

(مقاله پژوهشی)

## مدل‌سازی عددی سه‌بعدی شکست هیدرولیکی: بررسی تأثیر زمان، نرخ تزریق و ویسکوزیته سیال

ابوالفضل هفت‌آبادی<sup>۱</sup>، شکراله زارع<sup>\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران  
(دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰، پذیرش: آبان ۱۴۰۰)

### چکیده

شکست هیدرولیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های تحریک مخزن دارای پیچیدگی‌های خاصی است. از آنجاکه این عملیات بسیار هزینه‌بر و حساس است، انجام آن نیازمند یک طراحی دقیق بوده و لازمه طراحی عملیات، آگاهی از میزان رشد شکاف در نرخ‌های تزریق مختلف و پارامترهای هندسی شکاف در شرایط متفاوت است؛ بنابراین مدل‌سازی سه‌بعدی تنها راه به دست آوردن این مجهولات با بالاترین دقت است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و بر پایه روش ناحیه چسبناک، یک مدل سه‌بعدی غیرخطی کوپله سیال-جامد ایجاد شده است. این عملیات در یک چاه قائم به وسیله این مدل شبیه‌سازی شده است. در ساخت این مدل از گزارش‌های فنی و نیز تست‌های آزمایشگاهی و برجای انجام شده، در مخزن و چاه مدنظر استفاده شد. از ویژگی‌های این مدل‌سازی می‌توان به مقیاس میدانی آن اشاره کرد. پس از تزریق سیال هندسه شکستگی تحت نرخ‌ها و ویسکوزیته‌های مختلف سیال تزریق‌شده مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده با افزایش مدت تزریق و همچنین نرخ پمپاژ طول شکستگی افزایش می‌یابد و حداکثر طول ایجاد شده برای سیال با ویسکوزیته یک سانتی‌پواز در زمان تزریق ۵ دقیقه با نرخ ۳۵ بشکه در دقیقه یا در زمان تزریق ۱۸ دقیقه و با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه حدود ۲۲ متر است. درحالی‌که حداکثر ارتفاع شکستگی حدود ۷۰ متر است. به علت اختلاف کم تنش برجای شکست هیدرولیکی بیشتر تمایل به رشد ارتفاعی دارد. همچنین حداکثر بازشدگی شکستگی حدود ۹ میلی‌متر است. افزایش ویسکوزیته سیال موجب افزایش بازشدگی و تا حدودی باعث بیشتر شدن طول شکستگی می‌شود. درنهایت هندسه شکاف پس از شروع و گسترش شکاف تحت نرخ‌ها و ویسکوزیته‌های مختلف سیال شکاف مورد مطالعه قرار گرفت.

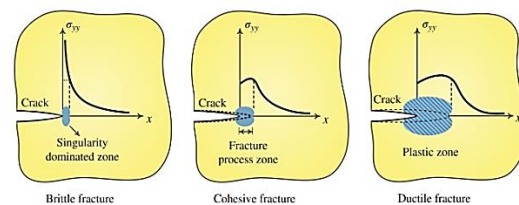
### کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی سه‌بعدی، روش ناحیه چسبناک، نرخ تزریق سیال، ویسکوزیته سیال

\* عهده‌دار مکاتبات: zare@shahroodut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در برخی از مخازن به دلیل نبود تراوایی کافی تولید نفت و گاز بسیار پایین است. در اطراف هر چاه در اثر اجرای عملیات حفاری، یک منطقه با تراوایی کم ایجاد می‌شود و همچنین با افزایش عمر چاه میزان برداشت کاهش می‌یابد. شکست هیدرولیکی در چاه‌های نفت و گاز به‌عنوان یک روش مناسب و مؤثر در افزایش میزان استخراج منابع هیدروکربوری گسترش روزافزونی یافته است. با انجام این عملیات می‌توان هدایت سیال درون مخزن به چاه را افزایش داد. شکست هیدرولیکی در صورت اجرای صحیح می‌تواند جز کم‌هزینه‌ترین روش‌های افزایش تولید حداکثری از مخازن باشد. جلوگیری و کاهش حفر چاه‌های جدید با استفاده از این عملیات با افزایش دامنه تأثیر چاه‌های پیشین از دیگر کاربردهای این روش در صنعت نفت است [۱]. با توجه به پیچیدگی‌های فرایند شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی‌های متنوعی برای یافتن نزدیک‌ترین پیش‌بینی‌ها از مشخصات واقعی شکستگی صورت گرفته است. برای بررسی زمان شروع شکستگی و گسترش آن در سنگ می‌توان از روش‌های مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)، روش ناحیه چسبنده<sup>۱</sup> و معیارهای پلاستیک استفاده کرد. شکل ۱ مدل‌های مختلف پیش‌بینی و گسترش ترک را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طبقه‌بندی شکست سنگ در مکانیک شکست [۲]

روش مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) فرض می‌کند ناحیه پلاستیک شده و ناحیه سخت شونده جلوی ترک، هر دو اندازه بسیار کوچکی دارند در واقع می‌توان از اثر آن‌ها صرف‌نظر نمود. به همین دلیل می‌توان فرض نمود تمام ماده موردنظر تا لحظه گسیختگی در حالت الاستیک باقی می‌ماند. ترک‌خوردگی در این مواد ناگهانی بوده و اندازه ترک بسیار طولانی خواهد بود. از جمله این مواد ترد می‌توان به شیشه اشاره کرد [۲]. همان‌طور که ذکر شد در مکانیک شکست الاستیک خطی رفتار ماده تا لحظه گسیختگی به صورت الاستیک باقی می‌ماند. این رفتار

الاستیک تا حد مشخصی ادامه خواهد داشت. در مسائل گسترش ترک، چنانچه از LEFM استفاده شود، این حد مشخص مقاومت کششی ماده خواهد بود؛ یعنی ماده از لحظه بارگذاری تا قبل از رسیدن به مقاومت کششی خود، الاستیک است و به محض رسیدن مقدار نیروی کششی به حد نهایی مقاومت ماده، ترک ایجاد خواهد شد. در رفتار پلاستیک فرض می‌شود ناحیه سخت شونده در جلوی ترک بسیار بزرگ‌تر از ناحیه نرم شونده است. این مواد مانند فلزات رفتار نموده و ترک‌خوردگی در آن‌ها به آرامی اتفاق می‌افتد. معیارهای پلاستیک می‌تواند برای این مواد استفاده شود [۲]. چنانچه رفتار بینابینی وجود داشته باشد که در آن ماده نه کاملاً الاستیک باشد و نه کاملاً پلاستیک باشد، باید از روش دیگری برای مدل‌سازی استفاده نمود. چنانچه ناحیه نرم شونده در جلوی ترک بزرگ‌تر از ناحیه سخت شونده باشد، رفتار ماده شبه ترد<sup>۲</sup> است. ترک‌خوردگی در اکثر سنگ‌ها در این زمره قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی این نوع رفتار از مدل ترک چسبنده<sup>۳</sup> یا ناحیه چسبنده استفاده می‌شود [۲]. به‌طور کلی به افت مقاومت نوک ترک بر اثر افزایش بازشدگی و جدایش ترک، قانون چسبندگی<sup>۴</sup> گویند [۴،۳]. روش‌های عددی مختلفی برای مدل‌سازی عملیات شکست هیدرولیکی وجود دارد مانند روش تفاضل‌های محدود<sup>۵</sup>، روش اجزای محدود<sup>۶</sup>، روش اجزای مجزا<sup>۷</sup>، روش توسعه‌یافته<sup>۸</sup>، روش اجزای منفصل<sup>۹</sup>، روش جابه‌جایی مجزا<sup>۱۰</sup>، مشهورترین روش مدل‌سازی عددی، روش اجزای محدود (FEM) است. گرچه این روش در همه موارد نمی‌تواند پیچیدگی‌های مسئله را در نظر بگیرد. در صورتی که حل مسئله شامل برخی رفتارهای غیریکنواخت و غیر هموار مانند برخی نقاط تکنیکی در تنش‌ها یا کرنش‌ها باشد، یا چنانچه تغییرات زیاد در جابه‌جایی‌ها مانند ترک موجود باشد، FEM کارایی لازم را ندارد. در چنین شرایطی استفاده از روش اجزای محدود باعث افزایش هزینه مدل‌سازی می‌شود [۵،۶]. مدل‌سازی فرآیند شکست هیدرولیکی با استفاده از FEM به صورت‌های زیر امکان‌پذیر است:

- در مش‌بندی یک لایه چسبنده تعریف شود تا ترک در مسیر موردنظر رشد کند بنابراین حل مسئله وابسته به مش است.
- ترک از بین‌المان‌ها حرکت کند، بنابراین کاملاً وابسته به شکل مش‌بندی خواهد بود.

مکانیکی در محیط متخلخل با ترک های مجزا پرداختند [۱۶]. گوردلی و پریس<sup>۳۳</sup> به بررسی تخمین گسترش شکست الاستیک در فرایند شکست هیدرولیکی در محیط الاستیک با XFEM پرداختند [۱۷]. محمدنژاد و خوئی به بررسی تحلیل همبسته تغییر شکل محیط متخلخل در تعامل با دو سیال مخلوط نشدنی و تراکم پذیر پرداختند [۱۸]. محمدنژاد و خوئی به توسعه مدل XFEM که شامل جریان سیالات ترک کننده و غیرترک کننده حفره ای بود، در محیط متخلخل اشباع پرداختند [۱۹]. همچنین آن ها نتایج حل عددی XFEM و حل تحلیلی روش KGD را مقایسه کردند. نتایج حل عددی اختلاف زیادی با نتایج حل تحلیلی دارد. دلیل این اختلاف این است که حل تحلیلی KGD مقادیر فشار سیال را همیشه دست پایین تر از مقادیر واقعی محاسبه می کند [۲۰-۲۲].

خوئی و وهاب شبیه سازی دینامیکی رفتار هیدرولیکی- مکانیکی ترک در محیط متخلخل با مودهای بازشدگی و بسته شدگی، در چهارچوب XFEM که به صورت همبسته هیدرولیکی- مکانیکی بود را مورد مطالعه قرار دادند [۲۳]. محمدنژاد و آندراده<sup>۳۴</sup> با حل همبسته جریان در داخل ترک، تغییر شکل محیط اطراف، نشت از دیواره های ترک و گسترش ترک با استفاده از روش XFEM فرآیند شکست هیدرولیکی را مدل سازی نمودند [۲۴]. خدابخش نژاد الگوریتم جدیدی برای مدل سازی شروع و رشد ترک توسعه داد و با استفاده از تحلیل هیدرومکانیکی توانست تغییرات فشار در محیط متخلخل را به خوبی مدل سازی کند. او در این پژوهش اندازه گیری فشار را با استفاده از تفاضل های محدود (FDM)، تغییرات تنش ها و تغییر شکل ها را با استفاده از XFEM انجام داده است [۲۵].

