۱۱) این اندرکنش را میان نمونه سنگ گرانیتی که دارای شکست طبیعی با زاویه ۶۰ درجه است با

۵- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از مدل سازی با استفاده از روش المان مجزاء با به کارگیری مدل پیوند مسطح برای نمونه سنگ گرانیت نشان دهنده برابری نتایج مدل سازی عددی و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط ژوانگ و همکاران برای حالتی که شکستگی طبیعی در نمونه موجود نباشد، است.

در فرایند شکست هیدرولیکی همان گونه که نشان داده شد با کاهش سرعت بارگذاری (سرعت دیوارها) و در واقع کاهش میزان دبی:

(۱) فشار شکست در عدد کمتری رخ خواهد داد و نمونه با فشار کمتری تحت شکست هیدرولیکی شکسته می شود.

(۲) شکست در مدت زمان (تعداد سیکل) بیشتری اتفاق می افتد.

در مرحله دوم و پس از درستی آزمایی با نتایج آزمایشگاهی برای حالت بدون شکستگی طبیعی، این بار با در نظر گرفتن شکستگی های طبیعی با زوایای مختلف نشان داده شد که با افزایش زاویه شکست طبیعی نسبت به افق (در جهت ساعتگرد):

(۱) فشار شکست در عدد کمتری رخ خواهد داد و نمونه با فشار کمتری تحت شکست هیدرولیکی شکسته می شود.

(۲) فشار شکست در تعداد سیکل های کمتری اتفاق می افتد و نمونه زودتر شکسته می شود.

(۳) تعداد سیکل های کمتری دارای فشار بیشینه هستند و نمودار فشار در مقابل تعداد سیکل زودتر دچار افت فشار می شود.

در پایان هم مشخص شد که هر چقدر فاصله شکستگی های طبیعی از مرکز نمونه بیشتر شود نمونه به حالت بدون درزه نزدیک تر می شود.

۶- مراجع

- [1] J. W. Tester *et al.*, "The future of geothermal energy," *Massachusetts Inst. Technol.*, vol. 358, 2006.
- [2] P. Valkó and M. J. Economides, *Hydraulic fracture mechanics*, vol. 28. Wiley Chichester, 1995.
- [3] I. Tomac and M. Gutierrez, "Micromechanics of hydraulic fracturing and damage in rock based on DEM modeling," *Granul. Matter*, vol. 22, no. 3, p. 56, 2020, doi: 10.1007/s10035-020-01023-z.
- [4] H. Fatahi, M. M. Hossain, and M. Sarmadivaleh, "Numerical and experimental investigation of the interaction of natural and propagated hydraulic fracture," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 37, pp. 409–424, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.054>.
- [5] J. Zhou, L. Zhang, Z. Pan, and Z. Han, "Numerical studies of interactions between hydraulic and natural fractures by Smooth Joint Model," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 46, pp. 592–602, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.07.030>.
- [6] Y. Zhang *et al.*, "An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite," *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 615–624, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.096>.
- [7] T. Ishida, Q. Chen, Y. Mizuta, and J.-C. Roegiers, "Influence of Fluid Viscosity on the Hydraulic Fracturing Mechanism," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 126, no. 3, pp. 190–200, 2004, doi: 10.1115/1.1791651.
- [8] L. Zhuang, K. Y. Kim, S. G. Jung, M. Diaz, and K.-B. Min, "Effect of water infiltration, injection rate and anisotropy on hydraulic fracturing behavior of granite," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 575–589, 2019.
- [9] D. O. Potyondy, "The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions," *Geosystem Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–28, 2015, doi: 10.1080/12269328.2014.998346.
- [10] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [11] D. Potyondy, *A flat-jointed bonded-particle material for hard rock*, vol. 3. 2012.
- [12] D. O. Potyondy, "A Flat-Jointed Bonded-Particle Model for Rock," 2018, vol. All Days.
- [13] P. Wang, M. Cai, and F. Ren, "Anisotropy and directionality of tensile behaviours of a jointed rock mass subjected to numerical Brazilian tests," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 73, pp. 139–153, 2018.
- [14] D. O. Potyondy, "The Bonded-Particle Model as a Tool for Rock Mechanics Research and Application: Current Trends and Future Directions," 2012, vol. All Days.
- [15] "Potyondy, D. (2012a) 'PFC2D Flat-Joint

