

## مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار المان محدود اباکوس و تعیین عوامل موثر بر فشار شروع شکست

رضا عشقی قهدریجانی<sup>۱\*</sup>، رضا شیرین آبادی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی نفت، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی نفت و معدن، مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱

(\* نویسنده مسئول: [rezaeshgi54@gmail.com](mailto:rezaeshgi54@gmail.com))

### چکیده

شکست هیدرولیکی به عنوان روشی برای تحریک مخازن نفتی به عوامل مختلفی بستگی دارد. از آنجا که عملیات شکست هیدرولیکی بسیار پرهزینه می باشد پیش بینی چگونگی پیشرفت عملیات و همچنین پیش بینی فشار مورد نیاز شکست برای تعیین پمپ مناسب قبل از عملیات در سایت بسیار حائز اهمیت می باشد. در پژوهش حاضر به مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی در ۴ حالت مختلف در نرم افزار المان محدود اباکوس و مقایسه نتایج حاصل با مدل سازی آزمایشگاهی آن به منظور یافتن فشار شکست پرداخته شده است. سپس تحلیل حساسیت با استفاده از نرم افزار اباکوس به منظور بررسی تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی فشار شکست انجام شد. این پارامترهای ورودی که در واقع داده های چاه می باشند شامل مدول الاستیسیته، تنش جانبی، تنش محوری، مقاومت کششی و نسبت پواسون می باشند. نتایج نشان می دهد که تنش جانبی و مقاومت کششی بیشترین تأثیر را بر روی فشار شکست دارند و تاثیر پارامترهایی مثل تنش محوری و مدول یانگ در تعیین فشار شکست بسیار ناچیز است. در این تحقیق مدل سازی انجام شده مشابه مدل های آزمایشگاهی می باشد و نمونه ها به صورت بکر و بدون هیچ ترک اولیه طراحی شده اند. نتایج حاصل از مدل سازی عددی اختلاف کمی با مدل سازی آزمایشگاهی داشتند، این اختلاف در آزمایش های ۱ و ۴ کمتر از ۱ درصد، در آزمایش ۲ این اختلاف ۱۳ و در آزمایش ۳ این اختلاف ۱۵ درصد محاسبه شده است. جهت ترک های ایجاد شده با آنچه از قبل در موارد تئوری بیان شده بود و آنچه در مدل سازی آزمایشگاهی حاصل شد هم خوانی داشت. ترک های حاصل در راستای محور گمانه و عمود بر تنش جانبی به وجود آمدند. با توجه به نتایج حاصل می توان از مدل سازی عددی جهت توسعه عملیات شکست هیدرولیکی استفاده کرد.

شکست هیدرولیکی، مدل سازی عددی، نرم افزار اباکوس، آنالیز حساسیت.

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

مطالعه‌ای توسط زنگ و همکاران صورت گرفت در این مقاله یک مدل المان محدود سه‌بعدی بر اساس نرم‌افزار اجزای محدود اباکوس ایجاد شد. فرآیند شکستگی یک چاه افقی در میدان داکینگ، چین با مدل شبیه‌سازی شد. داده‌های میدانی میدان نفتی داکینگ در محاسبات عددی استفاده شد فشار ته چاهی به عنوان خروجی مستقیم شبیه‌سازی با داده‌های مربوطه از اندازه‌گیری‌های میدانی منطبق است. بدین شکل اعتبار مدل‌سازی تایید شده است. سپس اثرات چندین پارامتر بر ویژگی شکست با مدل مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱].

مطالعه‌ای توسط روحانی و فرخنده تحت عنوان پارامترهای مؤثر بر فشار شکست در آزمون شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی به روش تفاضل محدود انجام شد در این مقاله به مدل‌سازی شکست هیدرولیکی با استفاده از شبکه تفاضل محدود پرداخته می‌شود. مدل‌سازی به صورت دوبعدی با فرض کرنش مسطح می‌باشد. هدف از مدل‌سازی بررسی بر روی پارامترهای مؤثر بر فشار شکست می‌باشد، پارامترهایی که در روابط کلاسیک وجود ندارند اما مؤثر بر فشار شکست هستند [۲].

مطالعه‌ای توسط پیرهادی و همکاران انجام شد در این تحقیق با در نظر گرفتن ژئومکانیک و معادله تعادل جفت شده، معادله پیوستگی، قانون هوک، معادله سازگاری، قانون دارسی و رابطه حرارتی، معادله ترموپوروالاستیک استخراج شد. یک روش المان محدود برای اجرای مدل‌های غیرخطی ترمو-پور-الاستیک کاملاً جفت شده طراحی شده است. مدل المان محدود با آنالوگ کردن آن به راه حل‌های تحلیلی موجود برای مشکلات گمانه چاه ترمو-پور-الاستیک در شیل تایید شد [۳].