هدف همه روش ها و مدل های ارائه شده، تعیین هندسه ترک های به وجود آمده ناشی از فرآیند شکست هیدرولیکی است [۲۶]؛ بنابراین شناخت عوامل اثرگذار در هندسه شکستگی ها و عوامل مؤثر در میزان بهره وری مخزن، مهم ترین پارامترها در این فرایند محسوب می شوند. در همین راستا فیششر<sup>۲۵</sup> و همکاران به بررسی اثر طول ترک ها بر میزان بهره وری مخزن پرداختند [۲۷]. لولون<sup>۲۶</sup> و همکاران به بررسی اثر سوراخ کاری یا مشبک کاری بر میزان بهره وری پرداختند [۲۸]. در مطالعه ای مشابه سپولا<sup>۲۷</sup> و همکاران به بررسی اثر فاصله سوراخ ها و نفوذ پذیری ترک ها

• مش بندی به قدری ریز باشد تا ترک بتواند در مسیر دلخواه از بین المان ها حرکت نماید که در این صورت هزینه مدل سازی زیاد خواهد بود.

• در هر مرحله از رشد ترک، مش بندی به روز شود و هندسه آن با توجه به جهت پیش روی ترک در نظر گرفته شود که در این حالت هم هزینه مدل سازی زیاد خواهد بود. علاوه بر این خطای محاسبات به علت لزوم انتقال حجم عظیمی از داده ها بین مش-ها افزایش می یابد.

برای جبران این نقاط ضعف در FEM، اجزا محدود توسعه یافته به وجود آمد. در XFEM ایده اصلی، توسعه FEM با استفاده از یک سری توابع غنی سازی<sup>۱۱</sup> است تا بتواند ناپیوستگی در تنش ها، کرنش ها و جابه جایی ها را در نظر بگیرد. این توابع غنی سازی در XFEM به صورت محلی<sup>۱۱</sup> به المان ها اعمال شده و در نتیجه در XFEM دیگر نیازی به مش بندی مجدد<sup>۱۲</sup> نیست. البته از این نکته نباید غافل شد که هزینه مدل سازی با استفاده از XFEM و لایه چسبنده، بیشتر از هزینه مدل سازی با استفاده از FEM و لایه چسبنده است. دلیل این امر هم این است که در اجزا محدود توسعه یافته، در اطراف محل ترک خوردگی، باید از المان های کوچک تری استفاده نمود [۷]. مدل سازی ترک با XFEM اولین بار توسط بلیتشکو و بلک<sup>۱۳</sup> با استفاده از اعمال توابع غنی سازی به گره های اطراف ترک، انجام شد [۸]. موئس<sup>۱۴</sup> و همکاران با اعمال تابع هویساید<sup>۱۵</sup> به بدنه ترک و تابع برنج<sup>۱۶</sup> به نوک ترک موفق به جداسازی هندسه ترک از مش شدند [۹]. دائوکس<sup>۱۷</sup> و همکاران با معرفی تابع اتصال<sup>۱۸</sup> اثر تقاطع ترک ها را در نظر گرفتند [۱۰]. سوکومار<sup>۱۹</sup> و همکاران XFEM را در فضای سه بعدی استفاده نمودند [۱۱]. موئس و همکاران XFEM را برای ترک های دلخواه غیر صفحه ای توسعه دادند [۱۲]. بودین<sup>۲۰</sup> و همکاران XFEM را برای تعامل و رشد ترک ها در هر دو محیط همسان و ناهمسان برای مواد ترد استفاده کردند [۱۳]. زی<sup>۲۱</sup> و همکاران توابع غنی سازی ساده تری را برای XFEM ارائه کردند [۱۴]. با توجه به قابلیت های فراوان XFEM این روش برای مدل سازی شکست هیدرولیکی نیز مورد استفاده بوده است. خوئی و همکاران XFEM را برای بررسی مدل همبسته THM در مدل سازی ناپیوستگی های نفوذناپذیر در محیط متخلخل اشباع استفاده کردند [۱۵]. واتانابه<sup>۲۲</sup> و همکاران به بررسی مدل همبسته هیدرولیکی-

مقاومت کششی سنگ، مدول الاستیسیته، لزجت سیال، ضریب پواسون و ضریب نشت بر مشخصه‌های شکست هیدرولیکی پرداخته‌اند [۴۰]. مهرگینی و همکاران با استفاده از FEM به مطالعه اثر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، ضریب بزرگ‌نمایی تنش<sup>۲۵</sup>، چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کششی سنگ پرداخته‌اند [۴۱]. فنگ و گری<sup>۲۶</sup> به مطالعه اثر زاویه مشبک‌کاری و طول ترک اولیه پرداخته‌اند [۴۲]. کریر و گرانت<sup>۲۷</sup> با استفاده از FEM و با استفاده از مدل CZM به مقایسه جواب‌ها در حالات حدی سختی غالب، لزجت غالب، نشت غالب و ذخیره غالب پرداخته‌اند [۴۳].

روش اجزا محدود توسعه‌یافته در بررسی اثر سایه تنش و مشبک‌کاری می‌تواند بسیار کارآمد باشد؛ یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که باید در هنگام بررسی اثر این دو مؤلفه در نظر گرفته شود، راستا، شکل رشد ترک و همچنین دیگر مشخصه‌های ترک‌های مجاور است. چنانچه از روش‌های عددی دیگر (از قبیل FEM) استفاده شود، نمی‌توان جهت دلخواه رشد ترک را بررسی نمود؛ زیرا در آن‌ها مسیر حرکت ترک مشخص است؛ اما با توجه به این‌که در XFEM مسیر گسترش ترک دلخواه است، می‌توان به‌خوبی اثر مشبک‌کاری و سایه تنش را مورد مطالعه قرار داد. پارامتر دیگری که می‌توان در بررسی اثر مشبک‌کاری مورد مطالعه قرار داد، اثر تنش‌های برجای محیط است. به‌عنوان نمونه چنانچه جهت ایجاد ترک اولیه عمود بر جهت تنش حداقل محیط نباشد، می‌توان طول مسیر چرخش ترک و قرار گرفتن در راستای عمود بر تنش حداقل محیط، شعاع چرخش و دیگر مشخصه‌های ترک را مطالعه کرد. در این حالت می‌توان طول ترک اولیه را نیز مطالعه نمود [۴۴]. با توجه به مطالعات ذکرشده در زمینه مدل‌سازی عددی فرآیند شکست هیدرولیکی و مطالعه اثر پارامترهای مختلف روی آن، در این پژوهش به مطالعه اثر زمان تزریق، نرخ تزریق سیال و ویسکوزیته سیال، با استفاده از روش عددی XFEM و لایه چسبنده در نرم‌افزار آباکوس، پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- قوانین حاکم بر المان‌های چسبنده

المان اجزا محدود چسبنده در ابتدا توسط بارنبلت<sup>۲۸</sup> و هیلبرورگ<sup>۲۹</sup> برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها توسعه پیدا کرد.

بر عملکرد چاه‌های افقی پرداخته‌اند [۲۹]. چن<sup>۲۸</sup> و همکاران با مدل‌سازی ترک هیدرولیکی با FEM به بررسی اثر طول ناحیه چسبنده، مقاومت کششی سنگ مخزن و لزجت سیال پرداخته‌اند [۳۰]. یائو<sup>۲۹</sup> و همکاران به مطالعه اثر سختی شکست و مدول الاستیسیته سنگ، نرخ تزریق، ضریب نشت و لزجت سیال با استفاده از FEM با کمک نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند [۲]. ساریس و پاپاناستاسیو<sup>۳۰</sup> به مطالعه اثر سختی لایه چسبنده، اثر تنش‌های برجا در محیط‌های صلب و متخلخل پرداخته‌اند. همچنین در این پژوهش با در نظر گرفتن رفتار نمایی<sup>۳۱</sup> و ضرایب مختلف توانی، اثر رفتار CZM در محیط متخلخل بررسی شده است. این پژوهش با استفاده از FEM صورت گرفته است [۳۱]. خوئی و محمدنژاد به مطالعه اثر نفوذپذیری مطلق، دبی تزریق و لزجت سیال پرداخته‌اند [۱۹]. اوشولاکه<sup>۳۲</sup> به بررسی عددی اثر تراکم سیال درون مخزن پرداخت [۳۲]. شین<sup>۳۳</sup> با ارائه یک مدل عددی به بررسی اثر مدول الاستیسیته، فاصله سوراخ‌ها، تعداد سوراخ‌ها در هر مرحله مشبک‌کاری، دبی سیال ورودی و مدل رئولوژیک سیال ورودی پرداخت [۳۳]. حداد و سپهرنوری به مطالعه اثر نرخ تزریق، لزجت سیال، ضریب نشت، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون با استفاده از FEM و با تکنیک CZM پرداخته‌اند [۳۴]. حمیدی و مرتضوی به مطالعه اثر نسبت تنش‌های حداکثر به حداقل افقی در گسل‌های لغزشی، نرمال و معکوس، اثر زاویه اصطکاک سنگ، اثر مدول الاستیسیته، چسبندگی درزه و لزجت سیال در ترک با استفاده از روش DDM و با کمک نرم‌افزار UDEC پرداخته‌اند [۳۵]. حداد و سپهرنوری با مدل‌سازی شکست هیدرولیکی با XFEM و استفاده از ناحیه چسبنده، به بررسی اثر مشبک‌کاری، اثر تنش افقی بیشینه و اثر سایه تنش پرداخته‌اند [۳۶]. یائو و همکاران با استفاده از FEM و لایه چسبنده، به بررسی اثر مدول الاستیسیته، سختی لایه چسبنده، ضریب نشت و اثر رفتار پلاستیک سنگ پرداخته‌اند [۳۷]. وانگ<sup>۳۴</sup> و همکاران با استفاده از XFEM و CZM به بررسی اثر ایجاد ترک‌های کنار هم به‌صورت متوالی و یک در میان، اثر سایه تنش و اثر تنش‌های برجا افقی پرداخته‌اند [۳۸]. همچنین وانگ با استفاده از XFEM و ناحیه چسبنده، اثر مدول الاستیسیته و اثر جهت و آزیموت چاه نفت را در مدل‌سازی بررسی نموده است [۳۹]. حسینی و همکاران به مطالعه اثر سختی شکست،

