

مدلسازی عددی برای تعیین عوامل موثر بر فشار شروع شکست در عملیات شکست هیدرولیکی

مهدی آریا^۱، مهدی حسینی^{۲*}

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۲۴ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۱۸

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون کشور به نرخ تولید بیشتر از چاه‌های نفتی و بازدهی بیشتر مخازن نفت، فعال‌سازی مجدد چاه‌های نفت در ایران امری ضروری به نظر می‌رسد. تولید نفت باگذشت زمان، به دلیل کاهش فشار مخزن و بسته شدن ترک‌ها و منافذ میکروسکوپی موجود در سنگ مخزن کاهش می‌یابد. شکست هیدرولیکی به‌عنوان روشی برای تحریک مخازن نفتی به عوامل مختلفی از جمله خصوصیات محیطی که شکستگی در آن رشد می‌کند، بستگی دارد. خصوصیات مکانیکی لایه‌ها به‌عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر روند گسترش شکست هیدرولیکی و هندسه‌ی آن شناخته می‌شوند. در پژوهش حاضر، سعی بر این است که عوامل مختلف دخیل در شکست هیدرولیکی و تأثیر هر یک از آنها بر شکست هیدرولیکی بررسی شود تا محل مناسب برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی انتخاب شود که باعث می‌شود هم هزینه‌های عملیاتی پایین بیاید و هم شکست بهتر و موثر تری داشته باشیم. در این تحقیق، توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی‌های عددی در ۱۰ حالت مختلف انجام شده و سپس اثر هر یک از این پارامترهای ورودی، روی فشار شکست هیدرولیکی با انجام تحلیل حساسیت بررسی شده است. این پارامترهای ورودی که در واقع داده‌های چاه می‌باشند شامل مدول الاستیسیته، تنش افقی حداقل و حداکثر، تنش قائم، مقاومت کششی، نسبت پواسون و فشار منفذی می‌باشند. اطلاعات موردنیاز از چاه‌های حفر شده در سنگ‌های کربناته‌ی ایران گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش افقی حداقل بیشترین تأثیر را بر روی فشار شکست دارد و پارامترهایی مثل تنش قائم و مدول یانگ در تعیین فشار شکست بی تأثیر هستند.

کلید واژه‌ها: شکست هیدرولیکی، تحلیل حساسیت، مدلسازی عددی، نرم‌افزار ABAQUS.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

از نقطه نظر مهندسی نفت و گاز و بهره برداری از مخازن هیدروکربوری، افزایش بهره دهی در چاه ها به ویژه در چاه هایی با نفوذ پذیری کم یا چاه های آسیب دیده، یکی از مهمترین اهداف است. تا به امروز روش های متفاوتی برای افزایش میزان بهره دهی چاه ها ارائه شده است که هر یک می تواند به طریقی موجب بهبود عملکرد چاه ها گردد. از مهمترین روش های بهره دهی چاه ها، اثر گذاشتن بر فیزیک سنگ مخزن می باشد که در آن سعی می شود تا ساختار فیزیکی سنگ مخزن بهبود یابد؛ از آن جمله می توان به ایجاد شکستگی های مصنوعی در سنگ مخزن با استفاده از شکست هیدرولیکی اشاره کرد. شکست هیدرولیکی را می توان فرایند شروع شکست و انتشار آن به علت فشار هیدرولیکی اعمالی توسط سیال به داخل شکست تعریف کرد. پس از اثبات کارایی روش شکست هیدرولیکی به صورت صنعتی توسط شرکت هالیبرتون (Halliburton)، این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ متداول شد و از آن زمان، تحقیقات و مطالعات زیادی جهت بهبود عملیات و کنترل این روش انجام شده است. هوبرت و ویلیس (Hubbert and Willis, 1957) عنوان نمودند که شکست در امتداد تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل، شروع و گسترش می یابد آنها در واقع نخستین رابطه را برای محاسبه فشار شکست به صورت رابطه ی (۱) ارائه نمودند:

$$P_b = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{Hmax} + T - P_p \quad (1)$$

که در آن σ_{hmin} تنش افقی حداقل، σ_{Hmax} تنش افقی حداکثر، T مقاومت کششی، P_p فشار منفذی و P_b فشار شکست می باشد.

دانشی (Daneshy, 1974) در مطالعاتش به نتایجی که قبلاً توسط هوبرت و ویلیز ارائه شده بود، دست یافت. اما این محقق عنوان کرد که شکستگی های

طبیعی موجود در سازند بر روی گسترش و توسعه شکافت هیدرولیکی تاثیرگذار می باشد. بلانتون (Blanton, 1986) با انجام مطالعات آزمایشگاهی اظهار داشت که تنش تفاضلی (اختلاف میان تنش افقی حداقل و حداکثر) و زاویه برخورد میان شکافت هیدرولیکی و شکافت طبیعی، فاکتورهای مهم و تاثیرگذار بر روی شکل و امتداد شکست می باشد. ایشان یک معیار برای برهم کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکافت طبیعی ارائه کردند.