مطالعه‌ای توسط شریعت زاده و حسینی تحت عنوان اثر تنش حرارتی بر فشار شکست و تنش‌های اصلی در فرآیند ایجاد شکست هیدرولیکی در محیط سنگی انجام شد. در این تحقیق چاه نفت و محیط اطراف آن که در یک مخزن کربنات در مناطق نفت خیز جنوب ایران حفر شده در دو حالت بدون ایجاد تنش حرارتی و با در نظر گرفتن تنش حرارتی از طریق نرم‌افزار اباکوس مدل‌سازی می‌شود و اثر تنش حرارتی بر فشار شکست و تنش‌های اصلی بررسی می‌شود. در نهایت پس از حل مدل، فشار شکست به دست

می‌آید و اثر تنش حرارتی بر فشار شکست بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با ایجاد تنش حرارتی (ناشی از کاهش دما) می‌توان فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی را کاهش داد [۴]. مطالعه‌ای توسط ملاعلی و یزدانی تحت عنوان مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن نفتی با اجزا محدود توسعه یافته انجام شد. در این نوشتار پدیده شکست هیدرولیکی با روش XFEM مدل‌سازی شده است خروجی‌های بدست آمده از برنامه رایانه ای نوشته شده با مدل KGD صحت سنجی شده است نتایج نشان می‌دهد که مقدار فشار گمانه با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد در حالی که بازشدگی ترک در محل گمانه افزایش پیدا می‌کند [۵].

مطالعه‌ای توسط آریا و حسینی تحت عنوان مدل‌سازی عددی برای تعیین عوامل مؤثر بر فشار شروع شکست در عملیات شکست هیدرولیکی انجام شد. در این تحقیق، توسط نرم‌افزار اباکوس مدل‌سازی‌های عددی در ۱۰ حالت مختلف انجام شده و سپس اثر هر یک از این پارامترهای ورودی، روی فشار شکست هیدرولیکی با انجام تحلیل حساسیت بررسی شده است. یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر فشار شکست هیدرولیکی اختلاف تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشد به نحوی که هر چه این اختلاف کمتر باشد، فشار شکست بیشتر می‌گردد [۶].

مطالعه‌ای توسط شیرین آبادی و موسوی انجام شد در این تحقیق معادلات Kirsch، Salencon و مدل‌سازی عددی به منظور تحلیل تنش در مجاورت چاه انجام شده است. در ابتدا، کد اجزاء مجزا سه‌بعدی (3DEC) برای ساخت مدل عددی با استفاده از رفتار الاستیک استفاده شد. سپس نتایج با معادلات Kirsch مقایسه شد. پس از آن، مدل عددی با توجه به رفتار الاستوپلاستیک ساخته شد. همچنین نتایج با معادلات Salencon مقایسه شد و اثر شکستگی بر روی گمانه چاه تحت فشار سه‌محوری توسط 3DEC بررسی شد [۷].

مطالعه‌ای توسط عطاری و گلشنی تحت عنوان مدل‌سازی عددی پدیده شکست هیدرولیکی با در نظر گرفتن درزه‌های از پیش موجود انجام شد. با استفاده از مدل‌سازی عددی به وسیله نرم‌افزار المان مجزاء PFC از شرکت آیتسکا به صورت دو بعدی بر روی نمونه سنگ‌های پوچئون گرانیات با رفتار شکننده و مقاومت

نتایج مدل سازی آزمایشگاهی و قابل قبول حاصل گشت. پژوهش حاضر از این لحاظ حائز اهمیت می باشد که می توان درستی نتایج حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه را با آباکوس بررسی نمود و قبل از انجام آزمایش در سایت با شبیه سازی آن با استفاده از نرم افزار آباکوس و بدست آوردن فشار شکست بدون نیاز به انجام آزمایش عملی به نتایج قابل قبول رسید و پمپ مناسب عملیات را انتخاب نمود.

## ۲- مدل سازی آزمایشگاهی

### ۲-۱- نمونه های مورد مطالعه

نمونه های مورد مطالعه که جنس آن ها کربناته می باشند از یکی از چاه های میدان نفتی اهواز واقع در جنوب غرب ایران که جهت تولید نفت از دامنه ی جنوبی مخزن بنگستان حفر گردیده، تهیه شده اند. ویژگی های این نمونه سنگ ها در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱: ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ های

مورد مطالعه [۱۰]

مقدار عددی	مشخصه ژئومکانیکی
۲۰/۹۱	دانسیته ( $KN/m^3$ )
۰/۸۱	تخلخل موثر (%)
	مقاومت فشاری
۹۴/۲۷	تک محوری ( $MPa$ )
۴/۳	مقاومت کششی ( $MPa$ )
۳۲/۴۳	مدول الاستیسیته ( $GPa$ )
۰/۲۹۴	ضریب پواسون
۲۰	انرژی شکست ( $N/m$ )

### ۲-۲- تجهیزات مورد استفاده در مدل سازی

#### آزمایشگاهی

دستگاه مورد استفاده برای مدل سازی شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه شامل چهار بخش مجزا است. شامل سلول آزمایش، جک اعمال بار محوری، پمپ اعمال کننده ی فشار جانبی و پمپ اعمال کننده ی فشار داخل گمانه که نام کلی آن سلول سه محوری هوک است.

بالا انجام می شود با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که با افزایش نرخ اعمال بار گذاری، نمونه در زمان کمتری به فشار شکست رسیده و شکسته می شود ولی مقدار فشار شکست افزایش می یابد. هم چنین 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 [۸].