مدل زون چسبنده فشار منفذی برای پیش بینی توسعه شکست هیدرولیکی چاه های تزریقی توسعه یافته است. روش ناحیه چسبنده یک ابزار عددی برای مدل سازی آغاز شکست و رشد آن در مواد نیمه شکننده است. در این روش، شکستگی به عنوان یک فرآیند تدریجی در نظر گرفته می شود که در آن جدایش میان سطوح مواد اولیه با کشش چسبنده محدود می شود. مدل ناحیه چسبنده (CZM) می تواند از مقیاس ماکرو تا میکرو استفاده شود، مدل می تواند همه فرآیند شکستگی از آغاز شکست تا رشد آن را برای هر هندسه و تحت هر بار اعمالی پیش بینی کند [۴۵-۴۷]. قانون زون چسبنده رابطه بین تانسور کشش T و جابجایی  $\delta$  بین دو سطح چسبیده به هم را تعریف می کند. با تعریف تابع پتانسیل چسبندگی  $\phi$ ، تانسور کشش به صورت شکل ۲ نشان داده می شود. انواع مختلفی از روابط کشش- جدایش برای مدل سازی شکست در مواد مختلف ارائه شده است. در این اینجا رفتار المان های چسبنده به وسیله قانون چسبندگی خطی برگشتناپذیر تعریف شده است. با توجه به شکل ۲، رفتار المان قبل از آغاز شکست به صورت خطی بوده و با رسیدن تانسور کشش T به میزان مشخص  $T_{max}$  که منطبق بر میزان جدایش است سطوح جانبی المان شروع به جدایش کرده و تانسور کشش تا رسیدن به مقدار صفر کاهش می یابد.

سختی مواد پس از شروع شکست است. بدین منظور متغیر اسکالر شکست (D)، نشانگر آسیب کلی در ماده است. در ابتدا مقدار آن صفر ولی با آغاز شکست و بارگذاری بیشتر مقدار آن به طور یکنواخت از صفر به یک می رسد. مؤلفه های تنش در مدل کشش- جدایش تحت تأثیر شکست قرار می گیرند و به صورت رابطه (۲) تعریف می شوند:

$$t_n = \begin{cases} (1-D)t_n' & t_n' \geq 0 \\ t_n' & \text{otherwise (بدون شکست)} \end{cases} \quad (2)$$

$$t_s = (1-D)t_s'$$

$$t_t = (1-D)t_t'$$

در رابطه (۲)  $t_n'$ ،  $t_s'$  و  $t_t'$  مؤلفه های تنش پیش بینی شده توسط رفتار کشش- جدایش الاستیک برای کرنش های فعلی بدون شکست هستند. در حالت نرم شونده خطی، متغیر رشد شکست D به صورت رابطه (۳) بیان می شود:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (3)$$

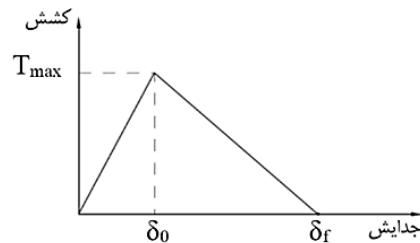
در رابطه (۳)  $\delta_m^f$  برآیند جابجایی مؤثر در شکست کامل،  $\delta_m^0$  برآیند جابجایی در آغاز شکست و  $\delta_m^{max}$  حداکثر جابجایی مؤثر در طول بارگذاری است. با تزریق سیال هم بازشدگی ایجاد و هم طول شکستگی گسترش می یابد. جابجایی مؤثر زمانی داریم که شکست کاملاً اتفاق افتاده است و در آغاز شکست بیشترین کشش وجود دارد.

## ۲-۲- جریان سیال درون شکستگی

از مزایای المان های چسبناک، توانایی مدل سازی جریان سیال است که در شکل ۳ نشان داده شده است. جریان سیال در المان های چسبنده به دو صورت مماسی و نرمال است. جریان مماسی می تواند سیال نیوتونی را مدل سازی کند و توصیف کننده حرکت روبه جلو سیال در شکستگی باشد. جریان نرمال میزان هدرروی سیال به درون سازند را مدل سازی می کند. با توجه به این که در این تحقیق سیال به صورت نیوتونی فرض شده جریان مماسی در المان چسبناک به صورت رابطه (۴) بیان می شود.

$$-qd = k_t \nabla p \quad (4)$$

که  $k_t$  نفوذپذیری مماسی (مقاومت در برابر جریان سیال در شکاف)،  $\nabla p$  گرادیان فشار در المان چسبنده و  $d$  میزان بازشدگی شکستگی هست. نفوذپذیری مماسی یا مقاومت در برابر جریان طبق عدد رینولدز به صورت رابطه (۵) بیان می شود.



شکل ۲- قانون کلی کشش- جدایش [۴]

تاکنون معیارهای مختلفی برای شروع شکست ارائه شده اند؛ در این تحقیق شروع شکست بر اساس تابع درجه دوم (رابطه (۱)) تعریف شده است.

$$\left[ \frac{t_n}{t_n'} \right]^2 + \left[ \frac{t_s}{t_s'} \right]^2 + \left[ \frac{t_t}{t_t'} \right]^2 = 1 \quad (1)$$

در این معیار  $t_n$  تنش نرمال کششی و  $t_s$  و  $t_t$  تنش های برشی بوده و  $t_n'$  مقاومت نرمال کششی،  $t_s'$  و  $t_t'$  مقاومت های برشی هستند. زمانی که مقدار این تابع به عدد یک برسد سطوح المان از هم جدا شده و شکست رخ می دهد. قانون گسترش شکستگی توصیف کننده نرخ کاهش

انرژی شکست سنگ‌ها (GC) به‌وسیله فاکتور شدت تنش بحرانی سنگ‌ها (KIC) محاسبه می‌شود. گریفیث و ایروین رابطه انرژی شکست بحرانی سنگ با شدت تنش بحرانی سنگ را به‌صورت رابطه (۸) بیان کردند [۳۴].

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma_{Eff}}{1-\nu^2}} \quad (8)$$

انرژی لازم برای ایجاد یک سطح جدید ( $\gamma_{Eff}$ ) و در نتیجه انرژی لازم برای ایجاد شکستگی با دو سطح با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$G_{IC} = 2\gamma_{Eff} \quad (9)$$

انرژی شکست بحرانی نیز از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2(1-\nu^2)}{E} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $G_{IC}$  انرژی شکست بحرانی،  $\nu$  ضریب پواسون و  $E$  مدول یانگ است.

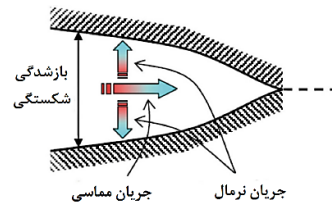
## ۲-۳- هندسه مدل، شرایط مرزی، نیروهای وارد بر مدل

### ۲-۳-۱ هندسه مدل

هندسه مدل در واقع ترسیم فضایی سازند مخزن به همراه چاه هست. این مدل شامل سه لایه عبارت از لایه دربرگیرنده بالایی، لایه مخزنی یا به‌اصطلاح لایه هدف که لایه میانی بوده و لایه دربرگیرنده پایینی است. خصوصیات لایه‌های دربرگیرنده (بالایی و پایینی) با لایه هدف متفاوت بوده و اصلی‌ترین پارامترهایی که این دو لایه را از لایه هدف مجزا می‌کند تنش‌های برجا، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تخلخل و تراوایی آن‌ها است. برای مدل‌سازی مخزن از هندسه استوانه‌ای استفاده شده است طول استوانه ۹۰ متر و قطر آن ۴۰۰ متر (ضخامت لایه‌های دربرگیرنده برابر ۱۵ متر، ضخامت لایه هدف ۶۰ متر) و قطر چاه ۲۰ سانتیمتر است. نرخ نشت یا هدرروی سیال از لایه هدف به سمت لایه‌های دربرگیرنده بسیار ناچیز است. یک لایه از نوع المان چسبنده در جهت محور x (ضخامت بسیار ناچیز در جهت محور y) و در جهت حداکثر تنش افقی در طول چاه در نظر گرفته شده است. به‌این ترتیب، المان‌های چسبنده برای مدل‌سازی شکستگی در جهت محور x قرار گرفته‌اند و امتداد المان‌های شکست در جهت تنش افقی حداکثر است. علت این امر آن است که بهترین جهت رشد برای انتشار شکست در یک محیط همگن، عمود بر راستای تنش افقی حداکثر است. جدول ۱ وضعیت

$$k_t = \frac{d^3}{12\mu} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $d$  همان بازشدگی شکستگی است. جریان نرمال درون شکستگی که معرف میزان هدرروی سیال هست توسط رابطه فشار-جریان که بین گره میانی المان چسبناک با گره‌های مجاور در دو طرف المان تعریف می‌شود. نرخ‌های جریان به‌طرف لایه‌های بالا و پایین با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

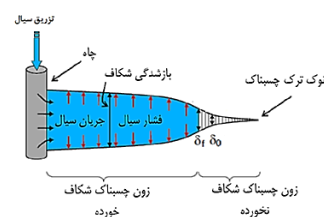


شکل ۳- نمای شماتیک از جریان مماسی و نرمال سیال به داخل شکستگی [۴].

$$q_t = c_t(p_i - p_t) \quad (6)$$

$$q_b = c_b(p_i - p_b) \quad (7)$$

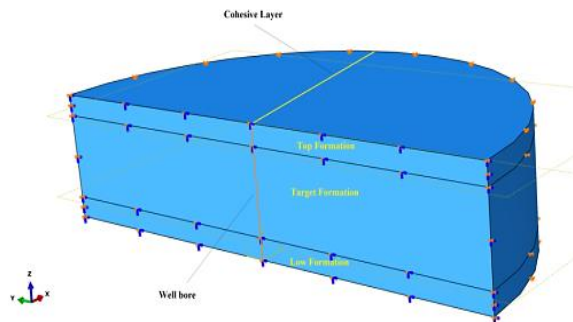
در روابط (۶) و (۷)،  $C_t$  و  $C_b$  ضرایب نشت سیال در سطوح بالایی و پایینی است.  $p_t$  و  $p_b$  به ترتیب فشار در سطوح بالا و پایین المان چسبناک،  $q_t$  و  $q_b$  نرخ جریان به سمت سطوح بالایی و پایینی و  $p_i$  فشار در گره‌های میانی المان است. شکل ۴ نمایی شماتیک از مدل ناحیه چسبناک شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در این مدل لایه‌ای، المان‌های چسبناک در سنگ قرار داده شده که محل ایجاد و گسترش شکست را تعیین می‌کند. پس از تزریق سیال به درون چاه و ورود آن به المان‌های چسبناک سطوح جانبی این لایه از هم باز می‌شوند و شکست شروع به گسترش می‌کند. شکستگی از سیال پر شده و فشار سیال موجب گسترش آن می‌شود. سیال درون شکستگی علاوه بر حرکت به سمت جلو از طریق دیواره به درون سازند نشت می‌کند.



