مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی شکست هیدرولیکی در ماسه سنگ‌های لوشان

مهدی حسینی*؛ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، گروه مهندسی معدن
عباس اکرمی، ابراهیم جعفری؛ شرکت معدنی و ژئوتکنیکی افغانایات، کابل، افغانستان

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۷/۲۴ پذیرش ۹۶/۰۴/۲۶

چکیده

در صنعت نفت به‌منظور افزایش شاخص تولید و بازیافت از چاه‌هایی که به‌علت برداشت طولانی مدت، بازدهٔ آن کاهش یافته است یا سنگ‌های اطراف چاه میزان نفوذپذیری کمی دارند از شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود. از آن‌جاکه عملیات شکست هیدرولیکی، عملیاتی پر هزینه است، به‌دست آوردن فشار لازم برای شکست هیدرولیکی و تعیین پمپ مناسب برای این عملیات، برای مجریان پروژه، اهمیت به‌سزایی دارد. در این تحقیق به مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی شکست هیدرولیکی در ماسه سنگ‌های لوشان پرداخته شد. هدف از این مدل‌سازی‌ها بررسی نحوهٔ شکست هیدرولیکی، وضعیت تنش‌های اصلی در هنگام آغاز شکست و فشار لازم برای آغاز شکست در این سنگ‌ها است. در این تحقیق، مدل‌های عددی ساخته شده بدون ترک و شکستگی پیش فرض است و مسیر و نحوهٔ رشد ترک بدون هیچ پیش‌داوری و تعیین قبلی بررسی شد. فشار شکست‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی با آن‌چه از آزمایشگاه به‌دست آمده است اختلاف کمی دارد. در اغلب موارد ترک از قسمت مرکزی نمونه آغاز شده و به‌سمت دو سر نمونه گسترش می‌یابد و راستای گسترش ترک در راستای محور گمانه و عمود بر تنش جانبی است. مجریان طرح شکست هیدرولیکی می‌توانند با روش ارائه شده در این تحقیق و مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی شکست هیدرولیکی، فشار شکست هیدرولیکی در شرایط مختلف را به‌دست آورده و پمپ مناسب برای عملیات را انتخاب کنند. با توجه به این‌که نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی مطابقت خوبی با نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی دارد، محدودیت ظرفیت پمپ موجود در آزمایشگاه را می‌توان با مدل‌سازی عددی جبران کرد.

واژه‌های کلیدی: شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی، ماسه سنگ‌های لوشان.

*نویسنده مسئول mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

مقدمه

تکنیک شکست هیدرولیکی بیان‌گر فرآیند شروع و گسترش شکستگی در سنگ، ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال شده به‌وسیلهٔ سیال است. این تکنیک را کلارک ابداع کرد [۱]. سپس بررسی روی شروع و گسترش شکست را هیمسون- فیرهارست توسعه داد [۲]. هوبرت و ویلیس پژوهش‌های کاملی را در زمینه مکانیک شکست هیدرولیکی و تعیین جهت و حالت تنش‌های اصلی با استفاده از فرایند شکست هیدرولیکی انجام دادند [۳]. از آن زمان، تحقیقات و مدل‌سازی‌های زیادی برای بررسی عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی انجام شده است. تعدادی از آن‌ها عبارتند از:

ریبرو و همکارانش، به‌منظور مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، دستگاه سلول بارگذاری سه محوره‌ای را که سیستم اعمال فشار داخل گمانه و سیستم ثبت کنندهٔ فشارهای مختلف داشت، طراحی کردند. این سلول دارای ظرفیت ۲۱ مگاپاسکال برای بار محوری و ۱۰/۵ مگاپاسکال برای بار جانبی است. نمونه‌های بررسی شدهٔ آن‌ها به‌صورت مکعبی و از جنس ژیپس و در مقیاس کوچک (۰/۱ ×۰/۱×۰/۱) متر بود. نتایج به‌دست آمده به‌وسیلهٔ آن‌ها نشان‌دهندهٔ کارایی مناسب این سلول برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی است [٤].

سانگ و همکاران بررسی‌های آزمایشگاهی را روی نمونه‌های ماسه سنگی انجام دادند. هدف آن‌ها بررسی فشار شکست در آزمایش شکست هیدرولیکی و بررسی رابطه‌ای مناسب بین فشار شکست و تنش‌های محصور کننده در ماسه سنگ‌های با تخلخل بالا است [۵].

دپاتر و بیوگلسدایک مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی شکست هیدرولیکی در سنگ شکافدار طبیعی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در نرخ جریان کم، تزریق همیشه منجر به جریان سیال در شکاف‌های طبیعی می‌شود. در نرخ جریان بیش‌تر، شکست‌های جدید می‌تواند گسترش پیدا یابد [٦].

ساتوه و یاماگوچی، مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای مصالح استفاده شده در هستهٔ سدهای خاکی انجام دادند. این آزمون‌ها روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی، با قطر خارجی ۳۰ سانتی‌متر (در مقیاس بزرگ) و هم‌چنین با قطر خارجی ۱۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

سانتی‌متر (در مقیاس متوسط) انجام شد. در تحقیق آن‌ها، تأثیر حداکثری قطر دانه‌های خاکی D_{max} و فشار محصورکنندهٔ σ_3 ، بر فشار شکست و مقاومت نمونه‌های ساخته شده از مصالح متراکم شده در برابر شکست هیدرولیکی بررسی شد. آن‌ها هم‌چنین نموداری را ارائه کردند که نمایانگر رابطهٔ بین فشار شکست P_f و فشار محصورکننده σ_3 برای آزمون‌های شکست هیدرولیکی در مصالح هستهٔ سدهای خاکی با قطر ذرات مختلف است [۷].