مطالعه ای توسط فحول و شیرین آبادی انجام شد در این تحقیق از گزارش های فنی و داده های چاه نگاری به همراه نرم افزار Interactive Petrophysics برای تعیین تنش های درجا، فشار حفره ای و پارامترهای الاستیک سنگ اطراف چاه در سازند آسماری در جنوب غربی ایران استفاده شد. یک مدل سه بعدی در نرم افزار اجزای محدود کامسول به عنوان کوپلینگ یک طرفه مخزن سنگ-سیال برای تعیین حجم سنگ شکسته با استفاده از معیار شکست سه بعدی موهر-کولمب در مقادیر مختلف ضریب بایوت ایجاد شد. سپس همبستگی بین پایداری دیوار و حجم سنگ شکسته با مقایسه اندازه بیت و لاگ های کالیپر با مقادیر تخمین زده شده توسط نرم افزار ارزیابی شد [۹].

مطالعه ای توسط اکرمی و حسینی تحت عنوان مدل سازی آزمایشگاهی شکستگی هیدرولیکی انجام شد در این تحقیق به منظور مدل سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، بر روی سلول سه محوری هوک تغییراتی داده شده است، تا برای مدل سازی شکست هیدرولیکی مناسب سازی گردد. در تمام آزمایش ها شکستگی های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است. با افزایش تنش جانبی فشار شکست گمانه نیز افزایش می یابد، ولی با تغییر تنش عمودی فشار شکست تغییر چندانی نمی کند [۱۰].

مروری بر مطالعات گذشته نشان می دهد اکثر کارهایی که محققین قبلی در محیط آزمایشگاه و به صورت عملی انجام داده اند با استفاده از سلول سه محوری است. در پژوهش حاضر با بهره گیری از داده های حاصل از آزمایشی که توسط اکرمی و حسینی در آزمایشگاه صورت گرفت مدل سازی عددی در آباکوس انجام شد و با نتایج حاصل از آن بررسی شد که نتایج مشابه

جدول ۲: شرایط تنش‌های اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای

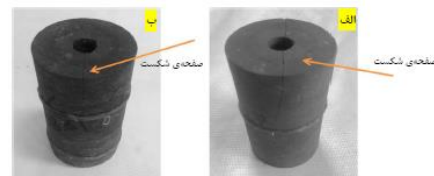
توخالی [۱۰]				
شماره آزمایش	۴	۳	۲	۱
تنش محوری (MPa)	۱۳/۵	۱۹/۲	۱۷	۱۰/۵
تنش جانبی (MPa)	۳	۶	۵	۳

شکستگی‌های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است. با افزایش تنش جانبی فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. ولی با تغییر تنش محوری فشار شکست تغییر چندانی نمی‌کند [۱۰].

جدول ۳: فشار شکست‌های بدست آمده از آزمایش‌های

شکست هیدرولیکی [۱۰]				
شماره آزمایش	۴	۳	۲	۱
تنش محوری (MPa)	۱۳/۵	۱۹/۲	۱۷	۱۰/۵
تنش جانبی (MPa)	۳	۶	۵	۳
فشار شکست (MPa)	۸/۴۱	۱۶/۴۹	۱۵	۸/۴۳

۲-۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی



شکل ۱: الف) نمای جانبی نمونه‌ی اول پس از شکست (ب) نمای جانبی نمونه‌ی دوم پس از شکست

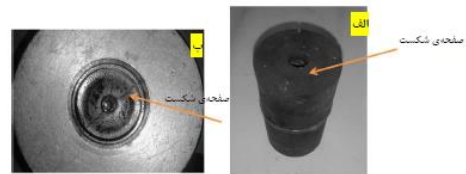
۳- مدل‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار

### اباکوس

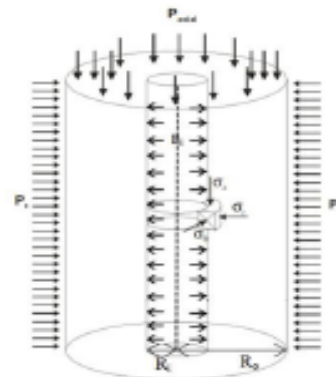
برخی نرم‌افزارها وجود دارند که تنها در شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی استفاده می‌شوند. نرم‌افزارهای دیگری نیز مانند اباکوس وجود دارند که بیشتر برای رشته‌های مکانیک و عمران طراحی شده‌اند اما برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم‌افزار اباکوس در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هیبیت (Hibbitt David) و همکارانش ایجاد شد. برای انجام مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی یک استوانه تو خالی با قطر خارجی ۵۴/۷ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۸ میلی‌متر طراحی شده است که دارای یک حفره مرکزی به قطر ۱۲ میلی‌متر می‌باشد که مشابه ابعاد مدل آزمایشگاهی است. مدل ساخته شده در شکل ۴ مشخص شده است. پارامترهای ورودی به مدل شامل تنش جانبی، تنش محوری، مقاومت کششی، نسبت پواسون و مدول یانگ می‌باشد. روش کار به این صورت است که در ابتدا برای ۴ داده که مربوط به مدل‌سازی آزمایشگاهی می‌باشد، فشار شکست به دست آمده و در ادامه با انجام تحلیل حساسیت تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر فشار شکست مشخص می‌گردد.

