

## شبیه سازی روش شکست هیدرولیکی به کمک مدل ترک چسبنده

حسین آزاد سولا<sup>۱</sup>، محمد فاروق حسینی<sup>۲</sup>، بهنام صدایی سولا<sup>۳</sup> و سجاد چهره قانی<sup>۴\*</sup>

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۵

دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۱۱

### چکیده

فرایند شکست هیدرولیکی یکی از روش های متداول برای افزایش بهره وری چاه های نفتی است. در این روش، اعمال فشار هیدرولیکی در نقطه ی مشخصی از چاه، باعث ایجاد شکستگی های مصنوعی در مخازن شده و بدین ترتیب به تراوایی مخازن افزوده می شود. در این تحقیق، روش شکست هیدرولیکی بر پایه مفاهیم روش المان محدود شبیه سازی و پارامترهای موثر بر آن بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از نرم افزار ABAQUS شرایط معمول عملیات شکست هیدرولیکی در یک مخزن نفتی شبیه سازی شده و از تئوری مدل ترک چسبنده با قانون کشش - جدایش المان محدود توسعه یافته برای ایجاد و گسترش شکاف در درون مدل سه بعدی المان محدود استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که فشار شکست سازند با مقدار تحلیلی آن تطابق خوبی دارد. نمودار نرخ نشت سیال سه مرحله زمانی مختلف را نشان می دهد که دو مرحله اول، بیان کننده جهش در هدرروی سیال و مرحله سوم نیز هدرروی دینامیکی را نشان می دهد. تغییرات فشار سیال در راستای شکاف روند کاهشی را از خود نشان داد به طوری که در یک ناحیه میزان فشار سیال از فشار منفذی اولیه مخزن کمتر است که ناشی از پدیده تاخیر سیال در نوک شکستگی می باشد. در نهایت نیز تحلیل حساسیتی بر روی تعدادی از پارامترهای موثر بر روی فشار شروع شکست انجام شد که با افزایش همه پارامترها به جز نسبت پواسون، فشار شروع شکست نیز بیشتر شد. همچنین با محاسبه تابع حساسیت و فاکتور حساسیت برای هر یک از پارامترها مشخص شد که مدول یانگ بیشترین و ضریب نرخ نشت سیال کمترین تاثیر را بر روی فشار شروع شکست دارد.

**کلید واژه ها:** شکست هیدرولیکی، مدل ترک چسبنده، قانون کشش - جدایش، تحلیل حساسیت

۱. کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۳. استادیار، انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه تهران

۴. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

\*مسئول مکاتبات: s.chehreghani@urmia.ac.ir

## ۱. مقدمه

افزایش روزافزون بهره‌برداری از منابع نفت و گاز و کاهش فشار ناشی از تولید در این مخازن، موجب کاهش راندمان در چاه‌های تولیدی موجود می‌شود. روش‌های متنوعی برای افزایش بهره‌وری چاه‌های نفتی وجود دارند که فرایند شکست هیدرولیکی یکی از روش‌های متداول می‌باشد. فرایند شکست هیدرولیکی، اعمال فشار هیدرولیکی در نقطه‌ی مشخصی از چاه است که باعث ایجاد شکستگی‌های مصنوعی در مخازن شده و بدین ترتیب تراوایی مخازن افزوده می‌شود. این روش علاوه بر کاربرد در منابع نفت و گاز، در نیروگاه‌های ژئوترمال (یکی از انرژی‌های نوین سازگار با محیط زیست)، به عنوان یک تکنیک برای نفوذ در این مخازن استفاده می‌شود (Ji, 2008).

امروزه به دلیل اهمیت منابع هیدروکربنی و بالا رفتن نرخ مصرف در جهان، نیاز به بالا بردن استخراج این مواد بیش از پیش احساس می‌شود. از طرفی وجود سازندهای با تخلخل موثر پایین که سنگ مادر مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شوند، مانع از بهره‌وری مناسب از این مخازن می‌گردند. شکست هیدرولیکی که به عنوان یک فرایند آغاز و گسترش شکستگی‌ها در اثر تزریق سیال به درون قسمتی از گمانه حفر شده در سازندهای سنگی شناخته می‌شود، نقش موثری در افزایش استحصال مخازن هیدروکربنی کم بازده دارا می‌باشد. آغاز و گسترش شکستگی‌ها وابستگی بالایی به پارامترها و خصوصیات سنگ مخزن دارند (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴). ایجاد یک مدل پوروالاستیک منطبق بر واقعیت مسئله و اجرای کامل فرایند شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی در درون مخزن هیدروکربوری از اهداف اولیه این تحقیق می‌باشد. شبیه‌سازی فرایند شکست هیدرولیکی شامل گامهای ژئواستاتیک، تزریق سیال به درون مخزن و اعمال فشارسیال درون چاه، شروع شکست هیدرولیکی، تزریق پروپانت و در نهایت زهکشی و تولید، خواهد بود. اعمال شرایط اولیه و مرزی منطقی برجا و تحلیل پارامترهای مؤثر این فرایند در روند تحریک مخزن و ازدیاد برداشت سیال هیدروکربوری،

تحلیل این عملیات را پوشش می‌دهد. پارامترهای موثر در تحلیل شکست هیدرولیکی به هنگام ایجاد شکافت در درون مدل و گسترش آن در جهت صفحه شکست با المان‌های چسبنده، ارزیابی خواهند شد.

مفهوم ترک چسبنده در ابتدا توسط بارنبلات (Barenblatt, 1959) و داگدایل (Dugdale, 1960) برای توصیف فرایندهای شکست غیرخطی نوک ترک در مصالح ترد و شکل‌پذیر معرفی شد. هیلبرورگ و همکاران (Hillerborg et al., 1976) مفهوم ترک چسبنده را برای شبیه‌سازی رشد ترک در بتن تعمیم دادند.

چاندرا و همکارانش (Chandra et al., 2002) اثر شکل قانون چسبندگی را بر رفتار ترک‌ها مطالعه نمودند و نشان دادند که شکل معادله جداشدگی - نیروی چسبندگی تاثیر بسیار زیادی بر رفتار ماکروسکوپی سیستم مورد نظر خواهد داشت. نیدلمن (Needleman, 1987) از نخستین کسانی بود که نوعی تابع چندجمله‌ای و نمایی را برای معادله جداشدگی - نیروی چسبندگی انتخاب کرد. اسپینوسا و زاواتیری (Espinosa and Zavattieri, 2003) نیز یک قانون چسبندگی دو خطی تعریف نمودند تا رفتار نرم‌شونده مصنوعی ایجاد شده در منطقه چسبنده را از طریق یک شیب اولیه قابل تنظیم از بین ببرند. سونگ و همکاران (Song et al., 2006) نشان دادند که این قانون چسبندگی، نرم‌شوندگی مصنوعی اضافی ایجادشده در ناحیه چسبنده را به طور موثری کاهش می‌دهد.

چن و همکاران (Chen et al., 2009) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، به بررسی اثر پارامترهای ناحیه چسبنده و ویسکوزیته سیال تزریقی بر روی رفتار شکست هیدرولیکی پرداختند. آنها بدین منظور ضریبی به نام نرخ جدایش بحرانی ( $\alpha$ ) تعریف کردند که با استفاده از آن ابعاد ناحیه چسبنده و میزان انرژی مصرف شده را تا رسیدن به گسیختگی کامل محاسبه می‌کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش این ضریب، انرژی کمتری برای گسیختگی کامل المان‌های چسبنده نیاز بوده و نرخ نفوذ سیال به داخل ناحیه چسبنده نیز در این حالت کمتر می‌باشد.

آریا و حسینی (۱۳۹۸) عوامل مختلف دخیل در شکست هیدرولیکی و تاثیر هر یک از آنها بر حسب شکست هیدرولیکی را برای یافتن محل مناسب انجام عملیات شکست هیدرولیکی بررسی نموده‌اند. آنها با استفاده از اطلاعات چاه‌های حفر شده در سنگهای کربناته ایران به این نتیجه رسیدند که تنش افقی حداکثر بیشترین تاثیر را بر روی فشار شکست.

محققان متعدد دیگری نیز در زمینه مدل‌سازی ترک چسبنده و تاثیر آن بر فرایند شکست هیدرولیکی تحقیق کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به مراجع (Aghighi et al., 2006; Asadi and Malekijavan, 2012; Carrier and Granet, 2012; Chen, 2011; Wangen, 2011; Ghassemi et al., 2013) اشاره کرد. به‌طور کلی هدف از این تحقیق مطالعه تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی و نشت سیال بر روی فشار شروع شکست می‌باشد که توسط یک مدل سه‌بعدی از مخزن نفتی انجام شده‌است.