کاروالهو و همکاران مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان محدود را برای چاه‌های عمودی به‌منظور بررسی نحوهٔ گسترش شکستگی‌های هیدرولیکی عمودی انجام دادند. آن‌ها هم‌چنین مطالعه‌ای پارامتری برای بررسی اثر ویژگی‌های مواد مختلف اطراف شکستگی‌ها بر فشار گسترش شکست هیدرولیکی انجام دادند [۸].

شیمیزو و همکاران، آنالیز شکست هیدرولیکی در سنگ سخت را با در نظر گرفتن ویسکوزیته سیال و توزیع اندازه ذره بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مورد همهٔ نمونه‌ها، راستای شکست هیدرولیکی موازی باراستای تنش اصلی حداکثر است. فشار شکست برای سیال با ویسکوزیته کم، پایین‌تر از مقدار آن برای سیال با ویسکوزیته بالا است. سیال با ویسکوزیته پایین می‌تواند به آسانی در شکست نفوذ پیدا کند [۹].

چن، کاربرد روش المان محدود توسعه یافته را برای مسائل مربوط به شکست هیدرولیکی مطرح کرد. و المان‌های ساخته شده در این روش را با مقایسهٔ روش المان محدود و معادلات تحلیلی حاکم ارزیابی کردند. نتایج ابتدایی به‌دست آمده در این تحقیق یکی از گام‌های نخست کاربرد روش المان محدود توسعه یافته در مدل‌سازی شکست هیدرولیکی است [۱۰]. پژوهش‌های عددی نیز روی اندرکنش شکستگی‌های طبیعی و هیدرولیکی انجام شده است از آن جمله کشاورز و همکاران در سال ۲۰۱۶ و چنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به نحوهٔ تحریک شکست طبیعی با شکست هیدرولیکی پرداختند [۱۱]، [۱۲].

ژاو و همکاران مدل‌سازی عددی را برای شکست هیدرولیکی و ریز ارتعاشات مربوط به آن با استفاده از ترکیب روش المان گسسته و المان محدود انجام دادند. مدل‌سازی‌های آن‌ها نشان داد که در مقیاس محلی، شکستگی‌های هیدرولیکی بیش‌تر در مسیر ناپیوستگی‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

سنگ تمایل به گسترش دارند و لی در مقیاس مخزن، شکستگی‌های هیدرولیکی در راستای تنش اصلی حداکثری گسترش می‌یابند [۱۳].

قنبری و همکارانش در سال ۲۰۱۵ بر اساس یک سری آزمایش شکست هیدرولیکی یک معیار تجربی برای پیش بینی فشار شکست هیدرولیکی ارائه کردند. آزمایش‌های شکست هیدرولیکی تحت شرایط تحکیم نیافته زهکشی نشده روی استوانه‌های توخالی خاکی انجام شده است آن‌ها یک معیار خطی ارائه کردند که بر اساس فشار محصور کننده، فشار شکست هیدرولیکی را در خاک به‌کار رفته در سدهای خاکی پیش بینی می‌کرد [۱٤].

نوآوری این پژوهش در مقایسه با پژوهش‌های قبلی را می‌توان از دو جنبه آزمایشگاهی و عددی بیان کرد از جنبه آزمایشگاهی این پژوهش از این لحاظ حائز اهمیت است که در این تحقیق با اعمال تغییراتی روی سلول سه‌محوری هوک (این سلول در اکثر آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ موجود است) از این سلول می‌توان برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در مواقعی که تنش‌های افقی در چاه همسانگرد هستند (تنش‌های افقی با هم برابر هستند) استفاده کرد (تنش‌های افقی در منطقهٔ تولید چاه که در اعماق زیاد قرار دارند در بیش‌تر موارد با هم برابر است). هم‌چنین از جنبه عددی از روش اجزای محدود توسعه یافته استفاده شده است. در اکثر تحقیقات قبلی از روش‌های اجزا محدود، المان مرزی و تفاضل محدود استفاده شده است. روش المان محدود توسعه یافته یکی از جدیدترین روش‌های مدل‌سازی مسایل مکانیک شکست است. این روش نسبت به روش‌های پیشین دارای مزایای بسیاری است. مدل کردن ناپیوستگی‌ها مثل یک ترک با روش المان محدود معمولی و المان مرزی نیازمند آن است که مش از هندسه ناپیوستگی تبعیت کند در روش المان محدود یا المان مرزی از مش بسیار ریز و یا المآن‌های تکین در نوک ترک استفاده می‌شود. مدل کردن یک ترک در حال رشد حتی پیچیده‌تر است زیرا چنان‌که ترک رشد می‌کند مش نیز باید بتواند خود را با هندسه جدید ترک در هر گام رشد مطابقت دهد روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای روش المان محدود معمولی ساخته شده و تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می‌شوند. به این توابع خاص، توابع غنی‌سازی می‌گویند. در روش المان محدود توسعه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

یافته با افزودن درجهٔ آزادی به گره‌های اطراف ترک، رشد ترک مدل می‌شود. در نهایت، با مدل‌سازی عملیات شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه و با کمک مدل‌سازی عددی این آزمایش، می‌توان فشار شکست هیدرولیکی را برای شرایط مختلف محاسبه کرده و پمپ مناسب برای این عملیات را انتخاب کرد.