ژانگ و چن (Zhang and Chen, 2010) گسترش شکست هیدرولیکی را بررسی کرده اند. آن ها بر اساس مکانیزم شکست و تئوری های شکست هیدرولیکی، مدلی را برای مسیر گسترش شکست ارائه دادند که این مدل تأثیر تنش های مختلف را بر تغییر مسیر گسترش شکست، نشان می دهد. شکست جدید به تدریج جهت خود را تغییر می دهد تا در جهت ماکزیمم تنش افقی قرار گیرد. مسیرهای پیش بینی شده در تطابق با آزمایشات سه محوره می باشد.

گو و همکارانش (Guo et al., 2005) آزمایشات شکست هیدرولیکی را در بلوکهای ژیبس با ابعاد $305 \times 305 \times 305$ و $610 \times 584 \times 305$ میلی متر، به منظور بررسی اثرات تنش اصلی حداقل و دبی تزریق شکست هیدرولیکی، انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که نرخ گسترش شکست با افزایش تنش اصلی حداقل کاهش می یابد. دبی تزریق بالا، باعث افت فشار سریع شده و شکست های طولانی تری را ایجاد می کند. فشار شکست با افزایش دبی تزریق، افزایش یافته و معمولاً بیشتر از آنچه تئوری می تواند پیش بینی کند برآورد می شود. ژو و همکاران (Zhou et al, 2007) در سال ۲۰۰۷ مطالعاتی را در زمینه ی مکانیسم شکافت هیدرولیکی در مخازن شکافدار انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که

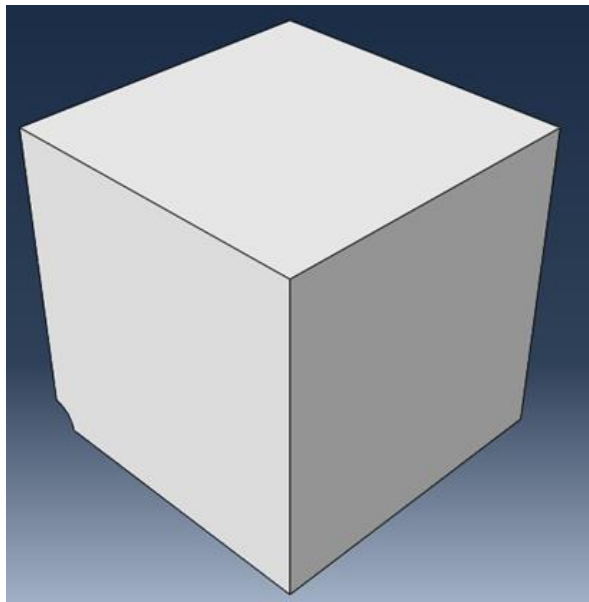
در یکی از جدیدترین تحقیقات اکرمی و حسینی (اکرمی و حسینی، ۱۳۹۶) مدلسازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را با استفاده از سلول سه محوری هوک تغییر یافته انجام دادند. آنها برای انجام این تحقیق از نمونه های کرناته ی استوانه ای تو خالی جدار ضخیم استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش جانبی فشار شکست نیز افزایش می یابد ولی با تغییر تنش محوری، فشار شکست تغییر چندانی نمی کند و همچنین شکستگی های ایجاد شده عمدتاً در راستای قائم (محور گمانه) هستند.

این پژوهش از این لحاظ نیز حائز اهمیت می باشد که برای اجرای یک عملیات موفق نیاز است تا عوامل موثر بر فشار شروع شکست هیدرولیکی بررسی شود تا بتوان مکان مناسب عملیات شکست هیدرولیکی را در چاه نفت یا گاز مشخص کرد تا هم هزینه های عملیاتی پایین بیاید و هم شکست بهتر و موثرتری داشته باشیم. اکثر تحقیقات گذشته روی نمونه های ترک دار انجام شده و تحقیقات انجام شده روی مدلسازی عددی نمونه های بدون ترک برای بررسی عوامل موثر بر فشار شروع شکست هیدرولیکی اندک می باشد. در اکثر تحقیقات قبلی از روش های اجزا محدود، المان مرزی و تفاضل محدود استفاده شده است. روش المان محدود توسعه یافته یکی از جدیدترین روشهای مدلسازی مسایل مکانیک شکست است. این روش نسبت به روش های پیشین دارای مزایای بسیاری است. مدل کردن ناپیوستگی ها مثل یک ترک با روش المان محدود معمولی و المان مرزی نیازمند آن است که مش از هندسه ناپیوستگی تبعیت کند در روش المان محدود یا المان مرزی از مش بسیار ریز و یا المان های تکین در نوک ترک استفاده می شود. مدل کردن یک ترک در حال رشد حتی پیچیده تر خواهد بود زیرا همانطور که ترک رشد میکند مش نیز باید بتواند خود را با هندسه جدید ترک در هر گام رشد مطابقت دهد روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای روش المان محدود معمولی ساخته شده و تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می شوند. به این توابع خاص، توابع غنی سازی می گویند.