## ۲. فشار شکست سازند

فشار شکست سازند (Formation fracturing pressure) که فشار شکست آنی (Breakdown pressure) نیز نامیده می‌شود. یکی از پارامترهای کلیدی مورد استفاده در طراحی شکست هیدرولیکی می‌باشد. مقدار پارامتر به عمق و ویژگی‌های سازند وابسته است. حدس اولیه‌ی پارامتر با مقدار تنش برجا آغاز می‌شود. بر اساس یک معیار شکست، ترزاقی رابطه **Error! Reference source not found.** را برای بیان فشار شکست آنی به دست آورده است که پس از آن هیمسون و فیرهارست (Haimson and Fairhurst) این رابطه را اصلاح کرده و برای محیط‌های پوروالاستیک رابطه **Error! Reference source not found.** را ارائه نمودند:

$$p_{bd} = 3\sigma_{h,min} - \sigma_{h,max} + T_0 - p_p \quad (1)$$

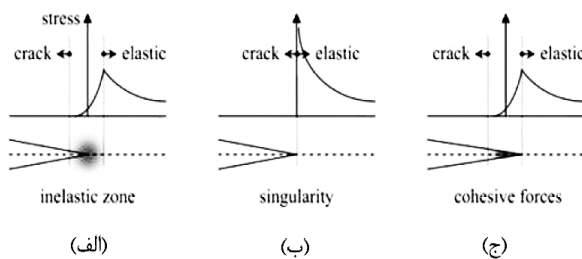
$$p_{bd} = \frac{T_0 + 3\sigma_{h,min} - \sigma_{h,max} - 2\eta p_p}{2(1 - \eta)} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)}$$

سریس و پاپاناستیو (Sarris and Papanastasiou, 2011) یک مدل المان محدود دوبعدی پوروالاستیک در زمینه تاثیر المان چسبنده بر مدل شکاف هیدرولیکی انجام دادند و در آن به بررسی تاثیر المان‌های چسبنده با معیارهای شکست مختلف (صلب- نرم‌شونده و الاستیک- نرم‌شونده) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اولاً وجود فشارهای جانبی باعث افزایش ناحیه غیرخطی نوک ترک شده و ابعاد شکستگی و همچنین میزان فشار مورد نیاز برای شروع و گسترش شکستگی افزایش می‌یابد؛ ثانیاً ناحیه چسبده با معیار شکست الاستیک- نرم‌شونده به فشار سیال بیشتری برای ایجاد و گسترش شکست نیازمند است و عرض باز شدگی نیز در این حالت بزرگتر می‌باشد.

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2012) بر ساخت مدل سه بعدی شکست هیدرولیکی در یک چاه قائم با شکستگی افقی تحت یک محیط بینهایت و الاستیک نفوذناپذیر همراه با مشبک‌کاری و سیستم نگهداری استفاده نمودند؛ هدف آنها از این تحقیق محاسبه فشار ته‌چاهی بود که برای اینکه بتوانند نتایج خود را اعتبارسنجی نمایند، از داده‌های میدان نفتی داکینگ چین برای شبیه‌سازی بهره بردند و به این نتیجه رسیدند که تطابق بسیار خوبی بین خروجی‌های مدل و عملیات برجای شکست هیدرولیکی در میدان نفتی مذکور وجود دارد.

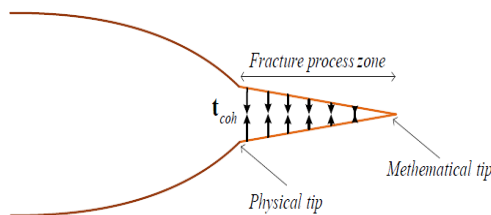
صابر حسینی و همکاران (Saberhosseini et al, 2014) با استفاده از مدل ترک چسبنده به بررسی نقش تنش‌های برجا و فشار منفذی در فشار شروع شکست هیدرولیکی در چاه‌های افقی و قائم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در چاه‌های قائم، اختلاف بین تنش‌های افقی حداکثر و حداقل و در چاه‌های افقی نیز (حفر شده در راستای تنش افقی حداکثر) اختلاف بین تنش قائم و تنش افقی حداکثر، عامل تاثیرگذار در فشار شروع شکست هیدرولیکی می‌باشد و همچنین مشاهده نمودند که کاهش فشار منفذی در هر دو چاه‌های افقی و قائم، باعث افزایش فشار شکست سازند می‌شود



شکل ۱. وضعیت تنش در نوک ترک. (الف) واقعیت. (ب)

مکانیک شکست الاستیک خطی. (ج) مدل ترک چسبنده.

بر این اساس مطابق شکل ۲ نوک ترک در مدل ترک چسبنده به دو صورت تعریف می‌شود: یکی نوک ترک ریاضی که محلی است که در آن ناپیوستگی میدان جابه‌جایی در مدل المان محدود توسعه یافته از بین می‌رود و دیگری نوک ترک واقعی که محلی است که در آن نیروی چسبنده در سطح ترک از بین می‌رود، (هیرمند، ۱۳۹۲).



شکل ۲. نوک ترک در مدل ترک چسبنده (هیرمند، ۱۳۹۲).

رفتار غیر خطی ماده در مدل ترک چسبنده با اعمال نیروهای چسبندگی به لبه‌های ترک در طول ناحیه فرآیند شکست مدل‌سازی می‌شود. در این تحقیق صرفاً از قانون کشش-جدایش برای مدل‌سازی ترک چسبنده در مدل سه‌بعدی استفاده شده‌است که در ادامه توضیح مختصری در مورد این قانون و نحوه جریان سیال در داخل شکستگی داده می‌شود.

### ۱.۳. قانون کشش-جدایش

قانون کشش-جدایش بیان‌کننده رابطه بین تانسور کشش و بردار جابجایی بر روی سطح ترک چسبنده می‌باشد. برای بررسی رفتار مکانیکی مواد تحت اعمال تنش‌های مختلف، معیارهای شکستی منطبق با خصوصیات آنها ارائه می‌شود. معیار شکست استفاده شده در این مدل‌سازی نیز بر مبنای مفهوم شکاف چسبنده که در آن رفتار ماده تحت اعمال کشش و برش، به دو بخش قبل از جوانه زنی شکاف و آغاز شکست

که در آنها  $T_0$  مقاومت کششی سنگ،  $p_{bd}$  فشار شکست آبی،  $p_p$  فشار منفذی،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $\eta$  ضریب پوروالاستیسیته و  $\nu$  نسبت پواسون می‌باشند. در حقیقت شکستگی‌های اصلی و ذاتی سنگ، شکست هیدرولیکی را تشویق می‌کند تا در نوک شکستگی‌های موجود در سنگ ایجاد شود. در این مورد، معیار مقاومت کلاسیک قابل کاربرد نمی‌باشد و نمی‌توان آن را با روش‌های کلاسیکی که به نظر مناسب می‌رسند، تعدیل نمود. به دلیل اینکه مقاومت کششی نزدیک به صفر است وقتی که تنش مماسی موثر، کششی شود شکستگی ناشی از کشش شکل خواهد گرفت (Guo et al, 2011; Peška and Zoback, 1995; Wang, 2000).

### ۳. مدل ترک چسبنده

در حالتی که ناحیه فرآیند شکست در مقایسه با طول ترک و ابعاد مسئله قابل صرف نظر کردن نباشد، مثل مصالح نیمه ترد نظیر مصالح خاکی، بتن و سنگ، استفاده از مدل مکانیک شکست الاستیک خطی منطقی نیست. به منظور توصیف فرایندهای غیرخطی که در محدوده نوک ترک رخ می‌دهد، در سال ۱۹۵۸ مدل خرابی توسط کاجانوارائه شد (Kachanov, 1958). در ادامه، بارنبلات (۱۹۵۹) مدل ترک چسبنده را به عنوان جایگزینی برای مدل مکانیک شکست الاستیک خطی مطرح نمود. مدل ترک چسبنده، مطابق شکل ۱ رفتار غیر خطی در ناحیه نوک ترک را به حساب آورده و تکنیکی میدان تنش در نوک ترک را که یک فرض غیر واقعی مکانیک شکست الاستیک خطی می‌باشد اصلاح می‌کند، (Barenblatt, 1962).