مدل‌سازی آزمایشگاهی

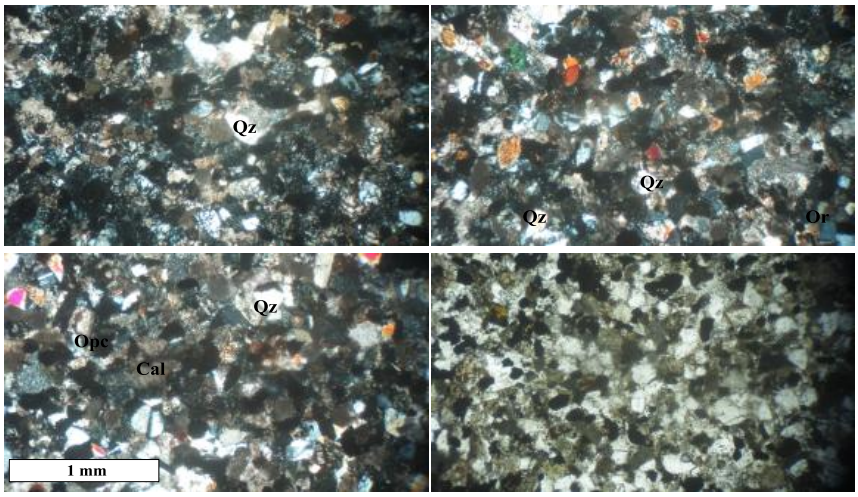
۱. نمونه‌های بررسی شده

نمونه‌های بررسی شده از جنس ماسه سنگ لوشان است که ماسه‌سنگی آهکی و دارای بافت آهکی–سیلیسی، که نوع سیمان آن آهکی است. از جمله کانی‌های اصلی و فرعی این سنگ می‌توان کلسیت، فلدسپار آلکالن، کوارتز و کانی‌های اپک را نام برد (شکل ۱). نمونه‌های مطلوب برای آزمایش شکست هیدرولیکی، به‌صورت استوانهٔ توخالی جدار ضخیم است که قطر خارجی آن ۵۴/۷ میلی‌متر، ارتفاع آن ۱۰۸ میلی‌متر و دارای حفره‌ای مرکزی به قطر ۱۲ میلی است. ویژگی‌های این نمونه سنگ‌ها در جدول ۱ آورده شده است. روی نمونه‌ها آزمایش برای تعیین تخلخل و وزن مخصوص، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسن)، آزمایش برزیلی (برای تعیین مقاومت کششی) و آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های نیم دایره‌ای (برای تعیین چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست) مطابق استانداردهای جامعه بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شده است [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸].

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های بررسی شده

دانیسته (KN/m^3)	تخلخل (٪)	مقاومت فشاری تک محوری(MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	انرژی شکست (N/m)
۲۱/۶۰	۷/۴۵	۵۴/۶۲	۶	۱۲/۲۲	۰/۲۱	۲۷/۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی نمونه ماسه‌سنگ

۲. تجهیزات استفاده شده

تجهیزات استفاده شده برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در این تحقیق شامل چهار بخش مجزا است، که عبارتند از : سلول آزمایش، جک اعمال بار محوری، پمپ اعمال‌کنندهٔ فشار جانبی و پمپ اعمال‌کنندهٔ فشار داخل گمانه. سلول آزمایش در واقع سلول تغییر یافتهٔ هوک است. برای مناسب‌سازی سلول برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی دو درپوش طراحی و ساخته شد که در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد. از یک درپوش، سیال برای ایجاد فشار هیدرولیکی در حفره مرکزی وارد می‌شود و از درپوش دیگر برای هواگیری حفره مرکزی استفاده می‌شود (شکل۲ و ۳). شکل ٤ تجهیزات آزمایش در هنگام اجرای یکی از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

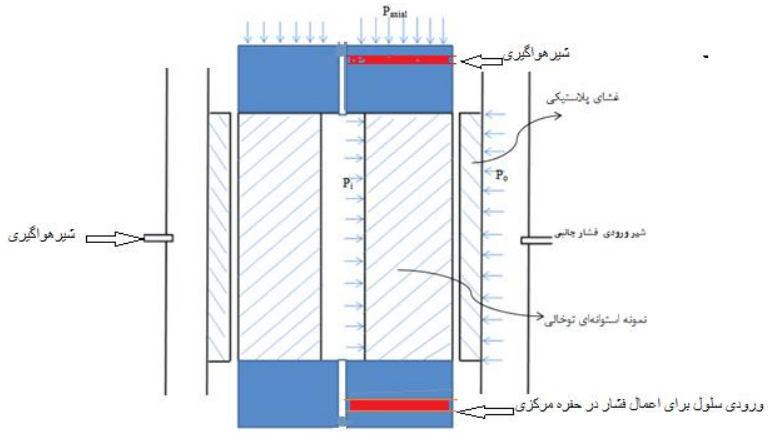
۳. برنامه آزمایش

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در این تحقیق چهار نمونه از ماسه سنگ‌های لوشان آماده‌سازی شد. این نمونه‌ها تحت تنش‌های محوری و محصورکنندهٔ مختلف قرار داده شده و فشار شکست برای شرایط مختلف به‌دست آمده و سپس هندسهٔ شکستگی‌های ایجاد شده بررسی می‌شود. مقادیر مختلف تنش جانبی و تنش‌محوری برنامه ریزی شده برای این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]



شکل ۲. سلول هوک و درپوش‌های ساخته شده برای مناسب‌سازی سلول برای آزمایش شکست هیدرولیکی



شکل ۳. نمایی از طراحی انجام شده برای اعمال فشار داخلی در سلول هوک تغییر یافته (در شکل P_{axial} نشان‌دهندهٔ تنش محوری، P_o نشان‌دهندهٔ تنش جانبی و P_i نشان‌دهندهٔ فشار در حفره مرکزی است)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]



شکل ٤. دستگاه آزمایش در هنگام یکی از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