شکل ۴- نمای شماتیک شکستگی و جریان سیال [۴]

### ۲-۳-۲ نیروها و شرایط مرزی مدل

در نرم افزار آباکوس برای اعمال تنش ها و نیروهای متغیر با عمق از زیرشاخه استفاده می شود. برای اعمال نیروهای وارده بر مدل از نیروهای حجمی و سطحی استفاده شده است. نیروهای سطحی، بر سطح بیرونی مدل به صورت یکنواخت و از نوع فشاری وارد می شوند. در حقیقت آن ها نیروهای اعمالی مربوط به لایه های بالایی می باشند که به طور فیزیکی مدل نشده اند، ولی تأثیر آن ها بر هندسه مدل به صورت نیروی فشاری، مدل سازی شده است. نیروهای حجمی یا پیکره ای به گره های مدل (محل برخورد المان ها) وارد می شوند که ناشی از وزن خود مدل هستند. برای اعمال پارامترهای متغیر با عمق مانند اعمال تزریق سیال به سازند، از زیرشاخه cflow استفاده شد که قادر است از المان های باز درون مدل، سیال را به داخل سازند انتقال دهد. سطوح بیرونی مدل برای جلوگیری از حرکت بی مورد ثابت شده اند، سطوح جانبی نیز در راستای محورها x و y و سطح زیرین در جهت محور z ثابت شده است (شکل ۵).



شکل ۵- نیروهای اعمالی بر مدل

### ۲-۳-۳ مش بندی مدل

پس از ایجاد هندسه مدل و تعیین خصوصیات مواد اقدام به مش بندی مدل می شود. برای مش بندی ساختار از المان های C3D8RP و برای مش بندی لایه چسبناک از المان های COH3D8P استفاده شده است [۳۴]. برای استفاده از قانون چسبندگی در شکست هیدرولیکی با استفاده از روش FEM تکنیک خاصی وجود دارد. برای این کار باید در یک مسیر مشخص (مسیری که ترک قرار است در آن رشد کند) یک لایه بسیار باریک با خصوصیات متفاوت از لایه اصلی، قرار داد که به آن لایه چسبنده گویند. این لایه معرف هیچ گونه ماده فیزیکی خاصی نیست

تنش های برجا در عمق ۱۹۹۰ متری، جدول ۲ خصوصیات ژئومکانیکی و پتروفیزیکی لایه های تشکیل دهنده مدل، جدول ۳ پارامترهای شکست مربوط به لایه های دربرگیرنده و جدول ۴ پارامترهای شکست مربوط به لایه هدف شده است.

### جدول ۱- تنش های برجا قبل از عملیات شکست هیدرولیکی

فشار منفذی (مگاپاسکال)	تنش افقی کمینه (مگاپاسکال)	تنش افقی بیشینه (مگاپاسکال)	تنش قائم (مگاپاسکال)	عمق (متر)
۲۸	۳۳٫۶	۳۷٫۸	۴۲	۱۹۹۰

### جدول ۲- خصوصیات ژئومکانیکی و پتروفیزیکی لایه ها

ضریب نفوذپذیری (میلی دارسی)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	چقرمگی (مگاپاسکال)	لایه های مدل
۰٫۰۰۱	۰٫۲۵	۵٫۵	۲٫۲	بالایی
۰٫۱	۰٫۲۲	۷٫۱	۰٫۷	هدف
۰٫۰۰۱	۰٫۲۵	۵٫۵	۲٫۲	پایینی

ضریب پواسون	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضخامت (متر)	لایه های مدل
۰٫۲۵	۶٫۲۵	۱۵	بالایی
۰٫۲۲	۱۲	۶۰	هدف
۰٫۲۵	۶٫۲۵	۱۵	پایینی

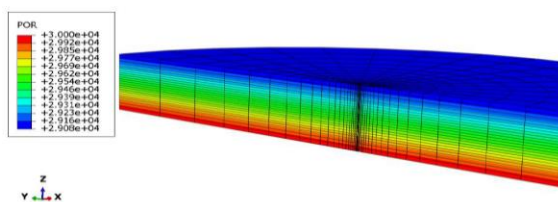
### جدول ۳- پارامترهای شکست مربوط به لایه های دربرگیرنده

پارامترهای الاستیک (مگاپاسکال)	Knn	Kss	Ktt
پارامترهای الاستیک (مگاپاسکال)	۲۶۵۲	۲۶۵۲	۲۶۵۲
پارامترهای آغاز شکستگی (کیلو پاسکال)	$t_n^0$	$t_s^0$	$t_t^0$
	۸۸۰۰	۸۸۰۰	۸۸۰۰
انرژی رشد شکستگی (نیوتن بر متر)	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$G_{IIIC}$
	۵۷	۱۱۰	۱۱۰

### جدول ۴- پارامترهای شکست مربوط به لایه هدف

پارامترهای الاستیک (مگاپاسکال)	Knn	Kss	Ktt
پارامترهای الاستیک (مگاپاسکال)	۲۵۱۵٫۵	۲۵۱۵٫۵	۲۵۱۵٫۵
پارامترهای آغاز شکستگی (کیلو پاسکال)	$t_n^0$	$t_s^0$	$t_t^0$
	۸۳۰۰	۸۳۰۰	۸۳۰۰
انرژی رشد شکستگی (نیوتن بر متر)	$G_{IC}$	$G_{IIC}$	$G_{IIIC}$
	۵۹٫۷	۱۱۵٫۱	۱۱۵٫۱

تحلیل در این مدل‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول با تعریف یک گام تحلیل ژئواستاتیکی مدل با تنش‌های برجا، فشار منفذی و دیگر نیروهای وارد بر آن به تعادل می‌رسد. تعادل در این گام باید به گونه‌ای باشد که پس از اعمال نیروها جابجایی در مدل بسیار ناچیز باشد؛ در غیر این صورت موجب خطا در آنالیز مدل می‌شود. مرز بالا و پایین مدل مخزن نسبت به حرکت در جهت محور Z دستگاه مختصات ثابت شده‌اند. همچنین این دو مرز نسبت به درجه آزادی فشار منفذی نیز ثابت شده‌اند که این امر موجب نفوذناپذیر شدن مرز بالا و پایین مدل می‌شود. مرز رو به روی مدل که در صفحه YZ قرار دارد نسبت به حرکت در جهت محور X و چرخش حول محورهای Z و Y ثابت شده است. مرزهای جانبی نیز نسبت به حرکت در جهت محورهای X و Y ثابت شده‌اند. حرکت سیال تنها در مرزهای بالا و پایین مسدود است و مرزهای جانبی مدل نسبت به حرکت سیال نفوذپذیر هستند



شکل ۷- نمای سه‌بعدی و بالایی مدل شکستگی هیدرولیکی چاه عمودی و کانتورهای فشار تزریق مایع (کیلوپاسکال)

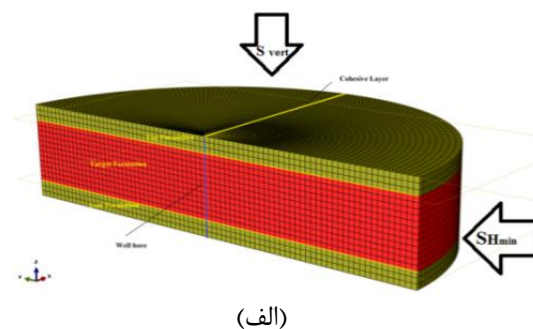
### ۲-۳-۴ تنش‌های برجا

مهم‌ترین فاکتورهایی که باید برای شکست هیدرولیکی اندازه‌گیری شوند اندازه و جهت تنش‌های برجا هستند، از دلایل اهمیت این فاکتور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

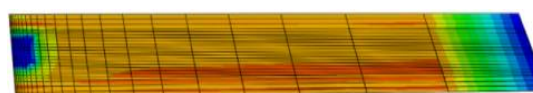
- تأثیرگذار بر هندسه شکست هیدرولیکی
- عامل اصلی در تعیین میزان فشار شکست سازند
- محدودکننده ارتفاع شکست و رشد آن در لایه‌های دیگر سازند
- تأثیرگذار در اندرکنش بین شکستگی‌های طبیعی و هیدرولیکی ایجاد شده
- دو فاکتور مهم وجود دارد که رشد ارتفاعی شکست هیدرولیکی در مخزن را محدود می‌کند:
  - تغییر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها از یک لایه به لایه دیگر

و ضخامت آن به حدی کم است که تغییر محسوسی در بقیه قسمت‌های مدل‌سازی ایجاد نمی‌شود. در مدل‌سازی با روش FEM نمی‌توان در کل مدل از المان‌هایی استفاده نمود که بتوانند قانون چسبندگی را مدل نمایند؛ اما در لایه چسبنده، می‌توان المان‌هایی را به کار برد که قابلیت مدل‌سازی قانون چسبندگی را داشته باشند. به همین دلیل به این لایه، لایه چسبنده گویند؛ اما چنانچه ترک به هر کجای این لایه برسد، ضخامت و فشار لایه تغییر می‌کند. این لایه باید مقاومت بسیار بالاتری از ماده اصلی داشته باشد تا تغییر شکل الاستیک آن در اثر بارگذاری در مقابل لایه اصلی بسیار کمتر و قابل صرف‌نظر کردن باشد [۴]. خصوصیات لایه چسبنده در نرم‌افزار آباکوس اعمال می‌شود. در مدل‌سازی انجام شده ضریب پواسون ۰/۳۰ اعمال شد؛ که انرژی زیادی برای از بین رفتن المان نیاز دارد. در حالت کلی، مسئله مهم انرژی است. مش بندی لایه چسبنده نیز تأثیرگذار است. در مدل، چند تا لایه چسبنده در راستاهای مختلف می‌توان قرار داد، نقش لایه چسبنده در هر قسمت از مدل به تصویر کشیدن شرایط در آن راستا و صفحه دلخواه است.