### ۱-۳- هندسه مدل

برای مدل‌سازی این تحقیق در لیاکوس یک مدل سه‌بعدی به شکل استوانه با همان ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش در آزمایشگاه ایجاد شده است. در این مدل‌سازی نمونه‌ها مانند نمونه‌های مورد



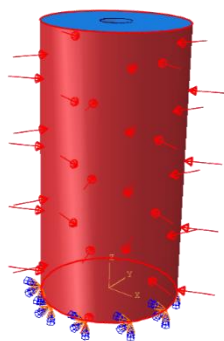
شکل ۲: الف) نمای جانبی نمونه‌ی سوم پس از شکست (ب) نمونه‌ی چهارم پس از شکست درون سلول



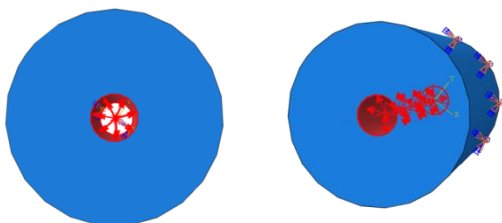
شکل ۳: نمایی از یک نمونه‌ی استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی، تنش جانبی و تنش محوری

با توجه به نتایج حاصل و مقادیر فشار شکست و عکس‌های شکستگی‌های ایجاد شده مشاهده شد در تمام آزمایش‌ها

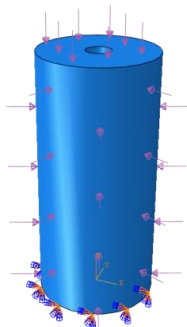
به همان شکل مدل سازی صورت گرفت. تنش های اعمالی به نمونه که شامل تنش جانبی، تنش محوری و فشار سیال داخل گمانه می شد تعریف گردید و استوانه از یک سو که قسمت پایینی آن می باشد بدون حرکت و ثابت در نظر گرفته شد که در شکل های ۵ تا ۸ قابل مشاهده هستند. فشار داخل گمانه نقش فشار سیال تزریقی در حین عملیات شکست هیدرولیکی را ایفا می کند به همین جهت این فشار در حین آزمایش به صورت خطی افزایش پیدا می کند تا به فشار شکست مدنظر برسد یعنی با گذشت زمان افزایش فشار در گمانه رخ می دهد.



شکل ۷: اعمال تنش جانبی بر نمونه



شکل ۶: اعمال فشار سیال داخل گمانه



شکل ۸: اعمال تنش های جانبی و محوری

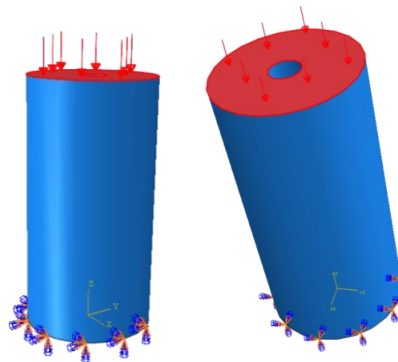
آزمایش به صورت بکر و بدون شکست اولیه طراحی شده اند و سپس محیط گسترش ترک به روش المان محدود توسعه یافته در نمونه ها تعریف شد و به نمونه اجازه ی رشد ترک داده شد و مکان خاصی برای گسترش ترک در نظر گرفته نشده و رشد ترک در آن بدون هیچ گونه پیش داوری از قبل مدل سازی شد. در مدل سازی عددی برای آغاز و رشد ترک از روش المان محدود توسعه یافته و براساس معیار آسیب تنش اصلی بیشینه (MAXPS) استفاده شد و مقدار MAXPS برابر با مقدار مقاومت کششی قرار داده شد. پس از انجام این کار تنش های اعمالی به نمونه که شامل تنش جانبی، تنش محوری و فشار سیال داخل گمانه است تعریف گردید که در شکل های ۵ تا ۸ قابل مشاهده هستند.



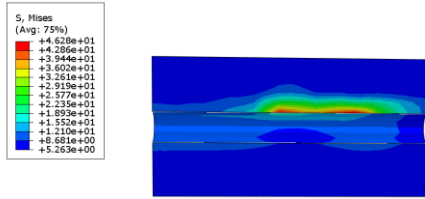
شکل ۴: هندسه مدل سه بعدی ساخته شده

## ۲-۳- شرایط بارگذاری و شرایط مرزی

در این جا با توجه به همان شرایط مرزی و اعمال تنش و نیروهایی که در مدل سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی بر روی استوانه های توخالی به وسیله سلول سه محوری هوک اعمال شد



شکل ۵: اعمال تنش محوری بر نمونه



شکل ۱۱: نمای داخلی استوانه در شروع شکست در پایان آزمایش ۱

شکل ۱۱: نمای داخلی استوانه در شروع شکست در پایان آزمایش ۱

#### ۴- تحلیل حساسیت

به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترها بر فشار شروع شکست هیدرولیکی، تحلیل حساسیت بر روی پارامترها انجام شده است. روش کار در این مرحله بدین صورت است که در هر مرحله یک پارامتر ورودی تغییر می‌کند و بقیه ی پارامترهای ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شوند و تغییرات فشار شکست حاصل در هر مدل‌سازی بررسی می‌گردد.