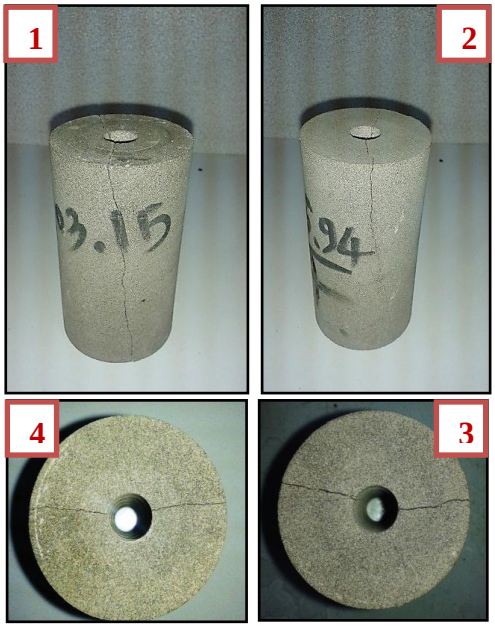
جدول ۲. شرایط تنش‌های اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی

شماره آزمایش	تنش محوری (مگاپاسکال)	تنش جانبی(مگاپاسکال)
۱	۲/۲٦	۲
۲	۲/۵	۲/۵
۳	۵	۰
٤	۷	۰

٤. نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی

شکل ۵ نشان‌دهندهٔ نمونه‌های شکسته شده در آزمایش‌ها است. چنان‌که مشاهده می‌شود، راستای شکستگی‌ها، اغلب در راستای قائم (راستای محور نمونه) است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]



شکل۵. نمونه‌های شکسته شده پس از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

هم‌چنین فشار شکست‌های به‌دست آمده از این چهار آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. فشار شکست‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی انجام شده

شمارهٔ آزمایش	تنش محوری (مگاپاسکال)	تنش جانبی (مگاپاسکال)	فشار شکست (مگاپاسکال)
١	٢/٢٦	٢	١٤/٥٨
٢	٢/٥	٢/٥	١٥/٧
٣	٥	٠	١١/١٦
٤	٧	٠	١١/٣٩

قبل از انجام عملیات شکست هیدرولیکی در بعضی مواقع در دیواره چاه به‌وسیلهٔ عملیات سوراخکاری، شکاف ایجاد می‌شود و در بعضی مواقع ایجاد شکاف نیاز نیست به‌عنوان مثال در حالتی‌که هدف از آزمایش شکست هیدرولیکی تعیین تنش است یا سنگ خیلی مقاوم نیست ایجاد شکاف در ابتدا نیاز نیست و شکاف در اثر فشار سیال که در داخل چاه پمپ می‌شود ایجاد می‌شود و برای این‌که این شکاف بعد از انجام عملیات شکست هیدرولیکی بسته

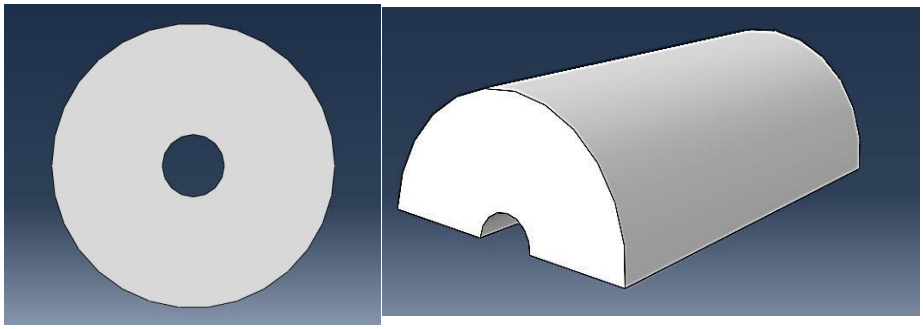
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

نشود در داخل شکاف‌ها پروپانت یا بازکننده پمپ می‌شود تا این شکاف بازنگه‌داشته شود. در این تحقیق حالت بدون وجود شکاف اولیه مدل شده است. در ضمن شکاف ایجاد شده همیشه به‌صورت موازی محور گمانه نیست در صورتی‌که تنش محوری، تنش اصلی حداقل باشد شکاف به‌صورت افقی است به‌خصوص در حالتی‌که سنگ دارای لایه‌های افقی باشد. البته در این پژوهش شرایط تنش‌های اعمال شده به‌صورتی بود که راستای شکستگی‌ها موازی محور گمانه بودند.

مدل المان محدود توسعه یافته

۱. هندسهٔ مدل

برای مدل‌سازی عددی این تحقیق یک مدل سه‌بعدی در آباکوس ساخته شد. هم‌چنین برای نمایش بهتر نحوهٔ شکست نمونه‌ها یک مدل دوبعدی نیز ساخته شد. مدل‌های ساخته شده در شکل ٦ ارائه شده است. برای کاهش دادن زمان تحلیل و سهولت کار، هندسهٔ مدل سه بعدی به شکل نیم‌استوانه در نظر گرفته شد. مدلی که ساخته شد بدون ترک و یا شکستگی پیش فرض است و در مورد مسیر و مختصات ترک پیش داوری و تعیین قبلی صورت نگرفته است.