در شکل ۶ موقعیت لایه چسبناک نسبت به چاه و مش‌بندی المان‌های چسبنده مدل نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶- الف) موقعیت لایه چسبناک نسبت به چاه، ب) مش‌بندی المان‌های چسبنده

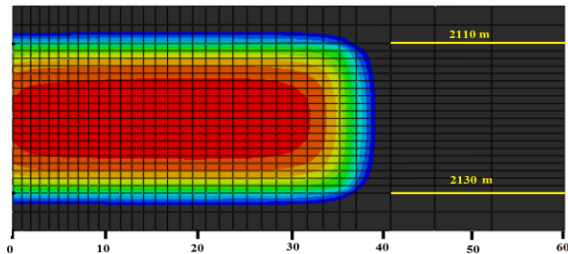
فشار منفذی در ابتدا و انتهای فاصله عمقی چاه ۲۸ تا ۳۴ مگاپاسکال که این مقدار قبل از تزریق سیال به چاه و مربوط به مرحله ژئواستاتیک است (شکل ۷).



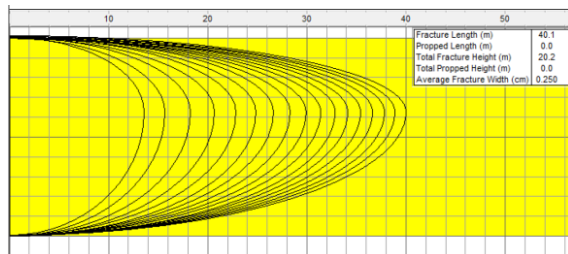
## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- صحت سنجی مدل

برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از مدل سازی شکست هیدرولیکی معمولاً نتایج را با داده های حاصل از یک عملیات شکست هیدرولیکی انجام شده مقایسه می کنند و یا با استفاده از مدل های تحلیلی ریاضی صحت سنجی صورت می گیرد. بهترین راه صحت سنجی مقایسه مدل با مدل های معتبر پیشین است. همان طور که پیش تر اشاره شد محققین مختلفی به مقایسه نتایج حاصل از مدل ناحیه چسبناک شکست هیدرولیکی با دیگر مدل های دوبعدی و سه بعدی پرداخته اند. در اینجا به دلیل سه بعدی بودن مدل نتایج با نرم افزار سه بعدی و تجاری FracproPT (یکی از پرکاربردترین نرم افزارها در زمینه مدل سازی شکست هیدرولیکی) است مقایسه شد. مدلی ساده با ویژگی هایی که در جدول ۱ ذکر شد در نرم افزارهای آباکوس و FracproPT ایجاد شد. مدل ساخته شده از سه لایه تشکیل شده است و لایه وسط همان لایه هدف است. سیال تزریقی آب بوده و دارای ویسکوزیته یک سانتی پواز و نرخ تزریق سیال نیز ۱/۲ مترمکعب بر دقیقه است. در شکل ۹ نیمرخ شکاف هیدرولیکی مدل سازی شده در نرم افزارهای نامبرده آورده شده است.



(الف)

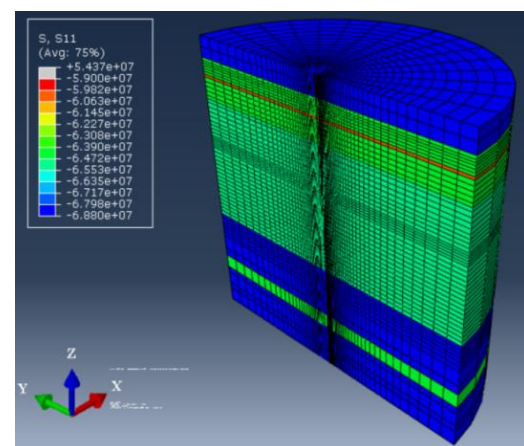
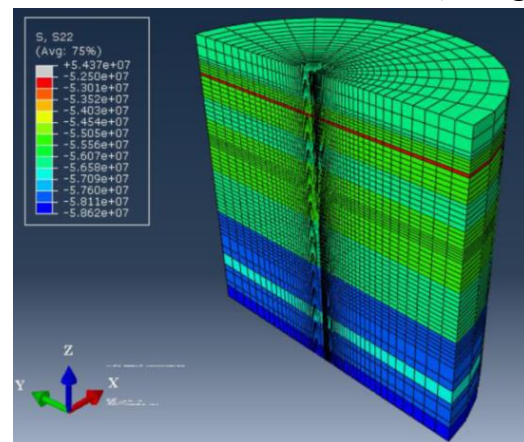


(ب)

شکل ۹- شکست هیدرولیکی مدل سازی شده، (الف) مدل آباکوس، (ب) مدل FracproPT

## • تغییر تنش های برجا در اعماق مختلف

عامل اصلی در محدود کردن رشد شکست هیدرولیکی اختلاف تنش های برجا است و اختلاف خصوصیات مکانیکی سنگ ها مگر تغییرات بسیار شدید (پنج برابر یا بیشتر) تأثیر زیادی بر رشد شکست ندارند. مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که اختلاف تنش حدود ۲/۷۵ مگاپاسکالی برای محدود کردن رشد ارتفاعی شکست هیدرولیکی کافی است. شکل ۸ تنش های برجای حداقل و حداکثر در مدل را پس از رسیدن به تعادل نشان می دهد. برای اعمال تنش های برجا، فشار منفذی و نسبت تخلخل اولیه در این مدل به ترتیب از سابروتین های SIGINI، UPOREP و VOIDRI که به زبان فورتن نوشته شده اند، استفاده شده است. پس از مرحله ژئواستاتیک یک گام تحلیل خاک تعریف شد و با حفظ شرایط مرزی گام قبل، سیالی با نرخ مشخص از محل سوراخ کاری چاه به درون مخزن تزریق شد



شکل ۸- المان محدود مش بندی شده منطقه در اطراف گمانه عمودی با خطوط تنش

ارتفاع به طول شکستگی توجه شود زیرا این نسبت بالا می‌تواند مشکلاتی در جایگذاری پروپانت در شکستگی ایجاد کند. علاوه بر این با توجه به رژیم جریان درون مخزن و میزان بهره‌وری مدنظر باید به‌صورت جداگانه تأثیر این شکستگی را در میزان افزایش تولید بررسی کرد. معمولاً در مخازن با نفوذپذیری بالا شکستگی‌های با طول کم و بازشدگی زیاد بهره‌وری بهتری را در پی دارند. میزان بازشدگی شکستگی با فاصله گرفتن از محل تزریق کاهش قابل توجهی می‌یابد. در نتیجه در صورت تزریق سیال پروپانتی میزان جایگذاری پروپانت در شکستگی کم بوده و ممکن است نتیجه مطلوب حاصل نگردد. شکل ۱۰ نیم‌رخ شکاف در مدت‌زمان‌های ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ دقیقه با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودار بازشدگی - طول شکاف را در زمان‌های ۵ و ۱۸ دقیقه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل مناسب‌ترین ابعاد شکستگی برای سیال با ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز در زمان تزریق ۱۸ دقیقه و با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه حاصل می‌شود. در این شرایط طول شکستگی ۲۲ متر، ارتفاع آن ۷۰ متر و بازشدگی در حدود ۹ میلی‌متر است.

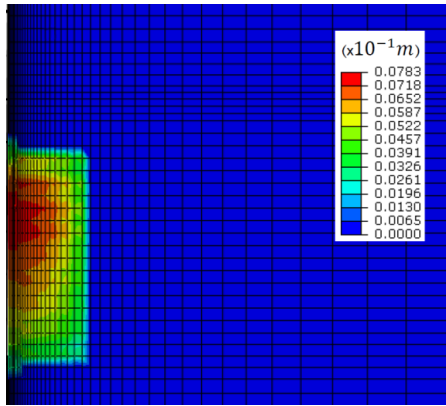
### ۳-۳- تأثیر نرخ تزریق

در این قسمت با تزریق سیالی با ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز و در مدت‌زمان ۵ دقیقه با تغییر نرخ تزریق میزان حساسیت شکست هیدرولیکی ایجاد شده در این مدل نسبت به نرخ تزریق بررسی شده است. نرخ‌های تزریق ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ بشکه در دقیقه بکار رفته است (شکل ۱۳). نیم‌رخ شکستگی و میزان بازشدگی به طول نیز برای نرخ تزریق‌های ۱۰ و ۳۵ در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای مربوط به بررسی تأثیر نرخ تزریق مشاهده می‌شود با افزایش نرخ تزریق ابعاد شکست نیز افزایش می‌یابد و در واقع افزایش نرخ تزریق اثری همچون افزایش مدت‌زمان تزریق دارد. برای نرخ‌های بالاتر تزریق نیاز به پمپ‌های با توان بالاتر است. چگونگی گسترش شکست نسبت به ابعاد مخزن نشان می‌دهد که زمان تزریق و یا نرخ پمپاژ نباید از حد خاصی بیشتر شود؛ زیرا افزایش رشد شکستگی باعث می‌شود که شکست در لایه‌های دربرگیرنده لایه هدف نیز اتفاق افتاده و سبب ایجاد مشکلات متعدد گردد. با توجه به حساسیت لایه‌های شیلی به آب، در صورت استفاده از سیال پایه آبی باید به‌دقت نرخ و زمان پمپاژ تعیین گردد.

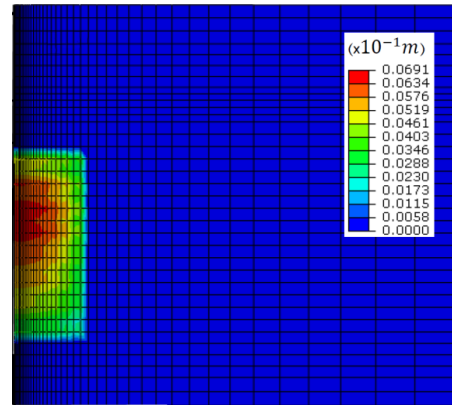
همان‌طور که از مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های دو نرم‌افزار ذکر شده مشخص است، نتایج بسیار به هم نزدیک هستند. حداکثر طول شکستگی در مدل آباکوس تقریباً ۳۸ متر، درحالی‌که در مدل FracproPT این مقدار ۴۰ متر است. حداکثر بازشدگی برای دو نرم‌افزار آباکوس و FracproPT به ترتیب ۳/۴ میلی‌متر و ۳/۷ میلی‌متر است که نشان می‌دهد بازشدگی شکستگی در مدل FracproPT اندکی بیشتر است. باوجود کمتر بودن طول و عرض شکستگی در مدل ساخته شده با آباکوس ارتفاع شکستگی در آن تقریباً تا انتهای شکستگی ثابت است و کل لایه هدف را در بر می‌گیرد. در مدل‌سازی صورت گرفته با نرم‌افزار FracproPT هر چه در طول شکستگی پیش می‌رویم ارتفاع آن کمتر می‌شود. در کل حجم شکاف در این دو مدل یکسان بوده که نشان از نزدیکی جواب این دو مدل‌سازی دارد. با توجه به قابلیت‌های بالای نرم‌افزار آباکوس، اعتبار بالای نتایج آن و نیز انعطاف‌پذیری آن در مدل‌سازی‌های پیچیده، نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی انتخاب شد. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای طراحی عملیات همچون مدت‌زمان تزریق، نرخ تزریق و ویسکوزیته سیال، این پارامترها مورد آنالیز حساسیت قرار گرفتند. در ادامه نتایج حاصل از این آنالیزها بیان شده است.