در حالت رژیم تنش نرمال، تفاوت تنش های افقی و زاویه تقاطع بر روی شکافت هیدرولیکی به عنوان فاکتور های اصلی و همچنین ضریب اصطکاک داخلی و فشار خالص (اختلاف میان فشار تزریق و تنش اصلی حداقل) به عنوان پارامترهای فرعی موثر می باشد. همچنین تاثیر رژیم تنش تکتونیککی ناحیه ای بر روی گسترش شکافت هیدرولیکی نسبت به شکاف های طبیعی بیشتر می باشد.

عبدالله پور و همکاران (Abdollahipour et al., 2016) در سال ۲۰۱۶ اثر فشار محصورکننده بر روی بازشدگی ترک و جابه جایی ناشی از آن را با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کردند. نتایج عددی آنها حاکی از آن است که فشار محصورکننده تأثیر زیادی بر روی بازشدگی ترک و جابه جایی ناشی از آن دارد. آنها با استفاده از رگرسیون چند متغیره بین پارامترهایی نظیر فشار محصورکننده، خواص توده سنگ و فشار سیال و با استفاده از نتایج روش عددی یک معادله ی تجربی برای تعیین بازشدگی ترک با در نظر گرفتن اثر فشار محصور کننده ارائه کردند.

ملاعلی و یزدانی (ملا علی و یزدانی، ۱۳۹۳) اثر نرخ تزریق سیال گوناگون و اثر مقادیر مختلف لزجت سیال را بر روی فشار شکست و بازشدگی ترک بررسی کردند. نتایج آنها نشان می دهد که نرخ تزریق بالاتر باعث ایجاد فشار بیشتر در طول ترک می شود. همچنین در نرخ تزریق بالاتر بازشدگی بیشتر که به علت فشار بیشتر است، رخ می دهد. با افزایش لزجت نیز به دلیل مقاومت اضافه شده جهت وارد کردن سیال در ترک، فشار افزایش می یابد. از طرفی دیگر، در نرخ تزریق یکسان، افزایش لزجت باعث افزایش بازشدگی ترک می شود. دهقان و همکاران (دهقان و همکاران، ۱۳۹۴) بر روی شروع و گسترش شکست هیدرولیکی در نمونه های شکافدار و بدون شکاف کار کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که وجود شکاف طبیعی در نمونه منجر به کاهش فشار شروع شکست به حدود دو سوم فشار، در نمونه های بدون شکاف طبیعی می شود.



شکل ۱. هندسه ی نهایی مدل ساخته شده

پس از ساخت مدل اولیه خصوصیات محیط بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۱ تعریف شد، سپس محیط گسترش ترک به روش المان محدود توسعه یافته تعریف شد و در کل نمونه اجازه ی رشد ترک داده شد و مکان خاصی برای گسترش ترک در نظر گرفته نشد. روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای روش المان محدود معمولی ساخته شده و تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می شوند. به این توابع خاص، توابع غنی سازی می گویند. در روش المان محدود توسعه یافته با افزودن درجه آزادی به گره های اطراف ترک، رشد ترک مدل می شود.

پس از انجام این کار تنش های اعمالی به محیط که شامل تنش افقی حداکثر و حداقل، تنش قائم و فشار سیال داخل گمانه می شد تعریف گردید که در شکل های ۲ تا ۵ قابل مشاهده هستند.

۲. مدل سازی های عددی انجام شده

یکی از پرکاربردترین نرم افزارها که بر پایه روش اجزای محدود کار می کنند نرم افزار ABAQUS است. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هیبیت (David Hibbitt) و همکارانش ایجاد شد؛ در ابتدا این نرم افزار برای حل مسائل انرژی هسته ای و مهندسی حفاری طراحی شده بود چرا که مهندسين در این شاخه ها به ابزاری برای مطالعه مسائل پیچیده و غیرخطی نیاز داشتند. برای مدل سازی در این تحقیق از نرم افزار ABAQUS ویرایش ۶.۱۴ استفاده شده است. به منظور مدل سازی چاه نفت و محیط اطراف آن یک مربع 4×4 و یک دایره به قطر 0.3 متر (معادل 12 اینچ) رسم شد. به جهت مقارن بودن نمونه و جهت صرفه جویی در وقت و هزینه از مقطع $1/4$ مدل استفاده شد و نهایتاً یک ارتفاع 2 متری برای مدل در نظر گرفته شد. مقطع نهایی مدل ساخته شده در شکل ۱ قابل مشاهده است.