شکل ٦. هندسهٔ مدل دوبعدی و سه‌بعدی ساخته شده

۲. معیار آسیب

برای پیش‌بینی مسیر شکست در مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده در این پژوهش، از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه که در نرم افزار آباکوس پیاده‌سازی شده، استفاده شد. این معیار بر اساس رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

$$f = \left\{\frac{\langle\sigma_{max}\rangle}{\langle\sigma^{o}_{max}\rangle}\right\} \quad (۱)$$

در این رابطه σ^{o}_{max} به‌معنای بیش‌ترین تنش اصلی مجاز ماده است. نماد $\langle\rangle$ به پرانتز ماکالای معروف است. هنگامی که آرگومان این تابع منفی شود، تابع مقدار صفر می‌گیرد و برای مقادیر مثبت آرگومان، تابع برابر با مقدار آرگومانش می‌شود. بنابراین تنش فشاری منجر به ایجاد آسیب نمی‌شود. آسیب هنگامی شروع می‌شود که نسبت تنش اصلی بیشینه (f) در رابطهٔ (۱) به مقدار یک برسد. ترک ایجاد شده یا ترک اولیه هنگامی توسعه می‌یابد که پس از یک مرحله تعادل، معیار شکست با توجه به تلرانس مد نظر (f_{tol}) در محدودهٔ مشخص شده در رابطهٔ (۲) قرار بگیرد [۱۹]:

$$1.0 \leq f \leq 1.0 + f_{tol} \quad (۲)$$

در معیار آسیب تنش اصلی بیشینه، ترک جدید همیشه متعامد با تنش اصلی حداقل تعریف می‌شود. مدل آسیب تنش اصلی بیشینه از پرکاربردترین مدل‌ها است. زمانی‌که در یک تنش محوری و فشار محصورکننده ثابت، تنش در جداره حفرهٔ مرکزی استوانهٔ توخالی افزایش می‌یابد با افزایش فشار داخل گمانه تنش‌های مماسی از فشاری به کششی تبدیل می‌شوند حالا زمانی‌که بر اساس این معیار این تنش کششی از مقاومت کششی سنگ بیش‌تر شود شکست آغاز می‌شود و سپس بر طبق رابطهٔ ۲ این شکست گسترش می‌یابد.

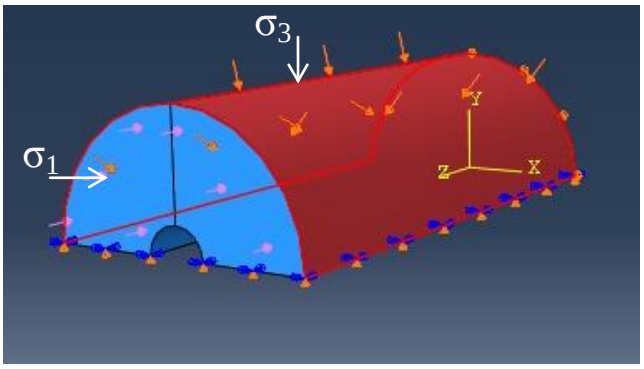
۳. شرایط بارگذاری و شرایط مرزی

در این مدل‌سازی سه تنش که شامل تنش‌محوری، جانبی و فشار سیال داخل گمانه است به نمونه اعمال می‌شود. شرایط مرزی نیز با توجه به موقعیت وجوه نمونه تعیین می‌شود. در شکل ۷ نحوهٔ اعمال تنش‌محوری و جانبی و هم‌چنین شرایط مرزی و در شکل ۸ نحوهٔ اعمال فشار سیال داخل گمانه نشان داده شده است. برای فشار سیال داخل گمانه، باید یک روند افزایش خطی فشار تعیین کرد.

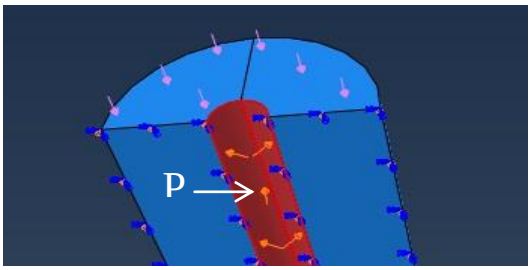
٤. مش‌بندی مدل

در این مدل‌سازی از المآن‌های چهاروجهی و تکنیک مش‌زنی آزاد استفاده شد. شکل ۹ مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی مش‌زده شده را نشان می‌دهد.

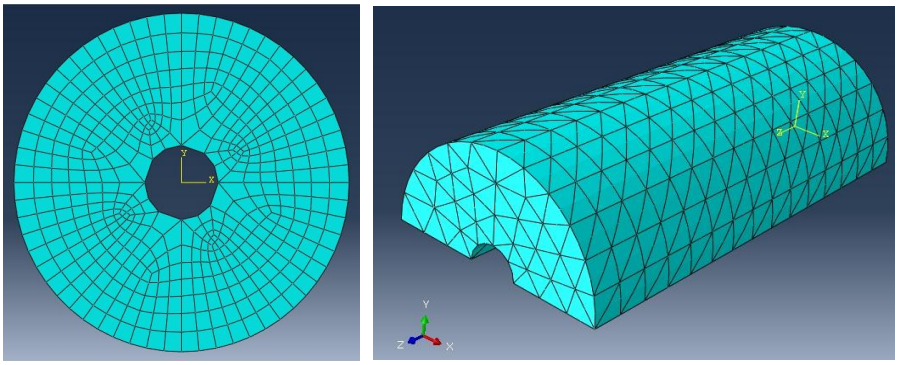
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]