### ۳-۲- تأثیر مدت‌زمان تزریق

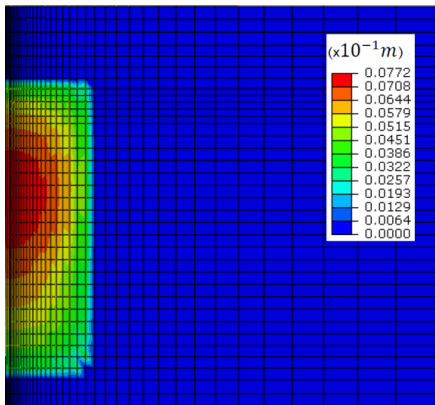
برای بررسی تأثیر مدت‌زمان تزریق بر رشد شکستگی، سیالی با ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز و نرخ تزریق ۱۰ بشکه در دقیقه در مدت‌زمان‌های ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ دقیقه به درون چاه تزریق شده است. این تزریق از محل سوراخ‌کاری دیواره چاه در قسمت میانی مخزن صورت می‌گیرد. در ۲۰۰ ثانیه اول نرخ تزریق از صفر تا ۱۰ بشکه در دقیقه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و این نرخ تا پایان زمان تزریق ثابت می‌ماند. این توزیع نرخ تزریق نسبت به زمان برای جلوگیری از اعمال فشار ناگهانی انتخاب شده است. با شروع تزریق، فشار سیال درون شکستگی افزایش می‌یابد و با رسیدن به فشار شکست، شکست ایجاد می‌شود. پس از شروع شکست در مخزن میزان فشار نسبتاً ثابت مانده و شکستگی به رشد خود ادامه می‌دهد. با توجه به اختلاف کم تنش در لایه‌های مخزن (نبود لایه محصورکننده)، شکستگی به‌جای رشد طولی بیشتر تمایل به رشد عمودی دارد. در صورتی‌که عملیات شکست پروپانتی موردنظر باشد باید به نسبت بالای



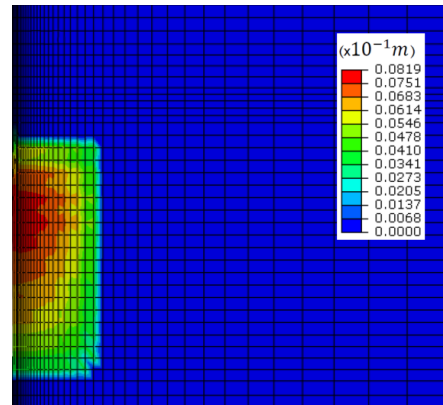
(ب)



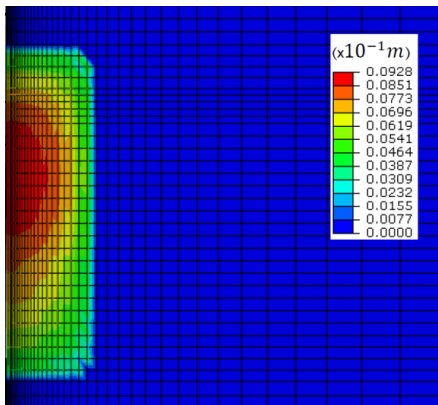
(الف)



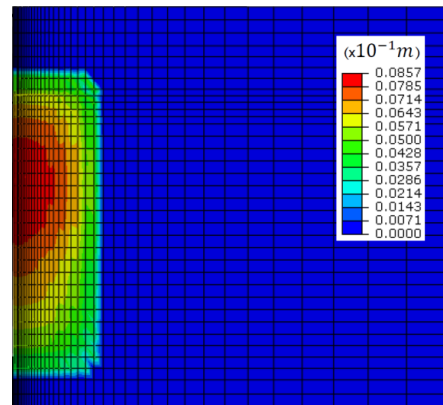
(ت)



(پ)

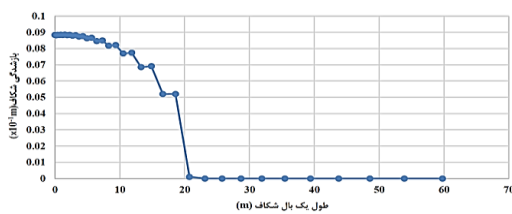


(ج)

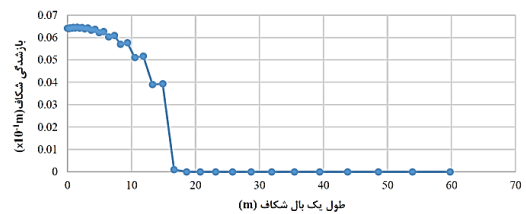


(ث)

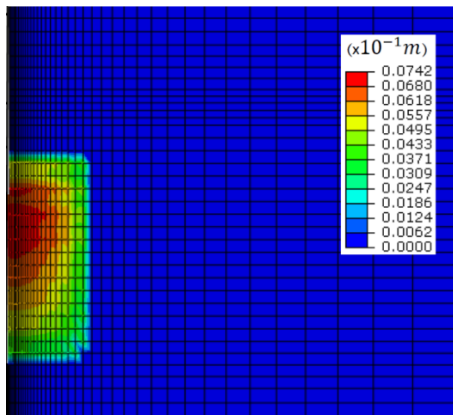
شکل ۱۰- نیمرخ شکاف (در مدت زمان های ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ دقیقه با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی پواز)



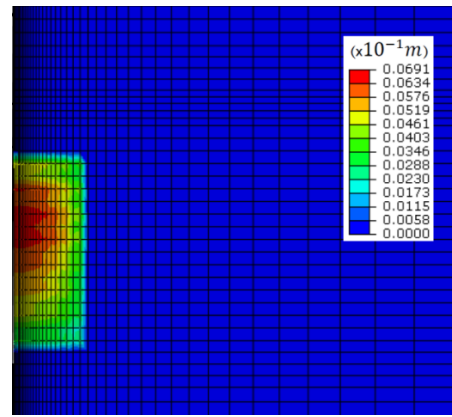
شکل ۱۲- نمودار بازشدگی - طول شکاف (۱۸ دقیقه پس از شروع پمپاژ سیال با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی پواز)



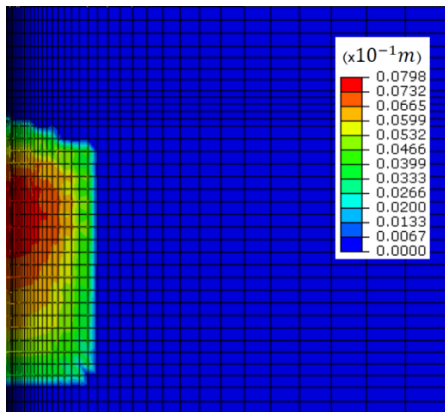
شکل ۱۱- نمودار بازشدگی - طول شکاف (۵ دقیقه پس از شروع پمپاژ سیال با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی پواز)



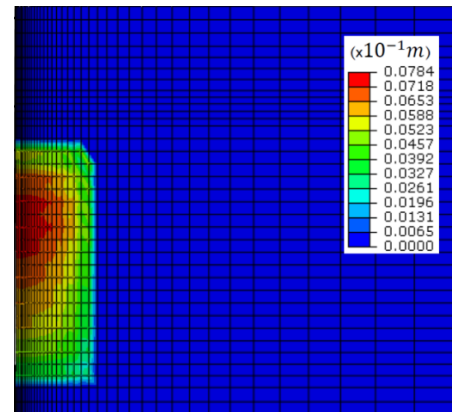
(ب)



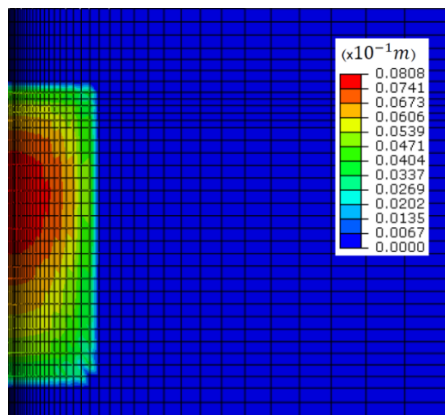
(الف)



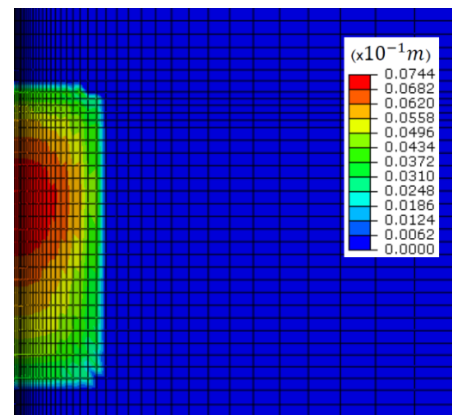
(ت)



(پ)

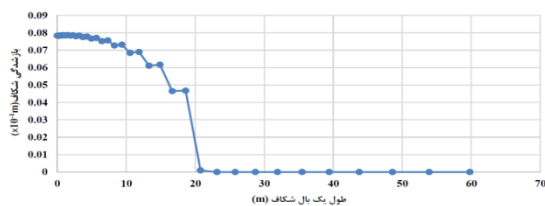


(ج)

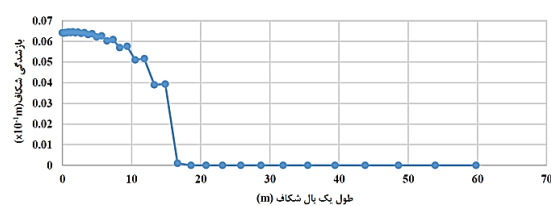


(ث)

شکل ۱۳- نیم‌رخ شکاف (نرخ‌های تزریق ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ بشکه در دقیقه در مدت‌زمان ۵ دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز)