کاملاً سالم تا یک برای شکست کامل تغییر می‌کند و با توجه به آن می‌توان مقدار مقاومت ماده بعد از رسیدن به نقطه آغاز شکست را تحت روابط **Error! Reference source not found.** الی **Error! Reference source not found.** دست آورد.

$$t_n = \begin{cases} (1-D)\bar{t}_n & , \bar{t}_n \geq 0 \\ \bar{t}_n & , \bar{t}_n < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

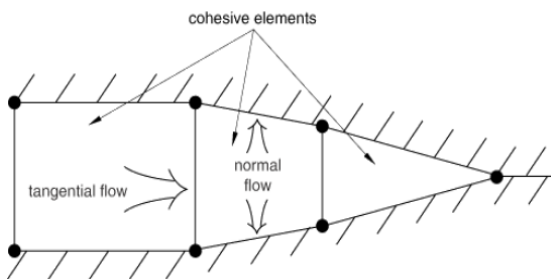
$$t_s = (1-D)\bar{t}_s \quad (۵)$$

$$t_t = (1-D)\bar{t}_t \quad (۶)$$

که در روابط فوق  $\bar{t}$  بیانگر مقادیر تنش پیش‌بینی شده تحت رفتار الاستیک خطی است (ABAQUS, 2011).

### ۳.۱.۱. جریان سیال داخل ترک چسبنده

جریان سیال در درون شکاف به دو دسته‌ی جریان مماسی (Tangential fluid flow) در امتداد شکاف و جریان عمود بر دیواره‌های آن یا جریان نشتی (Normal fluid flow) تقسیم می‌شود (ABAQUS, 2011).

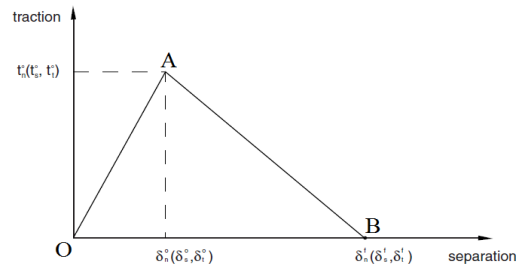


شکل ۴. شماتیکی از جریان سیال مماسی و نشتی در داخل ترک چسبنده (ABAQUS, 2011).

### الف) جریان مماسی

برای مدل‌سازی جریان مماسی که در امتداد شکاف حرکت می‌کند، می‌توان از قواعد افت فشار سیالات نیوتنی و یا قاعده سیالات توانی استفاده نمود، که در مدل ارائه شده در این

کامل ماده تقسیم می‌شود. این معیار همخوانی خوبی با رفتار مواد شبه شکننده از جمله سنگ‌ها و مواد مصنوعی مانند بتن از خود نشان می‌دهد. در شکل ۳ نمای کلی این معیار شکست نشان داده شده است که قابل تقسیم به دو بخش تغییر شکل الاستیک قبل از جواز زنی شکست (O-A) و ایجاد و توسعه شکست (A-B) در ماده است (ABAQUS, 2011).



شکل ۳. نمودار شماتیکی از قانون کشش-جدایش

نقطه پیک نمودار (نقطه A) محل آغاز شکست می‌باشد که روابط زیادی برای تعیین آن ارائه شده است. یکی از این روابط که مبنای مدل استفاده شده در این مقاله نیز می‌باشد، معیار شکست حداکثر تنش ظاهری (Maximum nominal stress criterion) است که در رابطه ۳ مشخص شده است.

$$Max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (۳)$$

که در آن  $t_n, t_s, t_t$  تنش کششی و زیر نویس‌های  $t_n^0, t_s^0, t_t^0$  به ترتیب بیانگر راستای عمودی و راستای برشی اول و دوم هستند. همچنین بالانویس 0 نیز بیانگر میزان مقاومت نهایی المان است. تا رسیدن به نقطه آغاز شکست، تغییر شکل ماده کاملاً الاستیک بوده که مقدار آن با توجه به تنش وارده، مدول یانگ و ضریب پواسون ماده قابل محاسبه و بررسی است.

بعد از ارضا شدن رابطه **Error! Reference source not found.** رسیدن به نقطه A ماده وارد فاز شکست شده و مقاومت خود را کم کم از دست خواهد داد. برای بررسی و تحلیل این بخش از رفتار ماده روابطی به نام قوانین پیشرفت شکست بیان می‌شوند بیانگر نرخ کاهش مقاومت ماده بعد از آغاز شکست می‌باشند. از این رو متغیر D که بیانگر میزان آسیب کلی وارده تحت اثر تمامی مکانسیم‌های شکست می‌باشند تعریف می‌شود که مقدار آن از صفر برای حالت

تحقیق، افت فشار ناشی از جریان در طول شکاف بر مبنای رفتار سیالات نیوتنی و تراکم‌ناپذیر بررسی شده و مقدار تراوایی متناسب با آن در هر لحظه با توجه به عرض شکاف در آن نقطه و مقدار ویسکوزیته سیال قابل محاسبه و بررسی است.

برای محاسبه دبی جریان مماسی از رابطه **Error!** **Reference source not found.** استفاده می‌شود:

$$q = \frac{-(k_t \times \nabla \cdot p_f)}{w} \quad (7)$$

که در آن  $q$  دبی جریان مماسی در داخل شکستگی،  $\nabla \cdot p_f$  گرادیان تغییرات فشار در راستای ناحیه چسبنده،  $w$  عرض شکستگی ایجاد شده و  $k_t$  نفوذپذیری مماسی است که مقدار آن نیز توسط رابطه **Error!** **Reference source not found.** بدست می‌آید.

$$k_t = \frac{w^3}{12\mu} \quad (8)$$

که در آن  $\mu$  ویسکوزیته سیال نیوتنی در امتداد شکستگی است (Chen, 2012).

### ب) جریان نشتی

جریان نشتی عمود بر دیواره‌های شکاف، بیانگر میزان نفوذپذیری کیک گل (Filter Cake) ایجادشده بر روی دیواره‌های شکاف است؛ یا به عبارت دیگر عبارتست از جریان سیالی که از سمت شکستگی به داخل سازند در حرکت است و به عنوان عامل نشت سیال از سطوح بالا و پایین ناحیه چسبنده شناخته شده است. دبی جریان نشتی در بالا و پایین المان‌های چسبنده طبق روابط **Error!** **Reference source not found.** و **Error!** **Reference source not found.** تعریف می‌شوند.

$$q_t = c_t(p_f - p_t) \quad (9)$$

$$q_b = c_b(p_f - p_b) \quad (10)$$

که در آن  $q_t$  و  $q_b$  به ترتیب دبی جریان نشتی در بالا و پایین المان‌های چسبنده،  $p_f$  فشار در مرکز المان‌های چسبنده، و  $p_t$

### ج) معادلات حاکم بر جریان سیال در داخل شکستگی

معادله پیوستگی بقای جرم که در رابطه **Error!** **Reference source not found.** بیان نشان داده شده است، معادله حاکم بر جریان سیال در داخل شکستگی می‌باشد.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot q + (q_t + q_b) = Q(t) \cdot \delta(x, y) \quad (11)$$

که در آن  $Q(t)$  بیان کننده دبی تزریق سیال است. با جایگذاری روابط **Error!** **Reference source not found.** تا **Error!** **Reference source not found.** رابطه **Error!** **Reference source not found.** بدست می‌آید که معادله رینولدز نامیده می‌شود و نشان دهنده پیوستگی بین جریان سیال محیط متخلخل اطراف و سیال داخل شکستگی است (Saberhosseini et al., 2014).

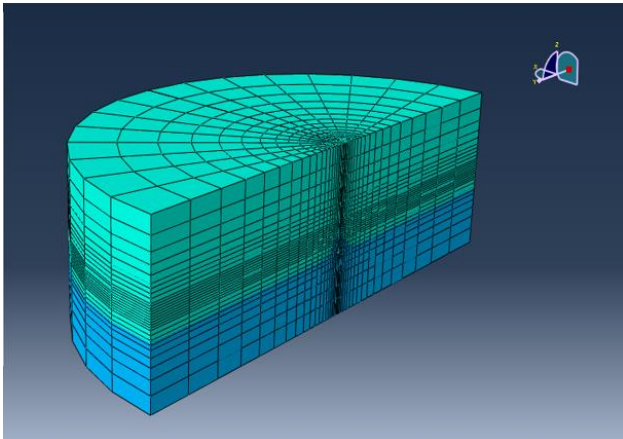
$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + c_t(p_f - p_t) + c_b(p_f - p_b) \\ = \frac{1}{12\mu} \nabla \cdot (w^3 \nabla \cdot p_f) + Q(t) \cdot \delta(x, y) \end{aligned} \quad (12)$$

### ۴. مدل‌سازی عددی

#### ۴.۱. مراحل مدل‌سازی

در این پژوهش ابتدا به ساخت مدل سه‌بعدی یک مخزن نفتی با روش المان محدود پرداخته‌شد؛ این مدل دارای تخلخل و تراوایی بوده و فشار سیال منفذی در آن وجود دارد؛ سپس در گام بعد با تزریق سیال پرفشار به درون سنگ مخزن با دبی ۲۷ لیتر در ثانیه و زمان تزریق ۲۰ دقیقه شکاف هیدرولیکی ایجاد شد و در نهایت گسترش پیدا کرد. بعد از ایجاد شکاف با تغییر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن و نیز پارامترهای عملیاتی به مطالعه تأثیر این عوامل بر فشار ایجاد شکست و هندسه شکاف هیدرولیکی پرداخته‌شد. شکل ۵ نمای سه‌بعدی از مخزن نفتی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

هیدرولیکی در بخش میانی انجام شده است و تمامی نتایج ارائه شده در این تحقیق مختص بخش مرکزی می باشد.