- Contact Model,' Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, Technical Memorandum ICG7138-L, July 26, 2012."
- [16] "D. O. Potyondy, 'Material-Modeling Support in PFC [fistPkg25],' Itasca Consulting Group, Inc., Technical Memorandum ICG7766-L (March 16, 2017), Minneapolis, Minnesota.," vol. 27. p. 77, 2009.
- [17] "Potyondy, D. (2016) 'Flat-Joint Contact Model [version 1],' Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, Technical Memorandum 5-8106:16TM47, October 12, 2016."
- [18] S. Kahraman, "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 38, no. 7, pp. 981–994, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00039-9).
- [19] C. Fairhurst, "On the validity of the 'Brazilian' test for brittle materials," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences \& Geomechanics Abstracts*, 1964, vol. 1, no. 4, pp. 535–546.

Numerical modeling of hydraulic fracture considering the pre-existing joints using PFC software

Erfan Attari^{1*}, Aliakbar Golshani²

- *1. M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

golshani@modares.ac.ir

Abstract

Hydraulic fracturing is a new and widely used method for extracting reserves and energy resources in the depths of the earth. In the near future, due to increase in energy consumption on the one hand and depletion of energy reserves on the other, using of this method will become a necessity. One of the most important and effective parameters in this process is the pressure and how it is applied in order to create fractures and fracture progression in rock layers. Another important parameter is the interaction between pre-existing natural fractures with different angles and hydraulic fracture.

Due to the high costs of this process, the purpose of this study is to achieve the optimal state for the maximum progress of hydraulic fracture and the lowest amount of breakdown pressure at the same time. Numerical modeling was performed in two dimensions by Particle Flow Code (PFC) software from Itasca Company on samples of Pocheon granite rocks with brittle behavior using distinct element method. PFC software uses circular disks in two dimensions to construct and make the sample using distinct element method. These particles are in contact with each other through bonds. In this program there are walls that interact with these disks to apply load on the sample. The flat joint model is used in order to create contacts between particles, and discrete fracture network is used to create pre-existing natural fractures for interacting with hydraulic fracture.

Given that in the distinct element method (PFC software) our sample consists of a large number of particles in two dimensions that the general characteristics of the sample are formed based on the interaction between these particles, so we need parameters as input data to our software, existing disks and the link between them, to finally obtain the specifications of the same laboratory sample after modeling. These specifications and input data are referred to as micro parameters, and the final specifications, which are the same as our mechanical parameters in the laboratory, are referred to as macro parameters.

To find the micro parameters of the sample we use the trial and error method. Here, our modeling is based on Brazilian and uniaxial compression experiments and performed by Zhuang et al. laboratory investigations.

Due to the limitations of PFC software for fluid flow modeling and limitations for using of CFD relationships, pressure equals to fluid pressure can be used as a new solution. In this way, by modeling a number of walls that form a complete circle with overlapping each other, and by considering the servo control mechanism, we move them in the opposite direction of their normal vectors and off-center, creating a comprehensive pressure which is actually same as the fluid pressure. From the obtained results, it was found that with increasing the loading rate, the sample reaches the breakdown pressure and breaks in less time, but the amount of breakdown pressure increases. Also, by increasing the natural fracture angle relative to the horizon (clockwise), the specimen breaks at a lower breakdown pressure. Finally, by increasing the natural fracture distance from the center of the sample, the effect of the presence of the joint in the sample decreases and the breakdown pressure approaches the seamless state.

Keywords: Hydraulic fracture, Natural fracture, Distinct Element Method, Breakdown pressure, Particle Flow Code Software