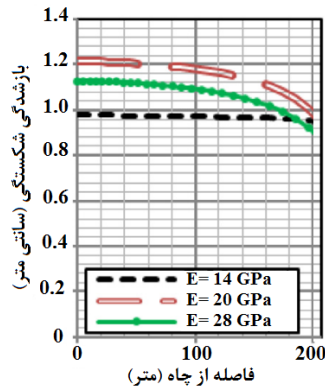


شکل ۱۵- نمودار بازشدگی - طول شکاف (۵ دقیقه پس از شروع پمپاژ سیال با نرخ ۳۵ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز)

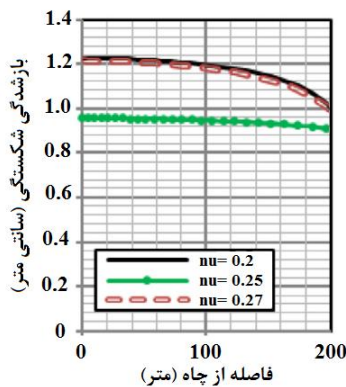


شکل ۱۴- نمودار بازشدگی - طول شکاف (۵ دقیقه پس از شروع پمپاژ سیال با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه و ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز)

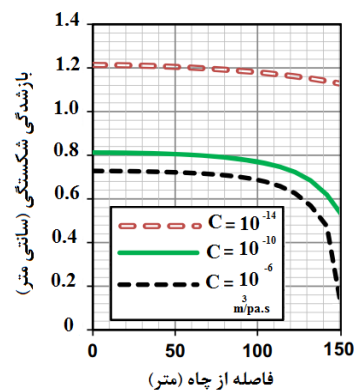
ضریب نشت مخزن انجام شده است. بیشترین بازشدگی شکستگی متعلق به مدول ۲۰ گیگا پاسکال است. با افزایش مدول یانگ از ۱۴ به ۲۸ گیگاپاسکال بازشدگی شکستگی افزایش و در فاصله ۱۸۳ متری از چاه این روند معکوس می‌شود. حساسیت بازشدگی شکستگی برای نسبت‌های پواسون ۰/۲ و ۰/۲۷ یکسان و برابر بوده و از نسبت پواسون ۰/۲۵ بیشتر است. همچنین نشت سیال هر چه قدر کمتر باشد بازشدگی بیشتر خواهد بود.



الف) وابستگی آن به مدول یانگ مخزن



ب) برای نسبت‌های مختلف پواسون مخزن



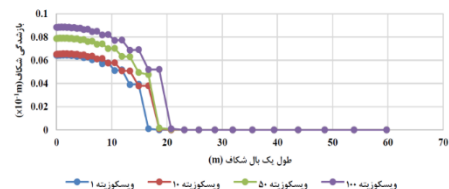
پ) برای ضرایب مختلف نشت مخزن

شکل ۱۷- بازشدگی شکستگی در امتداد محور افقی

با توجه به نتایج حاصل مناسب‌ترین ابعاد شکستگی برای سیال با ویسکوزیته ۱ سانتی‌پواز در زمان تزریق ۵ دقیقه با نرخ ۳۵ بشکه در دقیقه حاصل می‌شود. در این شرایط طول شکستگی ۲۲ متر، ارتفاع آن ۷۰ متر و بازشدگی در حدود ۸ میلی‌متر است.

### ۳-۴- تأثیر ویسکوزیته سیال

افزایش ویسکوزیته سیال موجب افزایش عرض شکستگی می‌شود لذا با تغییر میزان ویسکوزیته سیال میزان تأثیر آن بر بازشدگی شکستگی مورد بررسی قرار گرفت. طی چند آنالیز سیال، با ویسکوزیته‌های ۱، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌پواز و با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه در مدت‌زمان ۵ دقیقه تزریق شد. با توجه به نتایج حاصل مناسب‌ترین ابعاد شکستگی برای سیال با ویسکوزیته ۱۰۰ سانتی‌پواز طول شکستگی ۲۲ متر و بازشدگی در حدود ۹ میلی‌متر است. میزان بازشدگی شکستگی برای هر سیال در شکل ۱۶ نشان داده شده است. افزایش ویسکوزیته موجب افزایش بازشدگی و طول شکستگی می‌شود. بدین منظور امروزه از سیالات با ترکیبات شیمیایی خاص که ویسکوزیته‌هایی بسیار بالا تا حدود چند صد برابر آب دارند استفاده می‌شود. این سیالات معمولاً توسط شیمییدان‌ها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که پس از قرار گرفتن در معرض دمای مخزن تجزیه‌شده و ویسکوزیته آن‌ها کاهش یابد تا در فرآیند شستشوی چاه مشکلی ایجاد نکنند. گستردگی زیاد انواع سیالات و کاربردهای خاص هر سیال موجب می‌شود که انتخاب سیال برای یک مخزن مشخص امری بسیار تخصصی باشد. این انتخاب معمولاً در کارگروه‌هایی متشکل از مهندسين مخزن و بهره‌برداري، زمین‌شناس‌ها و مهندسين شيمي صورت می‌گیرد.



شکل ۱۶- نمودار بازشدگی - طول شکاف (۵ دقیقه پس از شروع پمپاژ سیال با نرخ ۱۰ بشکه در دقیقه با ویسکوزیته‌های مختلف)

### ۳-۵- تأثیر دیگر پارامترها

در شکل ۱۷ قسمت‌های الف) تا پ) حساسیت بازشدگی شکستگی در فاصله افقی از چاه تزریق نسبت به پارامترهای الاستیک مخزن (ضریب پواسون و مدول یانگ) و

## ۴- نتیجه‌گیری

هدف از طراحی عملیات شکست هیدرولیکی انجام برخی پیش‌بینی‌ها به منظور بهینه‌سازی این عملیات است. برای طراحی شکست هیدرولیکی پنج فاکتور مهم وجود دارد که باید مشخص شوند: طول، ارتفاع و بازشدگی شکستگی که پروپانت را در خود جای می‌دهد، فشار شروع شکست و جهت‌گیری شکستگی (راستای شکستگی در مقاله حاضر در راستای لایه چسبیده است) ایجاد می‌شود. چهار مورد از این پارامترهای حیاتی از مدل‌سازی شکست هیدرولیکی به دست می‌آیند، بنابراین مدل‌سازی ۸۰ درصد جواب‌های لازم را ارائه می‌دهد.

اصلی‌ترین پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی تنش‌های برجای منطقه، فشار منفذی، مدول یانگ، ضریب پواسون، تخلخل، تراوایی، میزان زاویه اصطکاک و چسبندگی سنگ و پارامترهای مربوط به مکانیک شکست سنگ مانند انرژی شکستگی، چقرمگی و مؤلفه‌های تنش‌های نرمال و برشی سنگ است. همچنین شکستگی ایجاد شده دارای ارتفاع بیشتر است این امر به دلیل کمتر بودن مدول الاستیسیته لایه‌های پایین و بالای لایه مخزن هست. با افزایش مدت تزریق و همچنین نرخ پمپاژ طول شکستگی افزایش می‌یابد و حداکثر طول ایجاد شده برای سیال با ویسکوزیته یک سانتی‌پواز در زمان تزریق ۵ دقیقه با نرخ ۳۵ بشکه در دقیقه یا در زمان تزریق ۱۸ دقیقه و با نرخ ۱۰ بشکه، حدود ۲۲ متر است درحالی‌که حداکثر ارتفاع حدود ۷۰ متر است. همچنین حداکثر بازشدگی شکستگی در دهانه آن حدود ۹ میلی‌متر است. ویسکوزیته سیال بیشتر بر روی عرض شکستگی تأثیر می‌گذارد تا طول آن و با افزایش ویسکوزیته عرض شکستگی نیز افزایش می‌یابد.

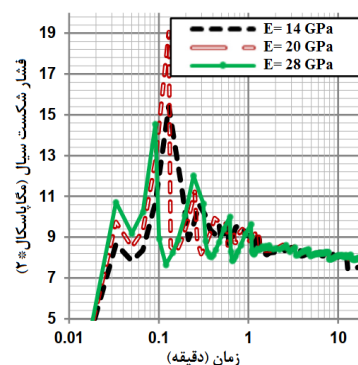
## سپاسگزاری

از آقایان مهندس علی حسنی، محمدمهدی قندهاری، سید ایمان مرتضوی‌پور، داوود فاضلی، سعید حسنی، به خاطر کمک‌های ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

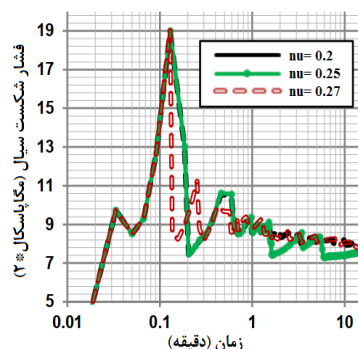
## مراجع

[1] Valko, P., & Economides, M. J. (1995). "Hydraulic fracture mechanics" (Vol. 28, p. 206). Chichester: Wiley.

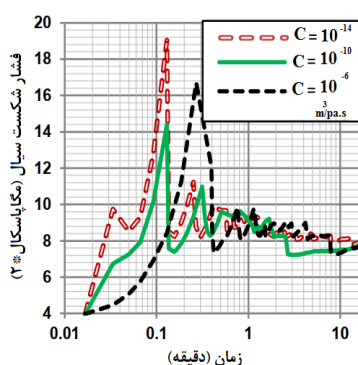
در شکل ۱۸ قسمت‌های (الف) تا (پ) فشار شکست سیال در ۱۰ دقیقه ابتدایی تزریق سیال نسبت به پارامترهای الاستیک مخزن (مدول یانگ و ضریب پواسون) و ضریب نشت مخزن انجام شده است. در شکل ۱۸ (الف) بیشترین فشار شکست متعلق به مدول ۲۰ گیگا پاسکال است. با کاهش مدول یانگ از ۲۸ به ۱۴ گیگاپاسکال فشار شکست نیز ۱/۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. بعد از گذشت یک دقیقه از تزریق سیال فشار شکست برای هر سه مدول یانگ تقریباً یکسان می‌شود. حساسیت فشار شکست برای نسبت‌های پواسون در پیک‌های اول و دوم برابر است. نشت سیال هر چه قدر کمتر باشد فشار شکست بیشتر خواهد بود.



الف) وابستگی آن به مدول یانگ مخزن



ب) برای نسبت‌های مختلف پواسون مخزن



پ) برای ضرایب مختلف نشت مخزن

شکل ۱۸- فشار شکست سیال نسبت به زمان

crack growth in brittle materials without remeshing". International journal for numerical methods in engineering, 61(10), 1741-1770.