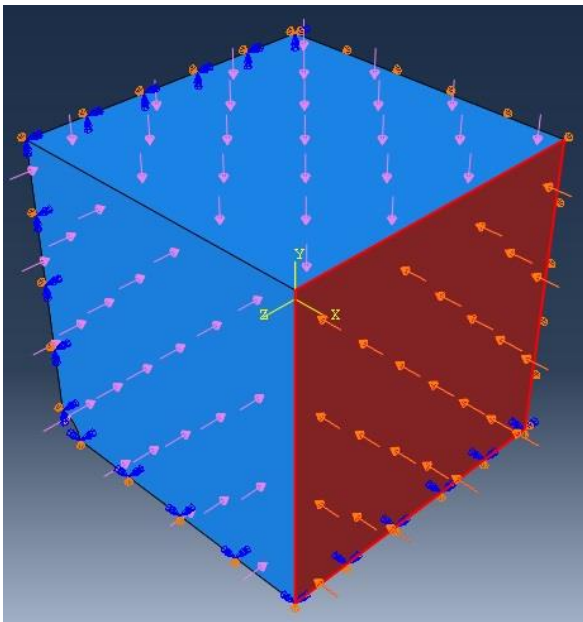
پارامتر های ورودی به این مدل شامل تنش افقی حداقل و حداکثر، تنش قائم، مقاومت کششی، فشار منفذی، نسبت پواسون و مدول یانگ می باشد. روش کار به این صورت است که در ابتدا برای 10 داده که مربوط به چاه های کربناته ی ایران می باشند (شیرین آبادی و همکاران، ۱۳۸۵؛ شغائی زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ کوچکی و گشتاسبی، ۱۳۸۶؛ چمن زاد و همکاران، ۱۳۹۴؛ سیدسجادی و عقیقی، ۱۳۹۴)، فشار شکست به دست آمد و در ادامه با انجام تحلیل حساسیت تاثیر هر یک از پارامتر های ورودی بر فشار شکست مشخص گردید.

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی سنگهای کربناته در چاه های نفتی مورد مطالعه (شیرین آبادی و همکاران، ۱۳۸۵؛ شفائی زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ کوچکی و گشتاسبی، ۱۳۸۶؛ چمن زاد و همکاران، ۱۳۹۴؛ سیدسجادی و عقیقی، ۱۳۹۴)

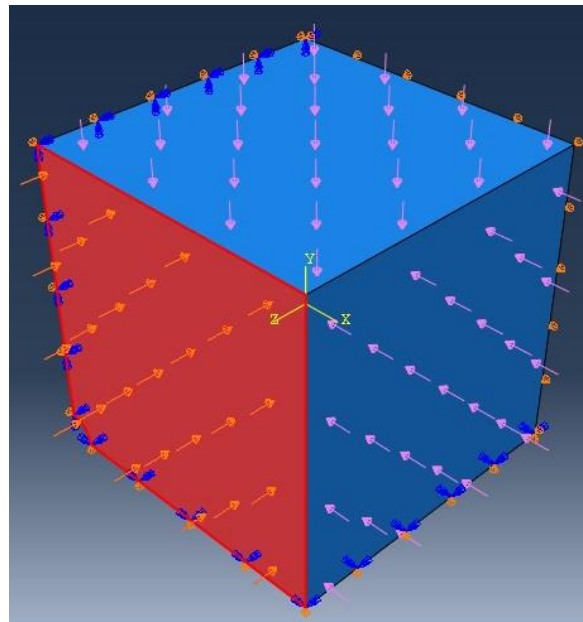
Number	T(MPa)	E(GPa)	ν	$K_{IC}(\text{MPa}\cdot\text{m})^{1/2}$	$G_I(\text{J/m}^2)$
1	8.1	50	0.3	1.18	27.72
2	3	3	0.3	0.436	63.37
3	3	3	0.3	0.436	63.37
4	13.6	44	0.3	1.98	88.8
5	4.75	26	0.25	0.69	18.33
6	4.8	24.4	0.2	0.698	19.95
7	3.2	11.7	0.22	0.465	18.5
8	5.3	46.195	0.3	0.77	12.85
9	7.8	48.264	0.3	1.13	26.63
10	5.2	40	0.3	0.75	14.28

در جدول ۱، T مقاومت کششی، E مدول یانگ، ν نسبت

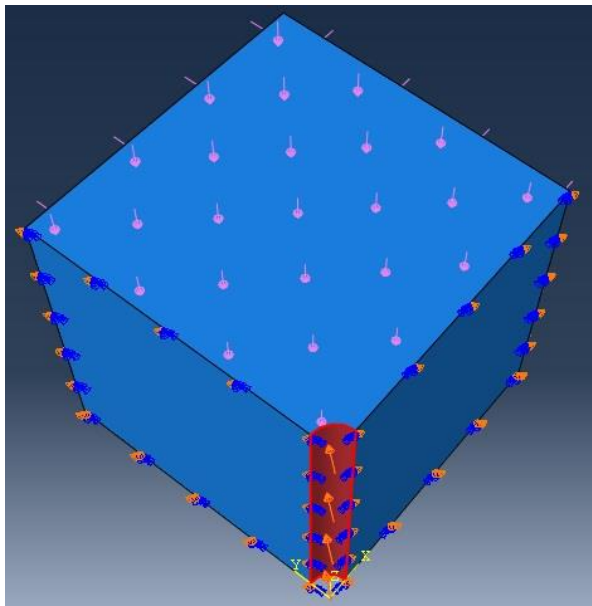
پواسون، K_{IC} چقرمگی شکست مود I و G_I انرژی شکست می باشد.