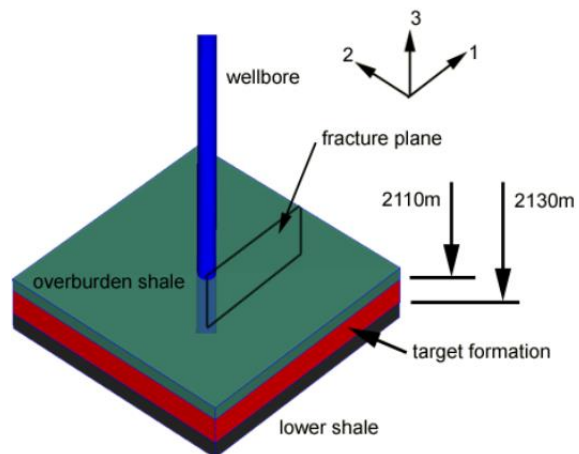


شکل ۶. نمایش مدل المان محدود مخزن نفتی.

#### ۴. ۱. ۲. مدل رفتاری و خواص مواد

بر اساس مدل سازی الاستیک، مدل سنگی شبه سازی شده، فاقد تخلخل و سیال منفذی در نظر گرفته می شود که این فرضیه در روند درک واقعیت مسئله خطای بزرگی ایجاد می کند، چرا که وجود فضای متخلخل و سیال منفذی و نیز ارتباط آنها با سیال درون چاه از مسائل اجتناب ناپذیر است. علاوه بر ارتباط سیال و توانایی ورود سیال چاه به درون فضای متخلخل و برعکس، عدم وجود تخلخل باعث بالا رفتن مقاومت های برشی و تراکمی سنگ خواهد شد که بر این اساس خروجی های نامعتبری بدست می آید. با توجه به توضیحات فوق و برای اینکه بتوان نتایج حاصل از شبه سازی را قابل استناد دانست، از رفتار پورو الاستیک برای مدل سازی محیط متخلخل مخزن نفتی استفاده شده است که پارامترهای ورودی مدل در جدول و جدول ذکر شده است.

برای مدل سازی صفحه شکستگی از مدل ترک چسبنده با قانون کشش - جدایش استفاده شده است که به تفصیل در بخش قبلی توضیح داده شد و مقادیر ورودی آن نیز در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم دسترسی به داده های ژئومکانیکی از مخازن نفتی و زمان بر



شکل ۵. شماتیکی از نمای سه بعدی مخزن مورد مطالعه.

با توجه به پژوهش های متعددی که در زمینه های مختلف شکست هیدرولیکی انجام شده است، ضرورت ساخت یک مدل سه بعدی که منطبق بر واقعیت مسئله باشد یکی از چالش های جدی فرایند شکست هیدرولیکی بوده و همینطور عدم آگاهی از تأثیر عوامل ژئومکانیکی و فشار سازندی بر تغییرات هندسه شکاف هیدرولیکی از قبیل طول، عرض و ارتفاع شکاف هیدرولیکی و فشار شکست آن نیز اصلی ترین چالش این تحقیق می باشد. در این مطالعه با استفاده از روش عددی المان محدود، و المان محدود توسعه یافته به حل این چالش عمده در صنعت نفت پرداخته شد.

#### ۴. ۱. ۱. هندسه مدل ژئومکانیکی

اولین مرحله ساخت مدل، ایجاد هندسه مورد نظر برای مساله است. ابعاد مدل به صورت یک مخزن دایره ای با شعاع ۲۵۰ متر و ضخامت ۱۵۰ متر برای مدل چاه عمودی با شعاع ۰/۲ متر در نظر گرفته شده است، به طوریکه بخش فوقانی مخزن در عمق ۲۱۰۰ متری از سطح زمین قرار دارد که به منظور کاهش زمان اجرا و با استفاده از قانون تقارن، نصف مخزن نفتی مدل شده است. شکل ۶ هندسه مخزن نفتی مدل شده را نشان می دهد که به خوبی می توان در آن تقسیم بندی لایه مخزن را به سه بخش فوقانی، مرکزی و تحتانی را مشاهده کرد. لازم به ذکر است که شبه سازی فرایند شکست

An 8-node, reduced-integration, pore ) C3D8RP (pressure three-dimensional element استفاده شده است. این المان در برگیرنده‌ی شرایط سه‌بعدی و حضور فشار منفذی است. برای مدل‌سازی صفحه شکستگی نیز از المان‌های COH3D8P (An 8-node, pore pressure three-dimensional cohesive element) که بیان‌کننده شرایط ترک چسبنده همراه با گره‌های میانی (مختص فشار منفذی) می‌باشد، استفاده شده است (ABAQUS, 2011).

بودن مراحل اداری دستیابی به این داده‌ها، مدل ساخته شده در این تحقیق مصنوعی (Synthetic) بوده و با استفاده از داده‌های موجود در مقالات ساخته شده است. مقادیر تنش قائم به صورت ثقلی (در اثر وزن روباره)، فشار منفذی به صورت هیدرواستاتیک و تنش‌های افقی نیز در رژیم گسلش نرمال ( $\sigma_{H,Max} = 0.9\sigma_v$  و  $\sigma_{h,min} = 0.8\sigma_v$ ) محاسبه شده‌اند (Saberhosseini et al., 2014). مقادیر تنش‌های برجا و فشار منفذی در نقطه تزریق، در جدول ۲ ذکر شده است.

**جدول ۱.** ویژگی‌های سیال تزریقی مورد استفاده برای مدل‌سازی (Chen, 2012; Saberhosseini et al., 2014).

Flow rate of injection (bbl/min) q	Leak-off rate coefficient (m/kPa.s) c	Viscosity (Pa.s) $\mu$
10	5e-10	1e-6

**۳.۱.۴. مش‌بندی مدل**

نرم‌افزار ABAQUS یک منبع کامل از المان‌های مختلف برای تهیه یک مجموعه نیرومند از ابزارهایی برای حل مسائل گوناگون دارد. در مدل ژئومکانیکی حاضر به علت حضور فشار منفذی و مدل‌سازی سه‌بعدی سنگ مخزن از المان

**جدول ۲.** ویژگی‌های ژئومکانیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی (Chen, 2012; Saberhosseini et al., 2014).

$\rho_o$ Density of the oil (Kg/m <sup>3</sup> )	Density of the reservoir rock (Kg/m <sup>3</sup> ) $\rho_r$	k Permeability (md)	Void ratio (%) e	Porosity (%) $\phi$	Poisson's ratio $\nu$	Young modulus (GPa) E
980	2500	1	20	17	0.2	30

**جدول ۱.** پارامترهای ورودی المان‌های چسبنده (Chen, 2012; Saberhosseini et al., 2014).

Fracture stiffness * (GPa) K	Max displacement (m) $\delta_n^f$	Shear tensile strenght (MPa) $t_t$	Shear tensile strenght (MPa) $t_s$	Normal tensile strenght (MPa) $t_n$
20	0.005	1	1	3

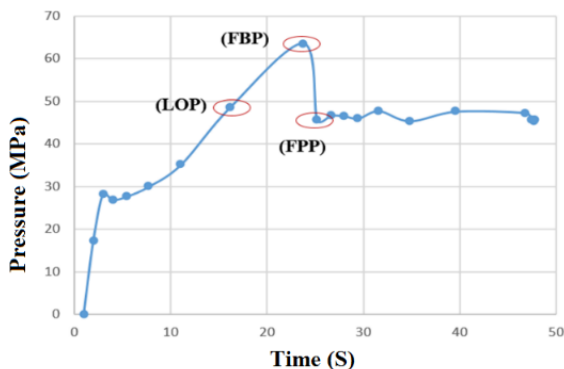
\* سختی شکستگی عبارتست از ضریب الاستیسیته ناحیه چسبنده که یکی از پارامترهای مقاومتی ترک بوده و یکای آن نیز هم‌واحد با مدول یانگ محیط پوروالاستیک اطراف می‌باشد.