شکل ۷. تنش‌های محوری و جانبی و اعمال شرایط مرزی



شکل ۸. فشار سیال داخل گمانه



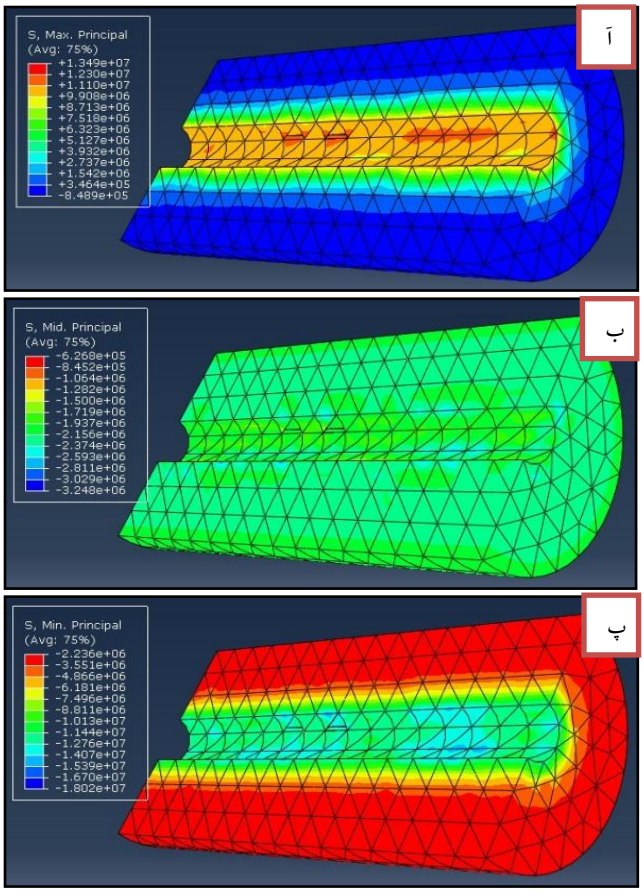
شکل ۹. مش‌بندی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی

۵. نتایج مدل‌سازی

در این تحقیق مدل‌های عددی ساخته شده تحت شرایط تنش‌هایی همانند شرایط آزمایشگاهی قرار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی‌ها در شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

شکل ۱۰ وضعیت تنش‌های اصلی در آغاز شکست را برای نمونهٔ ۱ توصیف می‌کند. شکل ۱۰ آ نشان‌دهندهٔ وضعیت تنش اصلی بیشینه در لحظهٔ آغاز شکست است. چنان‌که در شکل مشخص است بیشینه تنش اصلی در محل آغاز ترک ۱۲/۳ مگاپاسکال و از نوع کششی و در محل جدارهٔ خارجی نمونه ۰/۸۵ مگاپاسکال و از نوع فشاری است (علامت منفی مربوط به حالت فشاری و علامت مثبت مربوط به حالت کششی است). شکل ۱۰ ب نشان‌دهندهٔ وضعیت تنش اصلی میانه در لحظهٔ آغاز شکست است. با توجه به شکل، تنش اصلی میانه در محل آغاز ترک ۱/۵ مگاپاسکال و از نوع فشاری و در محل دیوارهٔ خارجی نمونهٔ ۱/۷ مگاپاسکال و از نوع فشاری است. شکل ۱۰ پ، هم وضعیت تنش اصلی کمینه در لحظهٔ آغاز شکست را نشان می‌دهد.

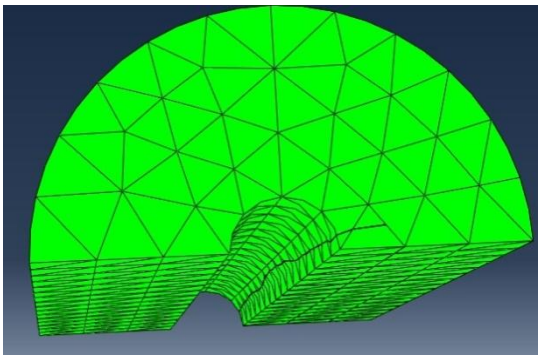


شکل ۱۰. وضعیت تنش‌های اصلی در نمونهٔ ۱

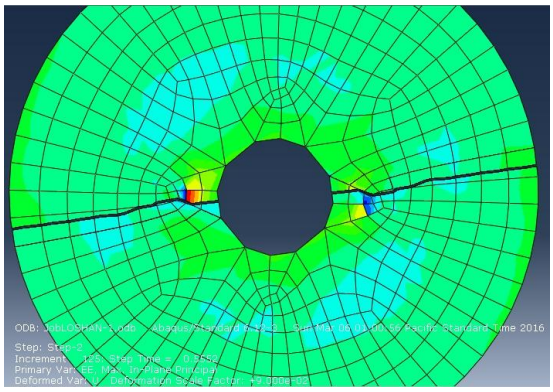
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

این تنش در جدارهٔ داخلی نمونه حدود ۱۱/٤ مگاپاسکال و از نوع فشاری و در محل دیوارهٔ خارجی نمونه ۲/۲۳ مگاپاسکال و از نوع فشاری است.

در شکل ۱۱ راستای گسترش ترک برای نمونهٔ ۱ در مدل سه‌بعدی مشخص است. هم‌چنین شکل ۱۲ ترک به‌وجود آمده را در مدل دوبعدی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. راستای گسترش ترک در نمونهٔ ۱



شکل ۱۲. ترک بوجود آمده در مدل دوبعدی نمونهٔ ۱

هم‌چنین در جدول ٤ فشار شکست در مدل‌های ساخته شده آورده شده است. فشار شکست‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی، اختلافی در حدود ۱۰ درصد با آن‌چه از مدل‌سازی آزمایشگاهی به‌دست آمده، دارد.

تحلیل نتایج

در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی مشخص شد که شکست هیدرولیکی از لحاظ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

هندسهٔ شکست به‌گونه‌ای است که راستای شکستگی‌ها، اغلب در راستای قائم (راستای محور نمونه) است. با توجه به این‌که در این مدل‌سازی‌ها، تنش‌محوری اعمال شده برابر یا بیش‌تر از تنش جانبی اعمالی است، می‌توان نتیجه گرفت که راستای شکستگی‌ها همواره موازی تنش اصلی بیشینه و عمود بر تنش افقی است. این موضوع با تئوری‌های ارائه شدهٔ هوبرت و ویلیس کاملاً هم‌خوانی دارد. هم‌چنین بر اساس معیار گریفیث، در سنگ‌های یک‌نواخت و همسانگرد، در صورتی که محور گمانه موازی یکی از تنش‌های اصلی باشد، شکستگی‌های حاصل از شکست هیدرولیکی، موازی با تنش اصلی بیشینه و عمود بر تنش افقی گسترش می‌یابد.