##### ۴-۱- تحلیل حساسیت روی مدول یانگ

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی مدول یانگ در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود اثر مدول یانگ بر روی فشار شکست هیدرولیکی بسیار ناچیز و قابل اغماض است اما نتیجه گیری کلی از آن بدین شکل است که با افزایش مدول یانگ فشار شکست افزایش می‌یابد اما این مقدار افزایش بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. نمودار تغییرات فشار شکست با توجه به تغییرات مدول یانگ در شکل ۱۲ آورده شده است.

جدول ۴: نتایج تحلیل حساسیت روی مدول یانگ

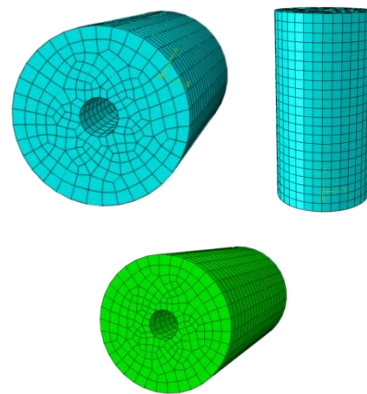
شماره آزمایش	۱	۲	۳
تنش محوری	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵
تنش جانبی	۳	۳	۳
نسبت پواسون	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴
مدول یانگ	۳۲/۴۳	۱۲	۰/۱
مقاومت کششی	۴/۳	۴/۳	۴/۳
گام زمانی	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸
فشار شکست	۸/۵	۸/۵	۸

#### ۳-۳- مش بندی نمونه

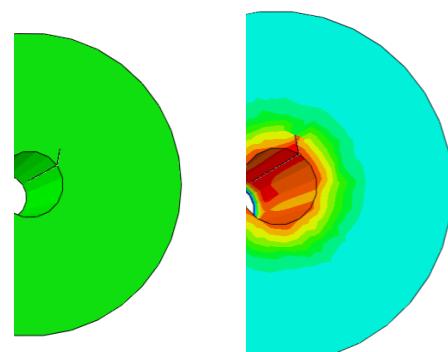
در اباکوس می‌توان انواع مش بندی و تعداد مختلف را بررسی نمود. به منظور یافتن نزدیکترین جواب باید انواع اشکال مش بندی و تعداد مختلف آنرا بررسی نمود و بهترین را انتخاب کرد. در این مدل‌سازی ما مش بندی را مطابق شکل ۹ اعمال نمودیم.

#### ۳-۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در این تحقیق مدل‌های ایجاد شده دارای همان ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی بودند و تحت همان تنش‌ها قرار گرفتند. نتایج حاصل در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. راستای گسترش ترک در مدل سه بعدی ایجاد شده در شکل ۱۰ نمایان است. همان طور که مشاهده می‌شود راستای گسترش ترک در راستای محور گمانه و عمود بر تنش جانبی است و در راستای قائم می‌باشد.



شکل ۹: مش بندی مدل سه بعدی مورد آزمایش



شکل ۱۰: راستای شکستگی ایجاد شده در داخل نمونه

شکل ۱۳: نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب نسبت

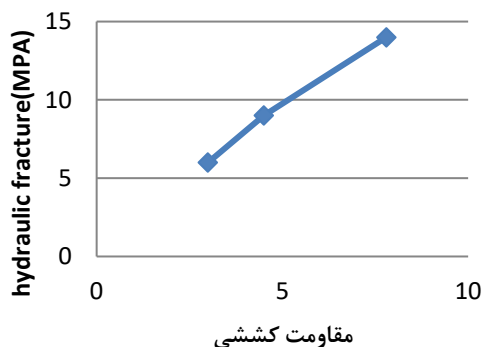
پواسون

#### ۴-۳- تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش مقاومت کششی باعث افزایش فشار شکست می‌شود. روند تغییرات فشار شکست بر حسب مقاومت کششی به صورت خطی می‌باشد. نمودار تغییرات فشار شکست بر حسب مقاومت کششی در شکل ۱۴ آورده شده است.

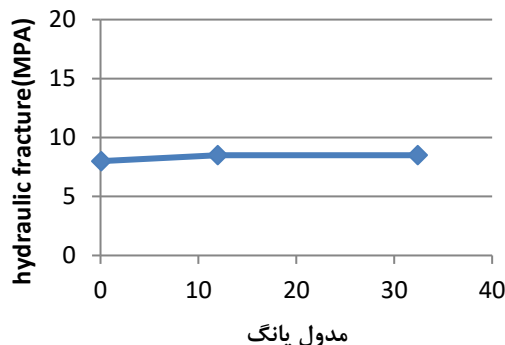
جدول ۶: نتایج تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی

شماره آزمایش	۱	۲	۳
تنش محوری	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵
تنش جانبی	۳	۳	۳
نسبت پواسون	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴
مدول یانگ	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳
مقاومت کششی	۳	۴/۵	۷/۸
گام زمانی	۰/۶	۰/۹	۱/۴
فشار شکست	۶	۹	۱۴