[14] Zi, G., Song, J. H., Budyn, E., Lee, S. H., & Belytschko, T. (2004). "A method for growing multiple cracks without remeshing and its application to fatigue crack growth". Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 12(5), 901.

[15] Khoei, A. R., Moallemi, S., & Haghghat, E. (2012). "Thermo-hydro-mechanical modeling of impermeable discontinuity in saturated porous media with X-FEM technique". Engineering Fracture Mechanics, 96, 701-723.

[16] Watanabe, N., Wang, W., Taron, J., Görke, U. J., & Kolditz, O. (2012). "Lower-dimensional interface elements with local enrichment: application to coupled hydro-mechanical problems in discretely fractured porous media". International Journal for Numerical Methods in Engineering, 90(8), 1010-1034.

[17] Gordeliy, E., & Peirce, A. (2013). "Coupling schemes for modeling hydraulic fracture propagation using the XFEM". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 253, 305-322.

[18] Mohammadnejad, T., & Khoei, A. R. (2013). "An extended finite element method for fluid flow in partially saturated porous media with weak discontinuities; the convergence analysis of local enrichment strategies". Computational Mechanics, 51(3), 327-345.

[19] Mohammadnejad, T., & Khoei, A. R. (2013). "An extended finite element method for hydraulic fracture propagation in deformable porous media with the cohesive crack model". Finite Elements in Analysis and Design, 73, 77-95.

[20] Sarris, E., & Papanastasiou, P. (2012). "Modeling of hydraulic fracturing in a poroelastic cohesive formation". International Journal of Geomechanics, 12(2), 160-167.

[21] Carrier, B., & Granet, S. (2012). "Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model". Engineering fracture mechanics, 79, 312-328.

[22] Mohammadnejad, T., & Khoei, A. R. (2013). "Hydro-mechanical modeling of cohesive crack propagation in multiphase porous media using the extended finite element method". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 37(10), 1247-1279.

[23] Khoei, A. R., & Vahab, M. (2014). "A numerical contact algorithm in saturated porous media with the extended finite element method". Computational Mechanics, 54(5), 1089-1110.

[2] Yao, Y., Gosavi, S. V., Searles, K. H., & Ellison, T. K. (2010, January). "Cohesive fracture mechanics based analysis to model ductile rock fracture". In 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

[3] Ortiz, M., & Pandolfi, A. (1999). "Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis". International journal for numerical methods in engineering, 44(9), 1267-1282.

[4] ABAQUS, "6.14 documentation," Dassault Systemes Simulia Corporation, 2014.

[5] Zielonka, M. G., Searles, K. H., Ning, J., & Buechler, S. R. (2014, May). "Development and validation of fully-coupled hydraulic fracturing simulation capabilities". In Proceedings of the SIMULIA community conference, SCC2014 (pp. 19-21).

[6] Khoei, A. R. (2014). "Extended finite element method: theory and applications". John Wiley & Sons.

[7] Haddad, M., & Sepehrnoori, K. (2015, April). "Integration of XFEM and CZM to model 3D multiple-stage hydraulic fracturing in quasi-brittle shale formations: solution-dependent propagation direction". In Proceedings of the AADE National Technical Conference and Exhibition, AADE2015, San Antonio, Texas, 8-9 April 2015.

[8] Belytschko, T., & Black, T. (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing". International journal for numerical methods in engineering, 45(5), 601-620.

[9] Moës, N., Dolbow, J., & Belytschko, T. (1999). "A finite element method for crack growth without remeshing". International journal for numerical methods in engineering, 46(1), 131-150.

[10] Daux, C., Moës, N., Dolbow, J., Sukumar, N., & Belytschko, T. (2000). "Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method". International journal for numerical methods in engineering, 48(12), 1741-1760.

[11] Sukumar, N., Moës, N., Moran, B., & Belytschko, T. (2000). "Extended finite element method for three-dimensional crack modelling". International journal for numerical methods in engineering, 48(11), 1549-1570.

[12] Moës, N., & Belytschko, T. (2002). "Extended finite element method for cohesive crack growth". Engineering fracture mechanics, 69(7), 813-833.

[13] Budyn, E., Zi, G., Moës, N., & Belytschko, T. (2004). "A method for multiple

- Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 25-27 August 2014 (pp. 1777-1792). Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum Geologists, Society of Petroleum Engineers.
- [35] Hamidi, F., & Mortazavi, A. (2014). "A new three dimensional approach to numerically model hydraulic fracturing process". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 124, 451-467.
- [36] Haddad, M., & Sepehrnoori, K. (2015). "Simulation of hydraulic fracturing in quasi-brittle shale formations using characterized cohesive layer: Stimulation controlling factors". *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 9, 65-83
- [37] Yao, Y., Liu, L., & Keer, L. M. (2015). "Pore pressure cohesive zone modeling of hydraulic fracture in quasi-brittle rocks". *Mechanics of Materials*, 83, 17-29.
- [38] Wang, X., Liu, C., Wang, H., Liu, H., & Wu, H. (2016). "Comparison of consecutive and alternate hydraulic fracturing in horizontal wells using XFEM-based cohesive zone method". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143, 14-25.
- [39] Wang, H. (2016). "Poro-elasto-plastic modeling of complex hydraulic fracture propagation: simultaneous multi-fracturing and producing well interference". *Acta Mechanica*, 227(2), 507-525.
- [40] Saberhosseini, S. E., Keshavarzi, R., & Ahangari, K. (2017). "A fully coupled three-dimensional hydraulic fracture model to investigate the impact of formation rock mechanical properties and operational parameters on hydraulic fracture opening using cohesive elements method". *Arabian Journal of Geosciences*, 10(7), 157.
- [41] Mehrgini, B., Memarian, H., Dusseault, M. B., Sheikhmali, R., Eshraghi, H., Ghavidel, A., ... & Badsar, A. (2017, August). "Hydraulic fracture geometry and geomechanical characteristics of carbonate reservoir rock". In 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- [42] Feng, Y., & Gray, K. E. (2017, August). "Modeling near-wellbore hydraulic fracture complexity using coupled pore pressure extended finite element method". In 51st US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.
- [43] Carrier, B., & Granet, S. (2012). "Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model". *Engineering fracture mechanics*, 79, 312-328.
- [44] Chen, Z. (2013, May). "An ABAQUS implementation of the XFEM for hydraulic fracture problems". In ISRM International Conference for
- [24] Mohammadnejad, T., & Andrade, J. E. (2016). "Numerical modeling of hydraulic fracture propagation, closure and reopening using XFEM with application to in-situ stress estimation". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(15), 2033-2060.
- [25] Khodabakhshnejad, A. (2016). "An extended finite element method based modeling of hydraulic fracturing" (Doctoral dissertation, University of Southern California.)
- [26] Song, J. H., Areias, P. M., & Belytschko, T. (2006). "A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67(6), 868-893.
- [27] Fisher, M. K., Heinze, J. R., Harris, C. D., Davidson, B. M., Wright, C. A., & Dunn, K. P. (2004). "Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale Using Microseismic Fracture Mapping". Paper SPE 90051 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26–29 September.
- [28] Lolon, E., Cipolla, C., Weijers, L., Hesketh, R. E., & Grigg, M. W. (2009, January). "Evaluating horizontal well placement and hydraulic fracture spacing/conductivity in the Bakken Formation", North Dakota. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [29] Cipolla, C. L., Lolon, E., Mayerhofer, M. J., & Warpinski, N. R. (2009, January). "Fracture design considerations in horizontal wells drilled in unconventional gas reservoirs". In SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.
- [30] Chen, Z., Bungler, A. P., Zhang, X., & Jeffrey, R. G. (2009). "Cohesive zone finite element-based modeling of hydraulic fractures". *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(5), 443-452.
- [31] Sarris, E., & Papanastasiou, P. (2011). "The influence of the cohesive process zone in hydraulic fracturing modelling". *International Journal of Fracture*, 167(1), 33-45.
- [32] Osholake, T., Yilin Wang, J., & Ertekin, T. (2013). "Factors affecting hydraulically fractured well performance in the Marcellus shale gas reservoirs". *Journal of Energy Resources Technology*, 135(1.)
- [33] Shin, D. H. (2013). "Simultaneous propagation of multiple fractures in a horizontal well". Ph.D.thesis, University of Texas at Austin.
- [34] Haddad\*, M., & Sepehrnoori, K. (2014, August). "Simulation of multiple-stage fracturing in quasibrittle shale formations using pore pressure cohesive zone model". In Unconventional



Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[45] Barenblatt, G. I. (1959). "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses". Axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 23(3), 622-636.

[46] Barenblatt, G. I. (1962). "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture". *Advances in applied mechanics*, 7(1), 55-129.

[47] 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.

- 
- <sup>1</sup> Cohesive Zone Method
  - <sup>2</sup> Quasi-Brittle
  - <sup>3</sup> Cohesive Crack
  - <sup>4</sup> Cohesive Law
  - <sup>5</sup> Finite Differences Method
  - <sup>6</sup> Finite Element Method
  - <sup>7</sup> Extended Finite Element Method
  - <sup>8</sup> Discrete Element Method
  - <sup>9</sup> Displacement Discontinuity Method
  - <sup>10</sup> Enrichment Functions
  - <sup>11</sup> Local
  - <sup>12</sup> Remeshing
  - <sup>13</sup> Belytschko And Black
  - <sup>14</sup> Moës
  - <sup>15</sup> Heaviside Function
  - <sup>16</sup> Branch Function
  - <sup>17</sup> Daux
  - <sup>18</sup> Junction Function
  - <sup>19</sup> Sukumar
  - <sup>20</sup> Budyn
  - <sup>21</sup> Zi
  - <sup>22</sup> Watanabe
  - <sup>23</sup> Gordeliy And Peirce
  - <sup>24</sup> Andrade
  - <sup>25</sup> Fisher
  - <sup>26</sup> Lolon
  - <sup>27</sup> Cipolla
  - <sup>28</sup> Chen
  - <sup>29</sup> Yao
  - <sup>30</sup> Sarris And Papanastasiou
  - <sup>31</sup> Exponential
  - <sup>32</sup> Osholake
  - <sup>33</sup> Shin
  - <sup>34</sup> Wang
  - <sup>35</sup> Stress Intensity Factor
  - <sup>36</sup> Feng And Gray
  - <sup>37</sup> Carrier And Granet
  - <sup>38</sup> Barenblatt
  - <sup>39</sup> Hillerborg