جدول٤. نتایج مدل‌سازی عددی

شمارهٔ آزمایش	تنش محوری (مگاپاسکال)	تنش جانبی (مگاپاسکال)	فشار شکست به‌دست آمده از مدل‌سازی آزمایشگاهی (مگاپاسکال)	فشار شکست به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی (مگاپاسکال)
١	٢/٢٦	٢	١٤/٥٨	١٣/٨
٢	٢/٥	٢/٥	١٥/٧	١٥
٣	٥	٠	١١/١٦	٩/٩
٤	٧	٠	١١/٣٩	٩/٩

مقادیر به‌دست آمده برای فشار شکست در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که با افزایش تنش جانبی، فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. ولی با افزایش تنش محوری فشار لازم برای آغاز شکست تغییر کمی می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فشار شکست حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی اغلب متأثر از تنش جانبی است و تنش محوری بر آن تأثیر کمی دارد. علت افزایش فشار شکست بر اثر افزایش تنش جانبی را با استفاده از توزیع تنش در استوانهٔ توخالی نیز می‌توان توضیح داد. نمونهٔ استوانه‌ی توخالی که دارای شعاع داخلی R_i، شعاع خارجی R_o، فشار داخلی یک‌نواخت P_i، فشار جانبی P_o و نیروی محوری P است در شکل ١٣ نشان داده شده است. با استفاده از مختصات استوانه‌ای (r,Θ,z)، تنش‌های σ_r و σ_Θ در هر نقطه با فاصله شعاعی(r) از مرکز نمونه از روابط(٣) و (٤) محاسبه می‌شوند [٢٠].

$$\sigma_r = \frac{P_O R_O^2 - P_i R_i^2}{R_O^2 - R_i^2} - \frac{(P_O - P_i) R_i^2 R_O^2}{r^2 (R_O^2 - R_i^2)} \qquad (٣)$$

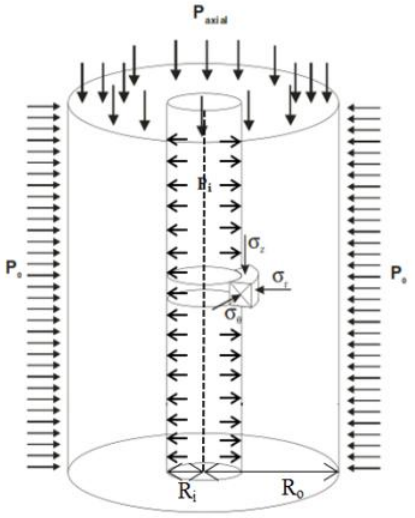
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

$$\sigma_\theta = \frac{P_O R_O^2 - P_i R_i^2}{R_O^2 - R_i^2} + \frac{(P_O - P_i) R_i^2 R_O^2}{r^2 (R_O^2 - R_i^2)} \quad (٤)$$

و برای شرایط حاضر تنش محوری σ_z از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\sigma_Z = \frac{F}{\pi (R_O^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_O^2 - R_i^2} \quad (۵)$$

با توجه به رابطهٔ (٤) با افزایش تنش جانبی (P_O) تنش مماسی (σ_Θ) نیز افزایش یافته و بیش‌تر به‌حالت فشاری تمایل دارد، پس برای این‌که تنش مماسی در جدارهٔ داخلی استوانه به حالت کششی تبدیل شده و جداره بشکند، نیاز به فشار سیال داخل گمانهٔ بیش‌تری است و چنان‌که مشاهده می‌شود تنش محوری (σ_z) بر تنش مماسی و در نتیجه فشار شکست تأثیری ندارد.



شکل ۱۳. نمایی از یک نمونه‌ی استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی،تنش جانبی و تنش محوری [۲۱]

در مدل‌سازی‌های عددی برای آغاز و رشد ترک از روش المان محدود توسعه یافته و بر اساس معیار آسیب تنش اصلی بیشینه (MAXPS) استفاده شد. با توجه به توزیع تنش در استوانهٔ توخالی، جدارهٔ داخلی نمونه استوانه‌ای تحت تنش کششی قرار میگیرد. بنابراین مقدار MAXPS برابر با مقدار مقاومت کششی قرار داده شد.

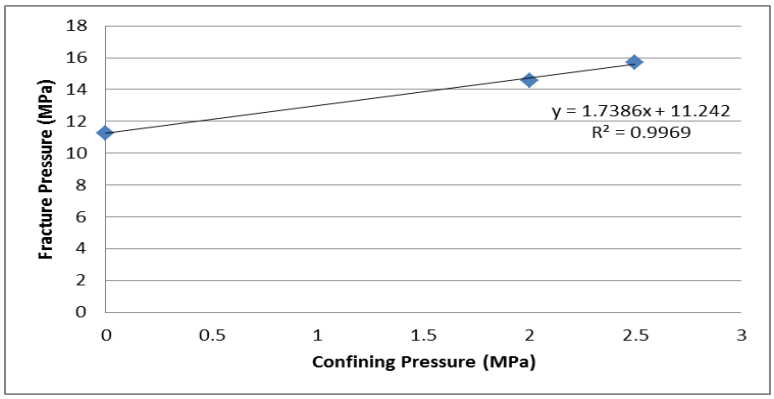
شکل ١٤ نشان‌دهندهٔ ارتباط بین فشار لازم برای شروع شکست هیدرولیکی و فشار محصور کننده برای ماسه سنگ‌های لوشان را نشان می‌دهد. چنان‌که در نمودار مشخص است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

فشار شکست و فشار محصور کننده با هم یک رابطهٔ خطی داشته و با افزایش فشار محصور کننده، فشار لازم برای شروع شکست هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد (رابطه ٦).

$$P_f = 1.7386\ \sigma_3 + 11.242 \qquad (٦)$$

در این رابطه: P_f: فشار شکست بر حسب مگاپاسکال و σ_3: فشار محصور کننده بر حسب مگاپاسکال است.