#### ۴-۴- تحلیل حساسیت روی تنش محوری

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی تنش محوری در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات تنش محوری تأثیری بر روی فشار شکست ندارد. نمودار تغییرات فشار شکست با توجه به تغییرات تنش محوری در شکل ۱۵ آورده شده است.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مدول

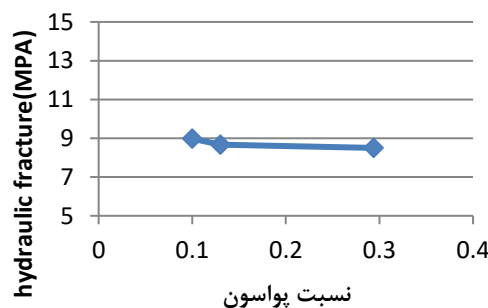
یانگ

#### ۴-۲- تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات نسبت پواسون تأثیر بسیار کمی بر روی فشار شکست دارد و با کاهش نسبت پواسون فشار شکست افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات فشار شکست بر حسب نسبت پواسون در شکل ۱۳ آورده شده است.

جدول ۵: نتایج تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون

شماره آزمایش	۱	۲	۳
تنش محوری	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵
تنش جانبی	۳	۳	۳
نسبت پواسون	۰/۲۹۴	۰/۱۳	۰/۱
مدول یانگ	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳
مقاومت کششی	۴/۳	۴/۳	۴/۳
گام زمانی	۰/۱۸۵	۰/۱۸۶۶۳	۰/۱۸۹۷۶
فشار شکست	۸/۵	۸/۶۶۳	۸/۹۷۶



شکل ۱۴: نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مقاومت

کششی

#### ۴-۵- تحلیل حساسیت روی تنش جانبی

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی تنش جانبی در جدول ۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان فشار شکست متأثر از میزان تنش جانبی می‌باشد. با افزایش تنش جانبی، فشار شکست افزایش پیدا می‌کند. تغییرات فشار شکست بر حسب تغییرات تنش جانبی (در حالتی که تنش محوری ثابت است) در شکل ۱۶ آورده شده است.

جدول ۸: نتایج تحلیل حساسیت روی تنش جانبی

شماره آزمایش	۱	۲	۳
تنش محوری	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵
تنش جانبی	۶	۹	۱۱
نسبت پواسون	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴
مدول یانگ	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳
مقاومت کششی	۴/۳	۴/۳	۴/۳
گام زمانی	۱/۴	۱/۶۵	۱/۸
فشار شکست	۱۴	۱۶/۵	۱۸

#### ۵- تحلیل نتایج حاصل

در مدل‌سازی عددی صورت گرفته در رابطه با جهت شکستگی‌های ایجاد شده همان نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی رخ داد و مشاهده شد که راستای شکستگی‌ها در راستای قائم می‌باشد. با توجه به این که در این مدل‌سازی‌ها تنش محوری اعمال شده در هر چهار آزمایش بیش از تنش جانبی می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که راستای شکستگی‌ها همواره موازی با تنش اصلی بیشینه و عمود بر تنش افقی می‌باشد. این مسئله با تئوری‌های پیشین (هوبرت ویلیس) هم خوانی دارد.

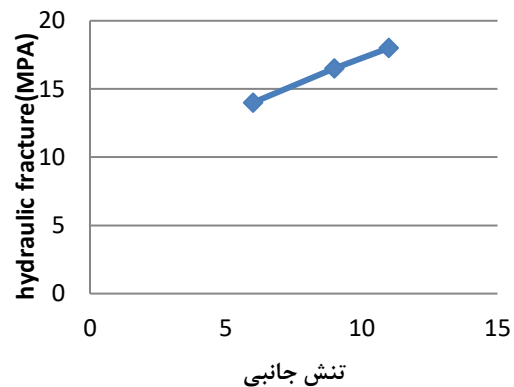
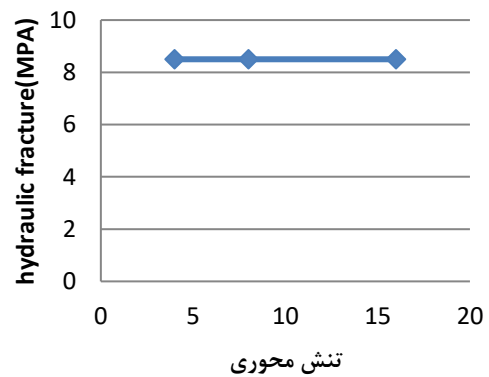
جدول ۹: نتایج مدل‌سازی عددی

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
تنش محوری (MPa)	۱۰/۵	۱۷	۱۹/۲	۱۳/۵
تنش جانبی (MPa)	۳	۵	۶	۳
گام زمانی	۰/۸۵	۱/۳	۱/۴	۰/۸۵

در اینجا ما زمان مورد نیاز تا ایجاد اولین شکست را بررسی کردیم و با توجه به مقادیر ثبت شده برای آن و با توجه به این نکته که با افزایش زمان فشار داخل گمانه نیز افزایش پیدا می‌کند می‌توان به درستی نتایج بدست آمده برای فشار شکست در مدل‌سازی