**جدول ۲.** مقادیر تنش‌های برجا و فشار منفذی در نقطه تزریق (Chen, 2012; Saberhosseini et al., 2014).

Pore pressure (MPa) $p_p$	Max horizontal stress (MPa) $\sigma_H$	Min horizontal stress (MPa) $\sigma_h$	Vertical stress (MPa) $\sigma_v$	Depth (m) h
21.73	48.94	43.5	54.37	2175



سیال در طول زمان تزریق را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود.



شکل ۷. نمودار فشار- زمان مربوط به مدل مینا.

با توجه به شکل ۸ میزان نشت سیال را می‌توان به سه مرحله زمانی تقسیم کرد. در مرحله اول نرخ نشت سیال با افزایش ناگهانی همراه بوده و پس از آن در مرحله دوم نشت سیال کاهش می‌یابد و در مرحله آخر به حالتی پایدار می‌رسد. دو مرحله اول ناشی از ایجاد اولین سطح شکستگی می‌باشد که باعث هدر روی سیال به داخل سازند می‌شود و در مرحله سوم نیز سیال دارای نرخ ثابتی از نشت به داخل سازند می‌باشد که دو مرحله زمانی اول را با نام جهش در نرخ نشت سیال و مرحله سوم را نشت سیال دینامیکی نامیده شده است (طاهری‌شکیب، قادری، & جلالی‌فر، ۱۳۹۲).

#### ۴.۲.۳. پروفیل بازشدگی شکستگی

بازشدگی شکستگی یکی از خروجی‌های مهمی است که با توجه به آن می‌توان تغییرات عرض شکستگی را قبل و بعد از تزریق سیال بدست آورده و میزان موفقیت آمیز بودن فرایند شکست هیدرولیکی را توجیه نمود. عرض شکستگی رابطه مستقیمی با میزان نفوذپذیری و دبی جریان سیال هیدروکربنی در داخل سازند دارد. پر واضح است که افزایش عرض شکستگی و ثابت نگه‌داشتن آن بعد از اتمام عملیات تزریق توسط پروپانت، می‌تواند نقش بسیار موثری را در افزایش نفوذپذیری و دبی سیال هیدروکربنی و در نتیجه میزان تولید چاه نفتی داشته باشد.

#### ۴.۲. نتایج تحلیل عددی

##### ۴.۲.۱. منحنی فشار- زمان

منحنی فشار- زمان بدست آمده از خروجی مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور و مطالب گفته شده در بخش ۲ (فشار شکست سازند)، مشاهده می‌شود که مقدار فشار شروع شکست (LOP) بدست آمده از این نمودار برابر با  $48/026$  MPa، فشار شکست سازند (FBP)  $63/5$  MPa و فشار گسترش شکستگی (FPP) نیز  $46/15$  MPa می‌باشند. با جایگذاری مقادیر ورودی مدل در روابط

تحلیلی **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.**

**Reference source not found.** مقادیر فشار شکست سازند

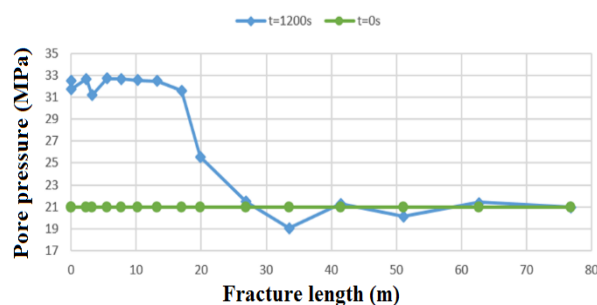
به ترتیب  $62/83$  MPa و  $57/01$  MPa بدست می‌آیند که در مقایسه با خروجی منحنی فشار- زمان، خطاهایی حدود ۱٪ ( $0/67$  MPa) و ۱۱٪ ( $6/5$  MPa) را شامل می‌شوند. لازم به ذکر است که در زمان‌های اولیه تزریق سیال به داخل چاه، افزایش ناگهانی در میزان فشار مشاهده می‌شود که این پدیده را می‌توان ناشی از افزایش فشار منفذی در ناحیه چسبده دانست که پس از آن منحنی فشار- زمان دارای شیب ملایمی می‌باشد تا اینکه شکستگی اولیه رخ می‌دهد و در نهایت سازند به گسیختگی کامل می‌رسد.

##### ۴.۲.۲. نرخ نشت سیال

با در نظر گرفتن محیط سنگی به عنوان محیطی متخلخل و با قابلیت اینکه سیال تزریقی امکان هدرروی و ورود از دیواره شکاف به داخل سازند را دارا می‌باشد، جریان سیالی درون سازند همانند جریان فضاهای متخلخل به وجود می‌آید. نرخ نشت سیال تزریقی خود از موارد مهمی است که در طراحی عملیات باید مدنظر قرار گیرد. محاسبه میزان دقیق نرخ نشت سیال نیاز به حل معادلات موازنه جرم و در دسترس بودن اطلاعات دقیق از سنگ و سیال دارد. بررسی دقیق هدرروی سیال داخل شکاف خارج از محدوده این تحقیق است. با این وجود با در نظر گرفتن اینکه سیال توانایی ورود از داخل شکاف به سازند را دارد، نمودار تغییرات نشت

داخل شکاف سبب پیشرفت شکاف به میزانی کم در داخل سنگ می‌شود. این میزان پیشرفت موجب تشکیل نوک جدیدی برای شکاف شده که در آن تنش موثر در سنگ از مقاومت کششی کمتر است. تا زمانی که تنش موثر در نوک شکاف به مقاومت کششی سنگ نرسد، شکاف در داخل محیط سنگی پیشرفت نمی‌کند. با تزریق بیشتر سیال، تنش موثر به مقاومت کششی سنگ رسیده و سبب پیشرفت بیشتر شکاف می‌شود.

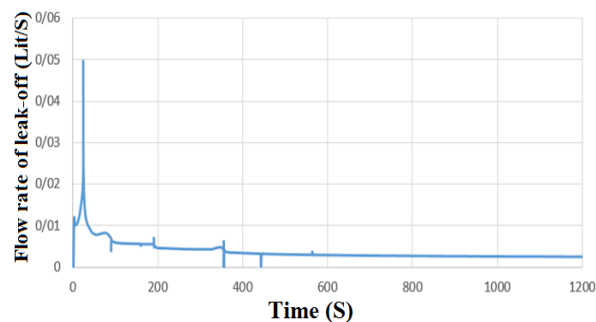
شکل ۱۰ نمودار تغییرات فشار منفذی در راستای طول شکستگی را برای زمان‌های آغاز و اتمام تزریق سیال نشان می‌دهد که با توجه به آن مشاهده می‌شود که مقادیر فشار منفذی با افزایش زمان تزریق، بیشتر شده و با فاصله گرفتن از نقطه تزریق (با افزایش طول شکستگی) این مقدار کاهش پیدا کرده و در نهایت به میزان فشار منفذی اولیه مدل می‌رسد.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات فشار منفذی در راستای طول شکستگی.

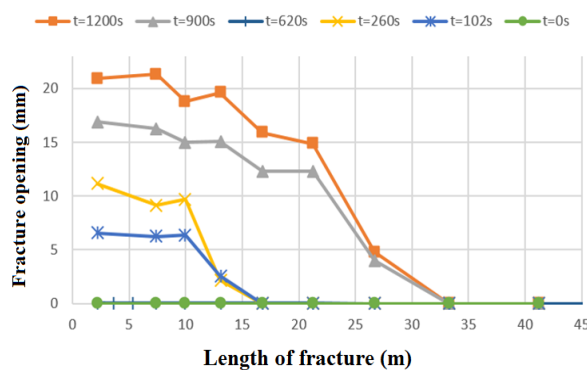
با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در فاصله ۳۰ الی ۴۰ متری از نقطه تزریق فشار سیال داخل شکاف از فشار منفذی اولیه مخزن کمتر می‌باشد که این امر ناشی از پدیده‌ای به نام تاخیر سیال (Fluid Lag) می‌باشد. تاخیر سیال به فاصله بین محل جبهه حرکت سیال شکست و محل راس در حال گسترش ترک اطلاق می‌شود که در اثر آن میزان فشار سیال داخل شکاف از فشار منفذی اولیه مخزن کمتر می‌شود. به ناحیه‌ای که پدیده تاخیر سیال در آن رخ می‌دهد اصطلاحاً ناحیه میانی (Intermediate Zone) گفته می‌شود.