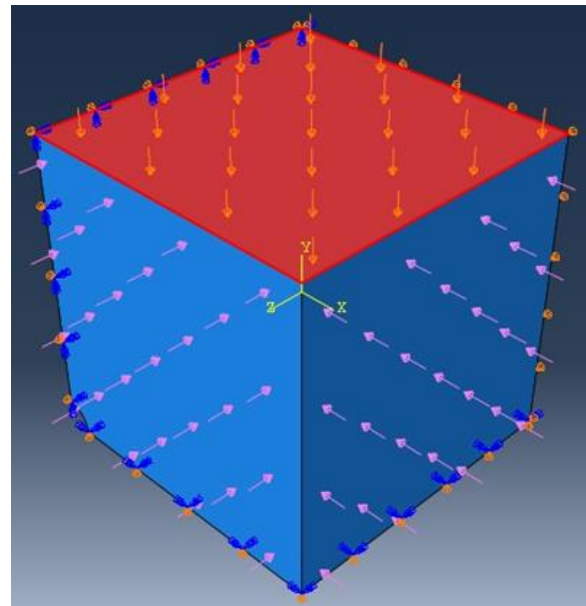
شکل ۳. سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداقل (σ_x)



شکل ۲. سطح مورد نظر برای اعمال تنش عمودی (σ_z)



شکل ۵. سطح مورد نظر برای اعمال فشار داخل گمانه



شکل ۶. سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداکثر (σ_y)

بنابراین تنش فشاری نمی تواند منجر به ایجاد آسیب شود (شلیلیان، ۱۳۹۵).

برای حل این مدل دو step در نظر گرفته شد که از step-1 برای تعریف تنش های موجود در محیط و از step-2 برای اعمال فشار سیال داخل گمانه استفاده شد. فشار شکست از طریق گام زمانی که step-2 به ما می دهد و با توجه به فشار سیالی که که تعریف شده به دست می آید (به عنوان مثال اگر فشار سیال تعریف شده ۱۰۰ مگا پاسکال و زمان گام دوم تا جوانه زنی ترک ۰/۲۵۰۰ باشد، فشار شکست ۲۵ مگا پاسکال به دست می آید). داده های ورودی و نتایج به دست آمده از این مدل سازی ها در جدول ۲ قابل مشاهده است. وضعیت رشد و گسترش ترک در مدل ۶ در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

در این جدول ۲، σ_{HMax} تنش افقی حداکثر، σ_{hmin} تنش افقی حداقل، σ_v تنش قائم، T مقاومت کششی، P_p فشار منفذی، E مدول یانگ و ν نسبت پواسون می باشد.

قابل ذکر است که بار اعمال شده جهت فشار سیال داخل گمانه به صورت خطی و صعودی تغییر می کند. شرایط مرزی که به نمونه اعمال شد در شکل ۶ قابل مشاهده است که در ۲ جهت XZ و YZ به خاطر استفاده از مقطع ۱/۴ جا به جایی و اعمال بار محدود شده و در جهت عمود بر راستای چاه یعنی صفحه ی XY نیز جا به جایی ها محدود شده اند.

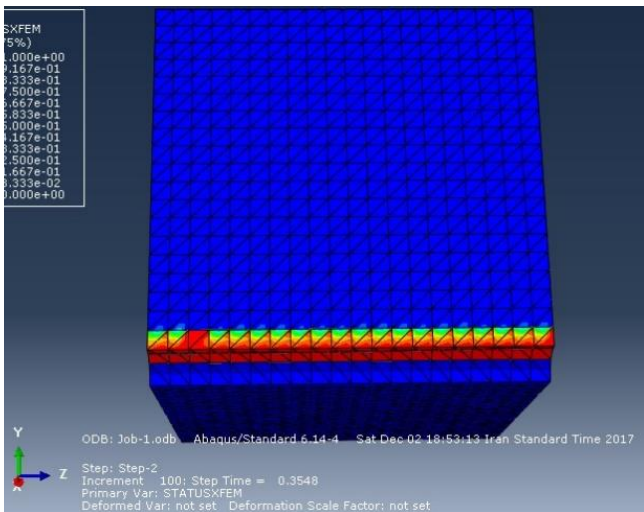
برای مش زنی مدل از المان های چهار وجهی Tet و تکنیک مش زنی از نوع Free استفاده شد تا مش ازالگویی از پیش تعیین شده ی پیروی نکند. در این پژوهش، از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه که در نرم افزار آباکوس پیاده سازی شده، استفاده شده است. این معیار بر اساس رابطه ی (۲) تعریف می شود.

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\langle \sigma_{max}^0 \rangle} \right\} \quad (2)$$

در این رابطه σ_{max}^0 به معنای بیشترین تنش اصلی مجاز ماده است. نماد $\langle \rangle$ به پراکنش ماکالای معروف است. هنگامی که آرگومان این تابع منفی شود، تابع مقدار صفر میگیرد. و برای مقادیر مثبت آرگومان، تابع برابر با مقدار آرگومانش می شود.