جدول ۷: نتایج تحلیل حساسیت روی تنش محوری

شماره آزمایش	۱	۲	۳
تنش محوری	۴	۸	۱۶
تنش جانبی	۳	۳	۳
نسبت پواسون	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	۰/۲۹۴
مدول یانگ	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳	۳۲/۴۳
مقاومت کششی	۴/۳	۴/۳	۴/۳
گام زمانی	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵
فشار شکست	۸/۵	۸/۵	۸/۵



شکل ۱۶: نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب تنش جانبی

شکل ۱۵: نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب تنش محوری

روی گام زمانی و در نتیجه فشار شکست حاصل شد. پس می توان نتیجه گیری کرد که این پارامتر بر فشار شکست تاثیر چندانی ندارد و همچنین این موضوع در مورد تغییرات نسبت پواسون و تنش محوری نیز صدق می کند.

با توجه به بررسی مدل سازی ها و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف مشخص شد فشار شکست متاثر از تنش جانبی و مقاومت کششی می باشد. با توجه به نتایج حاصل، تغییرات فشار شکست به صورت خطی می باشد بدین شکل که با افزایش تنش جانبی و یا افزایش مقاومت کششی فشار شکست نیز افزایش می یابد. اختلاف کم نتایج عددی و آزمایشگاهی در محاسبه میزان فشار شکست، تمامی نتایج به دست آمده از روش عددی را مورد تأیید قرار می دهد.

#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا فشار شکست هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار اباکوس برای مدل های مختلف که داده های آن از مدل سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی بود محاسبه شدند و نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نرم افزار المان محدود اباکوس با مدل سازی آزمایشگاهی مقایسه شد. سپس بر روی هر یک از پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام شد، تا اثر هر پارامتر بر فشار شکست هیدرولیکی مشخص گردد. به طور کلی نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به شرح ذیل است:

مشاهده شد نتایج حاصل از مدل سازی عددی تطابق خوبی با مدل سازی آزمایشگاهی دارد. در تمام آزمایش ها شکستگی های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است این موضوع با تئوری های بیان شده در این زمینه همخوانی دارد.

با افزایش تنش جانبی فشار شکست افزایش یافت ولی با تغییر تنش محوری در آن تغییر به خصوصی ایجاد نشد. در این مدل سازی که بدون شکست اولیه می باشد و مشابه عملیات شکست هیدرولیکی در چاه نفت طراحی شده است مشاهده شد که ترک ایجاد شده از مرکز نمونه آغاز شده و راستای گسترش ترک در راستای محور گمانه و عمود بر تنش جانبی است این نتیجه گیری کاملاً با مدل سازی آزمایشگاهی تطابق داشت.

آزمایشگاهی پی برد. با توجه به زمان بدست آمده و تنش های اعمالی با افزایش تنش محوری و ثابت ماندن تنش جانبی در آزمایش یک و چهار تغییری در زمان شکست و در نتیجه تغییری در فشار شکست رخ نداده است اما در آزمایش های دو و سه با افزایش تنش جانبی زمان مورد نیاز تا ایجاد اولین شکست در نمونه با افزایش همراه بوده که نشان از افزایش فشار مورد نیاز شکست می باشد.

در اینجا ما هر گام را برابر یک ثانیه قرار دادیم شروع فشار در گمانه از یک مگاپاسکال بوده است و در پایان هر گام برابر ده قرار دادیم که به صورت خطی افزایش می یابد که بدین صورت هر ۰/۱ ثانیه برابر با یک مگاپاسکال می شود. بدین صورت می توان فشار شکست را برای هر آزمایش از روی گام زمانی محاسبه کرد که به شرح زیر می باشد:

جدول ۱۰: نتایج مدل سازی عددی

شماره آزمایش	۴	۳	۲	۱
تنش محوری (MPa)	۱۳/۵	۱۹/۲	۱۷	۱۰/۵
تنش جانبی (MPa)	۳	۶	۵	۳
فشار شکست (MPa)	۸/۵	۱۴	۱۳	۸/۵

جدول ۱۱: مقایسه نتایج مدل سازی ها				
شماره آزمایش	۴	۳	۲	۱
فشار شکست				
مدل سازی آزمایشگاهی	۸/۴۱	۱۶/۴۹	۱۵	۸/۴۳
فشار شکست				
مدل سازی عددی	۸/۵	۱۴	۱۳	۸/۵

با توجه به مقادیر حاصل، مشاهده می شود اختلاف اندکی بین نتایج حاصل از مدل سازی آزمایشگاهی با مدل سازی عددی در اباکوس می باشد که کمترین این اختلاف حدود ۱ درصد و بیشترین این اختلاف ۱۵ درصد محاسبه شده است. پس در نتیجه مدل سازی عددی این فرایند برای پیش بینی عملیات شکست هیدرولیکی در سالیته قلیل اتکا می باشد و می توان از آن برای تعیین پمپ مناسب عملیات و همچنین مشاهده اتفاقات حاصل در سالیته بهره برد و از این طریق در زمان و هزینه صرفه جویی نمود.