#### ۴.۳. تحلیل حساسیت



شکل ۸. نمودار تغییرات نرخ نشت سیال در یک نقطه از دیواره چاه در طول زمان تزریق سیال.

شکل ۹ بیانگر بازشدگی شکستگی در راستای طول شکستگی طی زمان‌های مختلف تزریق می‌باشد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر در ابعاد شکاف در انتهای شکستگی حاصل شده است و نقاط میانی دارای شیب تغییرات ملایمی هستند و نوک شکستگی در انتهای زمان تزریق در فاصله ۳۵ متری از نقطه تزریق واقع می‌باشد. نکته قابل ذکر دیگر این است که افزایش بازشدگی شکاف باعث افزایش طول آن نسبت به زمان می‌شود.



شکل ۹. نمودار تغییرات بازشدگی در راستای طول شکستگی در زمان‌های مختلف تزریق.

#### ۴.۲.۴. تغییرات فشار سیال داخل شکستگی

ورود سیال به داخل شکستگی سبب افزایش فشار منفذی اطراف شکاف می‌شود. فشار منفذی خود از عوامل اصلی پیشرفت شکاف می‌باشد چرا که با افزایش فشار منفذی بنابر نظریه ترزاقی تنش موثر کاهش پیدا می‌کند و با افزایش بیشتر فشار منفذی تنش موثر کاهش یافته تا جایی که برابر با مقاومت کششی سنگ می‌شود و به واسطه‌ی نیروی سیال

پارامتر  $\alpha_k (\delta_{\alpha k} = |\Delta \delta_k| / \delta_k)$  به عنوان تابع حساسیت تعریف می‌شود.

$$S_k(\alpha_k) = \frac{\frac{|\Delta p|}{p}}{\frac{|\Delta \alpha_k|}{\alpha_k}} = \left| \frac{\Delta p}{\Delta \alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{p} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

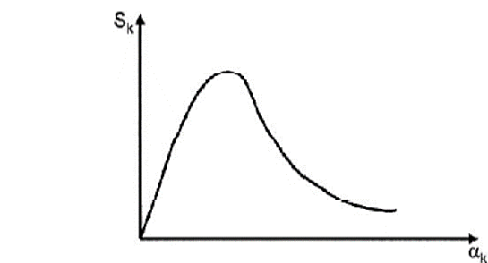
وقتی  $|\Delta \alpha_k| / \alpha_k$  کوچک باشد، تابع  $S_k(\alpha_k)$  می‌تواند به صورت زیر تقریب زده شود:

$$S_k(\alpha_k) = \left| \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{p} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

از رابطه **Error! Reference source not found.** منحنی

تابع حساسیت  $\alpha_k$  به دست می‌آید که در شکل ۱۱ دیده می‌شود. با تعیین  $\alpha_k^* = \alpha_k^*$  فاکتور حساسیت  $S_k^*$  پارامتر  $\alpha_k$  به دست می‌آید:

$$S_k^* = S_k(\alpha_k^*) = \left| \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right| \frac{\alpha_k^*}{p} = \alpha_k^* = \alpha_k^* \frac{\alpha_k^*}{p} \quad (15)$$



شکل ۱۱. منحنی تابع حساسیت (Zhao & Zhu, 2003).

که  $S_k^*$  و  $k$  گروهی از اعداد حقیقی بی‌بعد و مثبت است. مقادیر بزرگ‌تر  $S_k^*$  نشان‌دهنده حساسیت بیشتر  $p$  به  $\alpha_k$  می‌باشد. بر اساس مقایسه بین مقادیر مختلف  $S_k^*$  می‌توان ارزیابی از حساسیت پارامترهای مختلف داشت (Zhao & Zhu, 2003).

#### ۴.۳.۲. نتایج تحلیل حساسیت

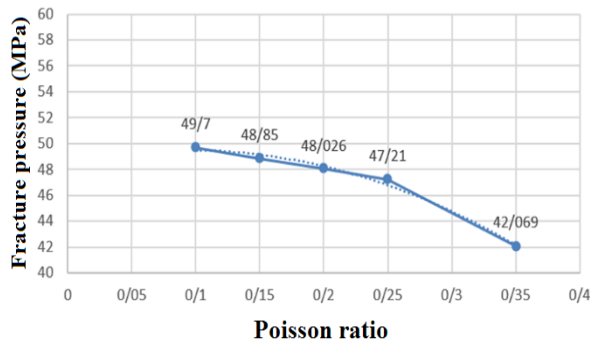
پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفتند، عبارتند از عبارتند از مدول یانگ (E)، نسبت پواسون ( $\nu$ )، مقاومت کششی ( $T_0$ )، سختی شکستگی (K) و ضریب نرخ نشت سیال تزریقی (c). با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها، رابطه هر یک از آنها با فشار شروع شکست هیدرولیکی به عنوان معیاری

به دلیل آنکه در اندازه‌گیری‌های ژئومکانیکی نمی‌توان مقادیر دقیقی را به عنوان معرف برای ویژگی‌های مقاومتی و مکانیکی ماده سنگ ارائه نمود لذا همواره یک عدم قطعیتی در هنگام تخصیص ویژگی‌های مواد به مدل‌های ساخته شده در روش‌های عددی وجود خواهد داشت و از آنجایی که مدل ارائه شده در این تحقیق کاملاً مصنوعی می‌باشد فلذا نیاز به انجام یک مرحله تحلیل حساسیت بیش از پیش احساس می‌شود. بدین منظور با ثابت نگه داشتن پارامترهای ورودی و تغییر یک پارامتر مشخص به بررسی تاثیر این پارامترها بر روی فشار شروع شکست پرداخته می‌شود. مدلی که در بخش قبلی ارائه شد را به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته و در هر مرتبه نحوه تاثیر تغییر یک پارامتر (در حالیکه سایر پارامترها همانند مدل مبنا می‌باشند) بر روی فشار شروع شکست بررسی می‌شود. پارامترهای ورودی مورد بررسی عبارتند از: مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت کششی، سختی شکستگی و نرخ نشت سیال تزریقی که در ادامه نتایج مربوط به هر کدام توضیح داده می‌شوند.

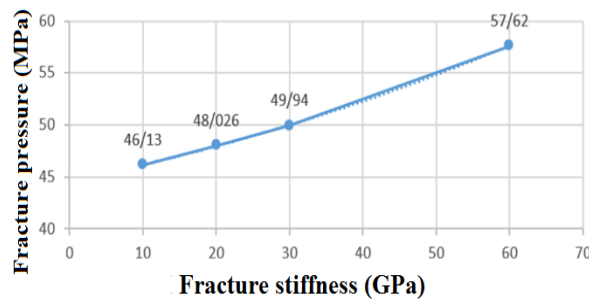
#### ۴.۳.۱. روش انجام تحلیل حساسیت

روش تحلیل حساسیت روشی برای بررسی پایداری سیستم است. در سیستمی که ویژگی  $p$  توسط  $n$  فاکتور کنترل می‌شود؛  $p = f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n), \alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$  تحلیل حساسیت با تغییر هر یک از فاکتورهای بالا، در محدوده ممکن تغییرات آن و سپس تحلیل تمایل و حدودی است که ویژگی سیستم،  $P$ ، از مقدار پایه خود بدلیل تغییرات فاکتورها نشان می‌دهد.