جدول ۲. نتایج مدلسازی های عددی

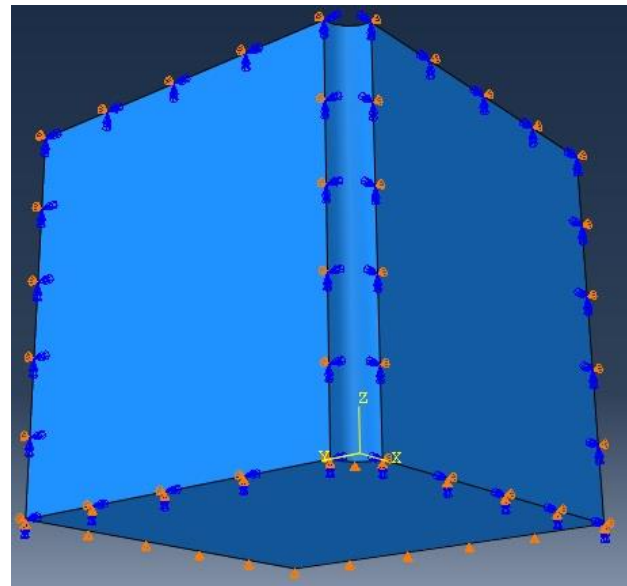
Number	σ_{hmax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T (MPa)	P_p (MPa)	E (GPa)	ν	fracture pressure (MPa)
1	48.12	45.71	75.06	8.1	27.46	50	0.3	47.257
2	92.1	64.4	94.5	3	28	3	0.3	65.492
3	99.36	51.3	94.5	3	28	3	0.3	20.531
4	59.4	44.5	96.7	13.6	31.1	44	0.3	35.895
5	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	70.94
6	51.4	37.8	68.5	4.8	27	24.4	0.2	20.648
7	62	57.9	59.7	3.2	32	11.7	0.22	57.169
8	84	63.5	99.8	5.3	43.5	46.195	0.3	37.256
9	71.2	57.8	107.8	7.8	42	48.264	0.3	34.76
10	94.7	84.5	111.8	5.2	53.5	40	0.3	66.944



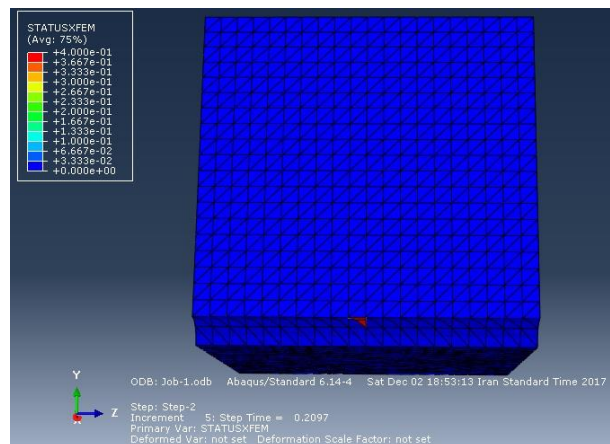
شکل ۷. ب. ترک کاملاً گسترش یافته در مدل شماره ۶

۳. تحلیل حساسیت

به منظور تأثیر هر یک از پارامترها بر فشار شروع شکست هیدرولیکی، تحلیل حساسیت بر روی پارامترها انجام شده است. روش کار در این مرحله بدین صورت است که ورودی یک چاه به عنوان داده‌ی مبنا در نظر گرفته شده و در هر مرحله یک پارامتر ورودی تغییر می‌کند و بقیه‌ی پارامترهای ورودی‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای ورودی برای انجام تحلیل حساسیت در جدول ۳ آورده شده است. برای انجام این تحلیل حساسیت از داده‌های جدول ۱ استفاده شده است، بدین صورت که برای تحلیل حساسیت یک پارامتر، سه عدد در نظر گرفته می‌شود که شامل بیشترین و کمترین مقدار آن پارامتر در جدول ۱ و همچنین مقدار میانگین آن پارامتر می‌باشد و برای هر حالت فشار شکست

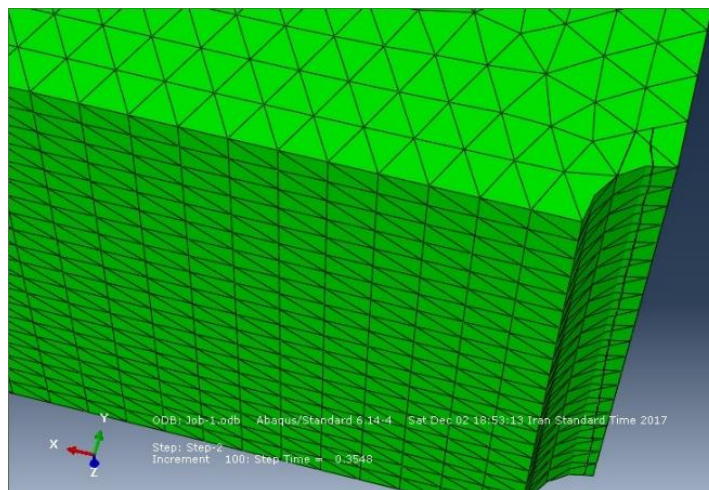


شکل ۶. شرایط مرزی اعمال شده به نمونه



شکل ۷. الف. نحوه‌ی شروع ترک در مدل شماره ۶

به دست می‌آید. نظر گرفته شده در صورتی قابل قبول است که از تنش افقی حداقل یا حداکثر در جدول مینا (جدول ۳) تجاوز نکند.