نتایجی که از اعمال تغییرات بر روی مدول یانگ با ثابت نگه داشتن باقی پارامترها حاصل شد نشان داد که تغییرات کمی بر

که با افزایش تنش جانبی و یا افزایش مقاومت کششی مقدار عددی فشار شکست افزایش یافته و با کاهش تنش جانبی و یا کاهش مقاومت کششی مقدار عددی فشار شکست کاهش می‌یابد.

پارامترهایی مثل مدول یلنگ، تنش محوری و همچنین نسبت پواسون کمترین تأثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی دارند به نحوی که می‌توان از آن صرف نظر کرد. مشاهده شد که مقدار فشار شکست متأثر از تنش جانبی و مقاومت کششی بوده و با این دو پارامتر رابطه خطی دارد به نحوی

#### ۷- منبع ها

- [1] Zhang, G., et al., Three-dimensional finite element simulation and parametric study for horizontal well hydraulic fracture. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010. **72**(3-4): p. 310-317.
- [2] Lakirouhani, A., & Farkhondeh, S. (2018). Effective Parameters on Breakdown Pressure in Hydraulic Fracturing, Modeling with Finite Difference Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3), 557-566. doi: 10.22060/ceej.2017.12514.5221
- [3] Pirhadi, A., et al., Wellbore Stability in a Depleted Reservoir by Finite Element Analysis of Coupled thermo-poro-elastic Units in an Oilfield ,SW Iran. *Results in Earth Sciences*, 2023: p. 100005.
- [4] Shariat zadeh, A., Hosseini, M., & Ghadiri, M. (2021). Numerical modeling for investigating the effect of thermal stress on fracture pressure and principal stresses in hydraulic fracturing creation process in rocky environment. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 4(1), 67-79. doi: 10.22107/jpg.2021.253861.1127
- [5] Molaali, M., & Yazdani, M. (2014). NUMERICAL MODELING OF HYDRAULIC FRACTURING IN OIL RESERVOIRS WITH EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 30-2(4.1), 3-11.
- [6] Aria, M., & Hosseini, M. (2019). Numerical Modeling for Determining Effective factors on initiation fracture Pressure in Hydraulic fracture Operation. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 12(1), 57-74.
- [7] Shirinabadi, R., E. Moosavi, and M. Gholinejad, Application of distinct element method to analyze the fracture and in-situ stress on wellbore stability under triaxial compression. *Indian Geotechnical Journal*, 2021. **51**(6): p. 1384-1398.
- [8] Attari E, Golshani A. Numerical modeling of hydraulic fracture considering the pre-existing joints using PFC software. *MCEJ* 2022; 22 (2) :241-260
- [9] Fahool, F., R. Shirinabadi, and P. Moarefvand, Poroelastic Analysis Employing the Finite Element Method to Assess the Effect of Changes in the Biot Coefficient on Oil Well Wall Stability. *Indian Geotechnical Journal*, 2023: p. 1-13.
- [10] Akrami, A., & Hosseini, M. (2017). Laboratory Modeling of hydraulic fracturing. *New Findings in Applied Geology*, 11(21), 83-91. doi: 10.22084/nfag.2017.1926



---

**Numerical modeling of hydraulic fracturing using ABAQUS finite element software and determining the factors affecting the fracture initiation pressure**

Reza Eshghi Gahderijani<sup>1\*</sup>, Reza Shirinabadi<sup>2</sup>

1. Department of Petroleum Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
2. Department of Petroleum and Mining Engineering and Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2023. February.03; Accepted: 2023.June.01

(\* Corresponding author: rezaeshgi54@gmail.com )

---

**Abstract**

Hydraulic fracture as a method to stimulate oil reservoirs depends on various factors. Since the hydraulic fracture operation is high-priced, predicting how the operation will progress and the required fracture pressure to determine the appropriate pump before the operation on the site is very important. In the current research, numerical modeling of hydraulic fracture in 4 different modes in ABAQUS finite element software and comparing the results with its laboratory modeling to find the fracture pressure has been done. Then, sensitivity analysis was performed using ABAQUS software to investigate the effect of changing different parameters on the fracture pressure. These, input parameters, which are actually well data, include modulus of elasticity, horizontal stress, vertical stress, tensile strength and Poisson's ratio. The results show that the horizontal stress and tensile strength have the greatest effect on the fracture pressure, and the effect of parameters such as vertical stress and Young's modulus in determining the fracture pressure is very insignificant. In this research, the conducted modeling is similar to the laboratory models, and the samples are designed in pristine form without any initial cracks. The results of the numerical modeling had a slight difference from the laboratory modeling. This difference was calculated to be less than 1% in tests 1 and 4; in test 2, this difference was 13% and in test 3, this difference was 15%. The direction of the created cracks was in line with what was previously stated in the theoretical cases and what was obtained in the laboratory modeling. The resulting cracks appeared along the axis of the borehole and perpendicular to the horizontal stress. According to the results, numerical modeling can be used to develop hydraulic fracture operations.

**Keywords**

Hydraulic fracture, Numerical modeling, ABAQUS software, Sensitivity analysis

---