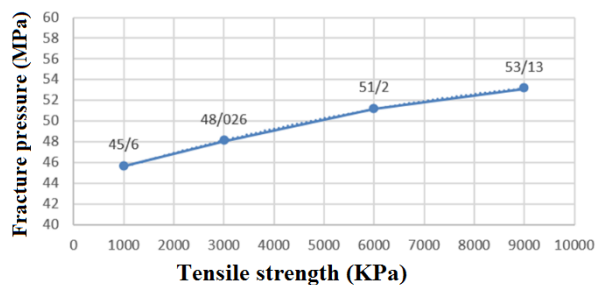
اولین قدم در تحلیل حساسیت، پایه‌ریزی مدل سیستم است، که همان ارتباط تابعی بین ویژگی‌ها و فاکتورهای سیستم  $p = f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$  می‌باشد. این رابطه باید، در صورت امکان، توسط عبارات تحلیلی بیان شود. در مورد یک سیستم پیچیده، رابطه می‌تواند توسط روش‌های عددی بیان شود. در تحلیل بدون بعد، تابع حساسیت و فاکتور حساسیت توسط عبارات بی‌بعد بیان می‌شوند. نسبت خطای نسبی ( $\delta_p$ ) ویژگی سیستم  $p$  به خطای نسبی  $p(\delta_p = |\Delta p|/p)$



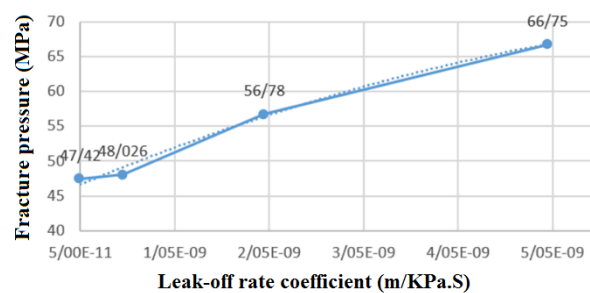
شکل ۱۳. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب نسبت پواسون (ν).



شکل ۱۴. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب سختی شکستگی (K).



شکل ۱۵. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مقاومت کششی (T<sub>0</sub>).



شکل ۱۶. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب نرخ نشت سیال تزریقی (c).

برای بررسی حساسیت هر کدام از پارامترها بررسی شده است.

روند تحلیل حساسیت برای هر یک از پارامترها در ادامه ارائه شده است. شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودارهای به دست آمده از تحلیل عددی برای مدول یانگ، نسبت پواسون، سختی شکستگی، مقاومت کششی و ضرایب نشت مختلف را به همراه روابط به دست آمده نشان می‌دهند. اولین نتیجه‌ای که با توجه به این شکل‌ها می‌توان گرفت این است که افزایش همه پارامترها به غیر از نسبت پواسون باعث افزایش فشار شروع شکست می‌شود.

روابط **Error! Reference source not found.** تا **Error! Reference source not found.** ارتباط فشار شروع شکست را با هر یک از پارامترها بر اساس بهترین منحنی برازش شده از داده‌های حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد:

$$p_{LOP} = 0.1817 E + 42.536 \quad (R^2 = 0.997) \quad (16)$$

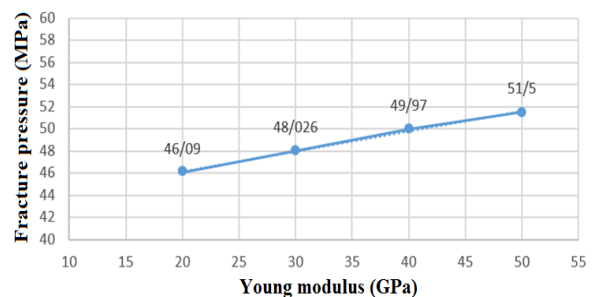
$$p_{LOP} = -112.21 \nu^2 + 21.214 \nu + 48.495 \quad (R^2 = 0.989) \quad (17)$$

$$p_{LOP} = 0.0013 K^2 + 0.1414K + 44.621 \quad (R^2 = 0.999) \quad (18)$$

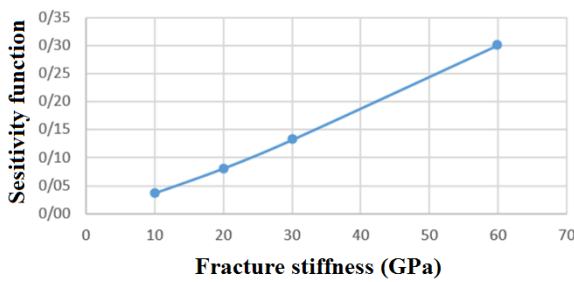
$$p_{LOP} = -5e(-8) \times T_0^2 + 0.0015 T_0 + 44.117 \quad (R^2 = 0.999) \quad (19)$$

$$p_{LOP} = -3e17 \times c^2 + 6e9 \times c + 46.377 \quad (R^2 = 0.992) \quad (20)$$

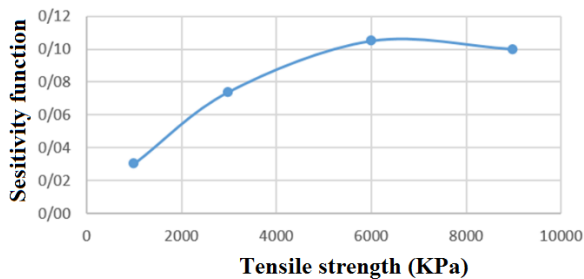
که در آنها  $p_{LOP}$  فشار شروع شکست، E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، K سختی شکستگی،  $T_0$  مقاومت کششی و c ضریب نرخ نشت سیال می‌باشد.



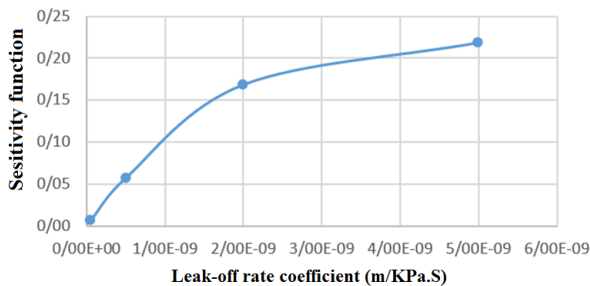
شکل ۱۷. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مدول یانگ (E).



شکل ۱۹. نمودار مربوط به تابع حساسیت سختی شکستگی (K).



شکل ۲۰. نمودار مربوط به تابع حساسیت مقاومت کششی (T<sub>0</sub>).



شکل ۲۱. نمودار مربوط به تابع حساسیت ضریب نرخ نشت سیال (c).

فاکتور حساسیت  $S_E^*$ ،  $S_V^*$ ،  $S_K^*$  و  $S_{T_0}^*$  با  $S_C^*$  قرار دادن مقادیر پایه در تابع حساسیت، به دست می‌آید و بیانگر حساسیت پارامترهای تعیین شده در هر مورد است و با مقایسه هر یک باهم می‌توان به تاثیرگذاری هر پارامتر پی برد. مقادیر فاکتور حساسیت برای پارامترهای موثر در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۳. مقادیر فاکتور حساسیت برای پارامترهای مختلف.

$S_C^*$	$S_{T_0}^*$	$S_K^*$	$S_V^*$	$S_E^*$	Sensitivity factor Value
0.065	0.074	0.088	0.098	0.113	

تابع حساسیت برای هر یک از پارامترها با توجه به رابطه

**Error! Reference source not found.** و روابط

**Error! Reference source not found.** تا

**source not found.** به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_E = \left| \frac{dp_{LOP}}{dE} \right| \frac{E}{p_{LOP}} = \frac{0.1817 E}{0.1817 E + 42.536} \quad (21)$$

$$S_V = \left| \frac{dp_{LOP}}{dv} \right| \frac{v}{p_{LOP}} = \frac{|-224.42 v^2 + 21.214 v|}{-112.21 v^2 + 21.214 v + 48.495} \quad (22)$$

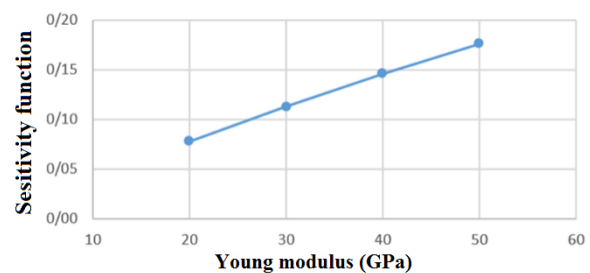
$$S_K = \left| \frac{dp_{LOP}}{dK} \right| \frac{K}{p_{LOP}} = \frac{|0.0026 K^2 + 0.1414 K|}{0.0013 K^2 + 0.1414 K + 44.621} \quad (23)$$

$$S_{T_0} = \left| \frac{dp_{LOP}}{dT_0} \right| \frac{T_0}{p_{LOP}} = \frac{|-e(-7) \times T_0^2 + 0.0015 T_0|}{-5e(-8) \times T_0^2 + 0.0015 T_0 + 44.117} \quad (24)$$

$$S_C = \left| \frac{dp_{LOP}}{dc} \right| \frac{c}{p_{LOP}} = \frac{|-6e(17) \times c^2 + 6e9 \times c|}{-3e(17) \times c^2 + 6e9 \times c + 46.377} \quad (25)$$

نمودار مربوط به تابع حساسیت نسبت به هر یک از پارامترهای مدول یانگ، نسبت پواسون، سختی شکستگی، مقاومت کششی و ضریب نرخ نشت سیال به ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است.