شکل١٤. رابطهٔ بین فشار شکست و فشار محصورکننده

از جمله تحقیقاتی که به بررسی رابطهٔ بین فشار شکست و فشار محصورکننده پرداخته است، می‌توان به پژوهش‌های ساتوه و یاماگوچی در سال ٢٠٠٩ و قنبری و شمس‌راد در سال ٢٠١٥ اشاره کرد [٧]، [١٤]. در این دو این پژوهش رابطه‌ای که ارائه شده است رابطه‌ای خطی است که با رابطه به‌دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد هر چند ضریب زاویه و عرض از مبدا روابط محققان قبلی با رابطهٔ این تحقیق تفاوت دارد و دلیل آن تفاوت در خصوصیات نمونه‌های مورد آزمایش است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از سلول سه‌محوره هوک تغییر یافته برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از کارآیی مناسب این سلول برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی است. این سلول در اغلب آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ موجود بوده است و به‌کمک آن می‌توان قبل از انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در سایت، آن را در آزمایشگاه مدل‌سازی کرد. مهم‌ترین نتایج تحقیق عبارتند از:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

۱. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی دارد. در تمام آزمایش‌هاو مدل‌سازی‌ها، شکستگی‌های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است. این موضوع با تئوری‌های ارائه شده در این زمینه هم‌خوانی دارد.

۲. با افزایش تنش جانبی، فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. ولی با تغییر تنش محوری فشار شکست تغییر کمی می‌کند. این نتیجه‌گیری را با توجه به توزیع تنش در نمونه‌های استوانهٔ تو خالی نیز می‌توان توضیح داد.

۳. در مدل‌سازی عددی این تحقیق بر خلاف دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه، مسیر و مختصات ترک بدون هیچ پیش داوری و تعیین قبلی برای مدل‌های بدون ترک بررسی شد. نتایج نشان داد که در اغلب موارد ترک از مرکز نمونه آغاز شده و به‌سمت دو سر نمونه گسترش می‌یابد و راستای گسترش ترک در راستای محور گمانهٔ و عمود بر تنش جانبی است. این موضوع با آن‌چه در مدل‌سازی آزمایشگاهی مشاهده شد کاملا مطابقت دارد.

منابع

1. Clarck J. B., "A Hydraulic process for increasing the productivity of wells", Petroleum Division Fall Meeting, Dallas, Texas (1949).
2. Haimson B. C., Fairhurst C., "Initiation and extension of hydraulic fracturing in rocks", Soc. Petrol. Engrs. J. Sept. (1967) 310-318.
3. Hubbert M. K., Willis D. G., "Mechanics of hydraulic fracturing", Trans. AIME 210 (1957) 153-166.
4. Ribeiro P. R., de Oliveira e Sousa, J. L. A., Fernandes P. D., Caldas Leite V. L., "Hydraulic fracturing physical simulation", 15th Brazilian congress of mechanical engineering, November 22-26, Sao Paulo (1999).
5. Song I., Suh M., Won K. S., Haimson B., "A laboratory study of hydraulic fracturing breakdown pressure in tablerock sandstone", *Geosciences Journal* Vol. 5, No. 3 (2001) 263-271.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

6. De pater C. J., Beugelsdijk L. J. L., "Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock", presented at Alaska Rocks, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (2005).
7. Satoh H. S., Yamaguchi Y., "Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow sylinderical specimens", The 1st International Symposium on Rockfill Dams (2009).
8. Carvalho C., Bendezu A. L., Oliveiraa F., Roehl D., Sousa Jr, C., "Finite element modeling of hydroaulic fracturing in vertical wells", Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Vol XXIX (2012) 8571-8578.
9. Shimizu H., Murata S., IshidaT., "The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution", J. Rock Mech. Min. Sci. No. 48 (2011) 712-727.
10. Chen Z., "Implementation of the XFEM for Hydraulic Fracture Problems", 13th International Conference on Fracture, June 16-21, Beijing, China (2013).
11. Keshavarz A., Badalyan A., Johnson R., Bedrikovetsky P., "Productivity enhancement by stimulation of natural fractures around a hydraulic fracture using micro-sized proppant placement", J. Nat. Gas Sci. Eng. No. 33 (2016) 1010-1024.
12. Cheng W., Jin Y., Chen M., "Reactivation mechanism of natural fractures by hydraulic fracturing in naturally fractured shale reservoirs", J. Nat. Gas Sci. Eng., Vol. 27 (2015) 1357-1365.
13. Zhao Q., Lisjak A., Mahabadi O., Liu Q., Grasselli G., "Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6 (2014) 574-581.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]

14. Ghanbari A., Rad S. S., "Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams", Acta Geotechnica, Vol.10, No. 2 (2015) 243-254.
15. ISRM, "Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties", Int J Rock Mech Min Sci, Vol. 16 (1979) 141-156.
16. ISRM, "Suggested methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr (1979) 99-103.
17. ISRM, "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, Vol.15 (1978b) 99-103.
18. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T., "ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 47 (2014) 267-274.
19. Abaqus 6.10 documentation, abaqus theory manual.
20. Hoek E., Franklin J. A., "A simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock", Imperial College of Science and Technology, University of London (1967).
21. Elkadi A., Van Mier J., "Scaled hollow-cylinder tests for studying size effect in fracture processes of concrete", fracture mechanics of concrete structures (2004) 229-236.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.429]