شکل ۱۷. نمودار مربوط به تابع حساسیت مدول یانگ (E).



شکل ۱۸. نمودار مربوط به تابع حساسیت نسبت پواسون (ν).

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳ و مقایسه آنها با یکدیگر، مشاهده می‌شود که فاکتور حساسیت پارامترهای موثر دارای مقادیر نزدیک به هم می‌باشند که در این بین بیشترین تاثیر مربوط به مدول یانگ و کمترین تاثیر نیز مربوط به ضریب نرخ نشت سیال است. پارامترهای با حساسیت بیشتر، نیازمند انجام آزمایشات بیشتر به منظور تعیین دقیق‌تر آنها هستند تا نتایج حاصل از آنها نیز صحیح باشند.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق بعد از مروری بر تاریخچه روش شکست هیدرولیکی و معرفی مدل ترک چسبنده، به شبیه‌سازی روش شکست هیدرولیکی بر پایه مفاهیم روش المان محدود و بررسی پارامترهای موثر بر آن پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شرایط معمول عملیات شکست هیدرولیکی در یک مخزن نفتی شبیه‌سازی شده و از تئوری مدل ترک چسبنده با قانون کشش-جدایش المان محدود توسعه یافته برای ایجاد و گسترش شکاف در درون مدل سه‌بعدی پوروالاستیک استفاده شده است. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج حاصل از تحقیق آورده شده است و در آخر پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق‌های آتی ارائه شده است.

✓ منحنی فشار- زمان بدست آمده از خروجی مدل نشان می‌دهد که اولاً نقاط شروع و گسترش شکستگی تقریباً باهم برابر می‌باشند و ثانياً مقدار فشار شکست بدست آمده از نمودار در مقایسه با مقادیر بدست آمده از روابط تحلیلی، خط‌هایی حدود ۱٪ برای رابطه ترزاقی و ۱۱٪ برای رابطه هیمسون و فیرهارست را شامل می‌شود که نشان از تطابق خوب نتایج عددی و روابط تحلیلی دارد.

✓ میزان تغییرات نرخ نشت سیال بر حسب زمان به سه مرحله زمانی تقسیم شد که دو مرحله زمانی اول بیان

### منابع

- آریا، م. و حسینی، م. ۱۳۹۸. "مدلسازی عددی برای تعیین عوامل موثر بر فشار شروع شکست در عملیات شکست هیدرولیکی." مجله علمی - پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران جلد دوازدهم (شماره ۱): ۵۷-۷۴.

کننده جهش در نرخ نشت سیال بوده و مرحله سوم نیز نشت سیال دینامیکی را نشان می‌دهد.

✓ پروفیل بازشدگی شکستگی در راستای شکاف نشان می‌دهد که بیشترین تغییر در ابعاد شکاف در انتهای شکستگی حاصل شده است و نقاط میانی دارای شیب تغییرات ملایمی هستند و نوک شکستگی در انتهای زمان تزریق در فاصله ۳۵ متری از نقطه تزریق واقع می‌باشد و همچنین، افزایش بازشدگی شکاف باعث افزایش طول آن نسبت به زمان می‌شود.

✓ نمودار تغییرات فشار منفذی در راستای طول شکستگی برای زمان‌های آغاز و اتمام تزریق سیال نشان داد که مقادیر فشار منفذی با افزایش زمان تزریق، بیشتر شده و با فاصله گرفتن از نقطه تزریق (با افزایش طول شکستگی) کاهش یافته و در نهایت به میزان فشار منفذی اولیه مدل می‌رسد.

✓ در فاصله ۳۰ الی ۴۰ متری از نقطه تزریق فشار سیال داخل شکاف از فشار منفذی اولیه مخزن کمتر می‌باشد که این امر ناشی از پدیده تاخیر سیال بوده و دلیل آن نیز فاصله ایست که بین محل جبهه حرکت سیال شکست و محل راس شکستگی به وجود می‌آید.

✓ نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش همه پارامترها به جز نسبت پواسون، فشار شروع شکست نیز بیشتر می‌شود. همچنین با محاسبه تابع حساسیت و فاکتور حساسیت برای هر یک از پارامترها مشخص شد که از میان پارامترهای مورد بررسی، مدول یانگ بیشترین و ضریب نرخ نشت سیال کمترین تاثیر را بر روی فشار شروع شکست دارد.

صادقی، ع.، نیکودل، م.، و پهلوان، ب. ۱۳۹۴. "ارزیابی مقاومت کششی با استفاده از نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی و مقایسه آن با مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه ای: مطالعه موردی (سازند آسماری)". مجله علمی-پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران جلد هشتم (شماره ۳ و ۴): ۶۵-۸۰.

طاهری شکیب، ج.، قادری ع. و جلالی فر، ح. ۱۳۹۲. آنالیز رشد و توسعه شکاف هیدرولیکی در مخازن شکافدار. کتاب آوا.

هیرمند، م. ر.، ۱۳۹۲. مدل سازی گسترش شکست هیدرولیکی در محیط متخلخل اشباع ترک خورده طبیعی به روش المان محدود توسعه یافته پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران.

- ABAQUS, 2011. Cohesive Elements. Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.11-1.
- Aghighi, M. A., Valencia, K. J. L., Chen, Z., & Rahman, S. S., 2006. An Integrated Approach to the Design and Evaluation of Hydraulic Fracture Treatments in Tight Gas and Coalbed Methane Reservoirs. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Asadi, S., Bohlooli, B., & Malekijavan, M., 2012. Numerical Investigation of Fracture Initiation And Propagation of Hydraulic Fracturing Based On Fracture Mechanics. Paper presented at the ISRM International Symposium-EUROCK 2012.
- Barenblatt, G. I., 1962. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics*, 7(1), 55-129.
- Carrier, B., & Granet, S., 2012. Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model. *Engineering fracture mechanics*, 79, 312-328.
- Chandra, N., Li, H., Shet, C., & Ghonem, H., 2002. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 39(10), 2827-2855.
- Chen, Z., 2012. Finite element modelling of viscosity-dominated hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88, 136-144.
- Chen, Z., Bunger, A., Zhang, X., & Jeffrey, R. G., 2009. Cohesive zone finite element-based modeling of hydraulic fractures. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(5), 443-452.
- Dugdale, D., 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100-104.
- Espinosa, H. D., & Zavattieri, P. D., 2003. A grain level model for the study of failure initiation and evolution in polycrystalline brittle materials. Part I: Theory and numerical implementation. *Mechanics of Materials*, 35(3), 333-364.
- Ghassemi, A., Zhou, X., & Rawal, C., 2013. A three-dimensional poroelastic analysis of rock failure around a hydraulic fracture. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 118-127.
- Guo, B., Lyons, W. C., & Ghalambor, A., 2011. *Petroleum production engineering, a computer-assisted approach*: Gulf Professional Publishing.
- Hillerborg, A., Modéer, M., & Petersson, P.-E., 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research*, 6(6), 773-781.
- Ji, L., 2008. Modeling Hydraulic Fracturing Fully Coupled with Reservoir and Geomechanical Simulation: ProQuest.
- Kachanov, L., 1958. Time of the rupture process under creep conditions. *Isv. Akad. Nauk. SSR. Otd Tekh. Nauk*, 8, 26-31.
- Needleman, A., 1987. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. *Journal of applied mechanics*, 54(3), 525-531.
- Peška, P., & Zoback, M. D., 1995. Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ stress and rock strength. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 100(B7), 12791-12811.
- Saberhosseini, S. E., Keshavarzi, R., & Ahangari, K., 2014. A new geomechanical approach to investigate the role of in-situ stresses and pore pressure on hydraulic fracture pressure profile in vertical and horizontal oil wells. *Geomechanics and Engineering*, 7, 233-246.
- Sarris, E., & Papanastasiou, P., 2011. The influence of the cohesive process zone in hydraulic fracturing modelling. *International Journal of Fracture*, 167(1), 33-45.

- 
- Song, S. H., Paulino, G. H., & Buttlar, W. G., 2006. A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(18), 2829-2848.
- Wang, H. F., 2000. *Theory of linear poroelasticity*. Princeton Series in Geophysics, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Wangen, M., 2011. Finite element modeling of hydraulic fracturing on a reservoir scale in 2D. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77(3), 274-285.
- Zhang, J., Biao, F., Zhang, S., & Wang, X., 2012. A numerical study on horizontal hydraulic fracture. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2(1), 7-13.
- Zhao, J., & Zhu, W. (2003). *Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks (Vol. 1)*: Elsevier.