شکل ۸. مسیر گسترش ترک در مدل شماره ۶

جدول ۳. داده‌های مورد استفاده برای تحلیل حساسیت (چمن زاد و همکاران، ۱۳۹۴)

σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν
61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25

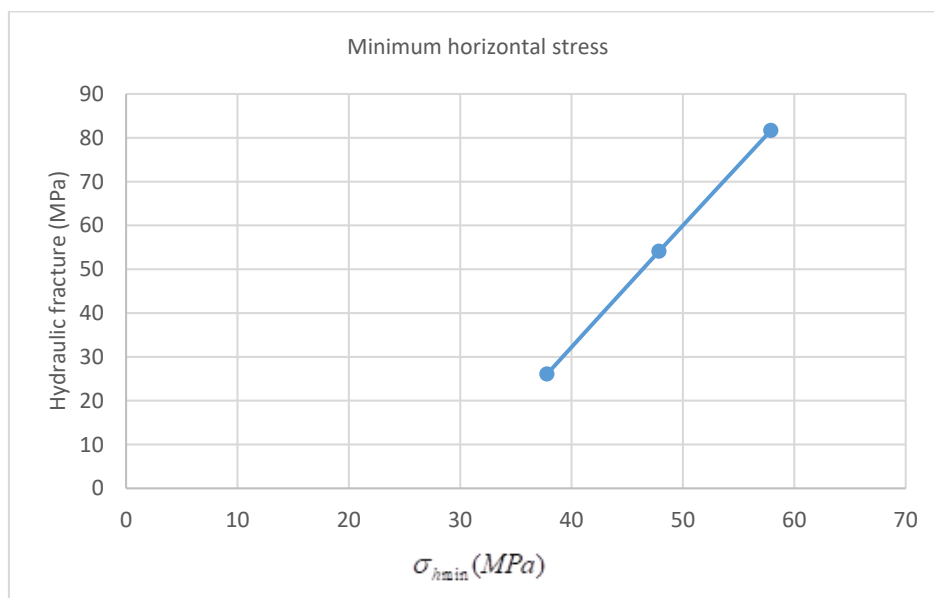
۳-۱. تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداقل

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداقل، در جدول ۴ آورده شده است. با افزایش تنش افقی حداقل فشار شکست افزایش پیدا می‌کند ولی اختلاف بین تنش افقی حداکثر و حداقل نیز عامل تأثیرگذار مهمی روی فشار شکست است. انتشار ترک‌ها

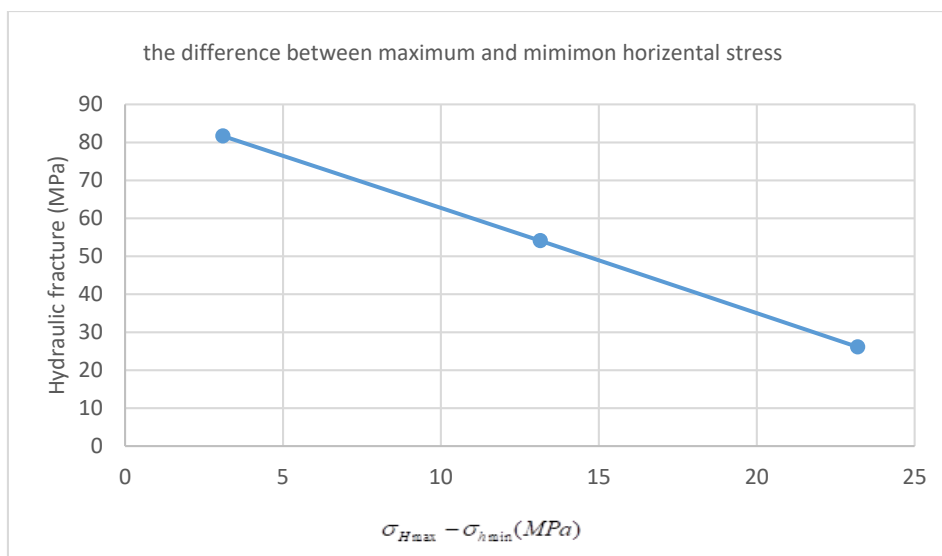
عمود بر جهت تنش افقی حداقل می باشد. قابل ذکر است که در اثر افزایش ۲۱٪ تنش افقی حداقل، فشار شکست ۵۱٪ افزایش داشته و در اثر کاهش ۲۱٪ این تنش فشار شکست ۵۱٪ کاهش پیدا می‌کند. شکل ۹ تغییرات فشار شکست بر حسب تنش افقی حداقل و شکل ۱۰ تغییرات فشار شکست بر حسب اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل (در حالتیکه تنش افقی حداکثر ثابت است) را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداقل

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	57.9	58.8	4.75	21.8	26	0.25	81.67
2	61	47.85	58.8	4.75	21.8	26	0.25	54.08
3	61	37.8	58.8	4.75	21.8	26	0.25	26.09



شکل ۹. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب تنش افقی حداقل



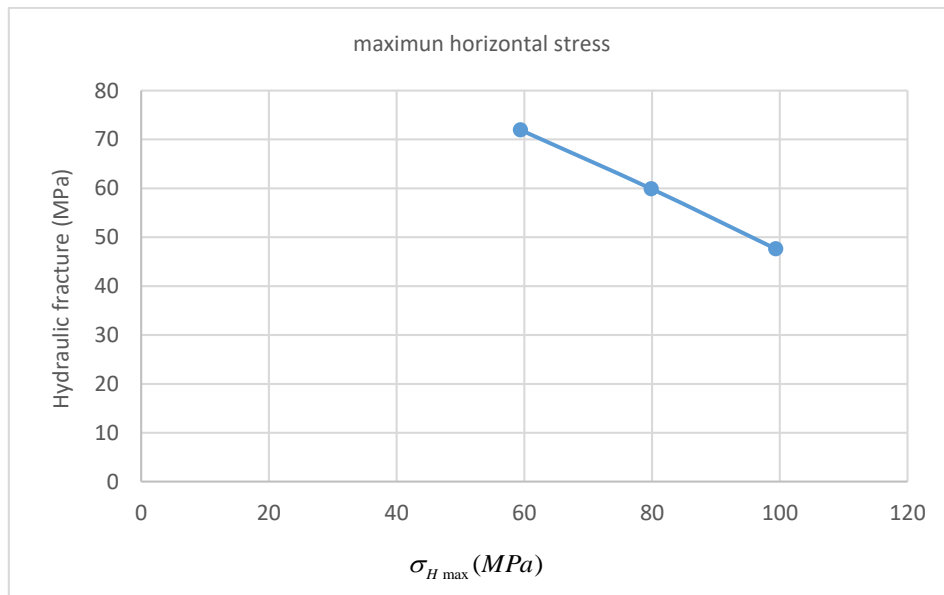
شکل ۱۰. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل (در حالتیکه تنش افقی حداکثر ثابت است)

تنش افقی حداکثر، فشار شکست ۲۰/۵٪ کاهش و در اثر کاهش ۲۵٪ این تنش فشار شکست ۲۰/۵٪ افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۱ تغییرات فشار شکست بر حسب تنش افقی حداکثر و شکل ۱۲ تغییرات فشار شکست بر حسب اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل (در حالتیکه تنش افقی حداقل ثابت است) را نشان می‌دهد.

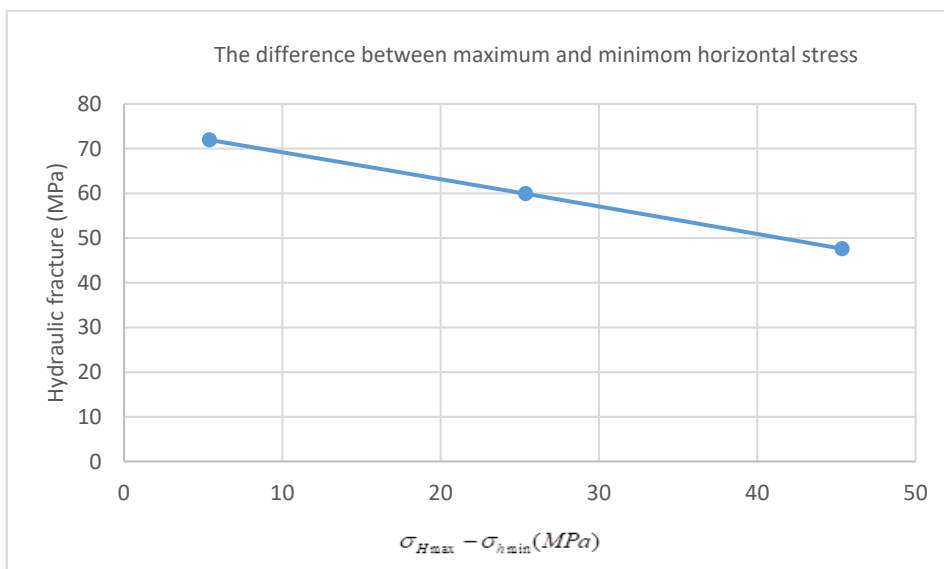
۲-۳. تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداکثر داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداکثر در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که ذکر شد عامل تأثیرگذار در اینجا اختلاف بین تنش افقی حداکثر و حداقل می‌باشد و هرچه این اختلاف کمتر باشد، فشار شکست بیشتر می‌شود. در اثر افزایش ۲۵٪

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت روی تنش افقی حداکثر

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	99.36	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	47.61
2	79.38	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	59.91
3	59.4	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	71.95



شکل ۱۱. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب تنش افقی حداکثر



شکل ۱۲. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل (در حالتیکه تنش افقی حداقل ثابت

است)

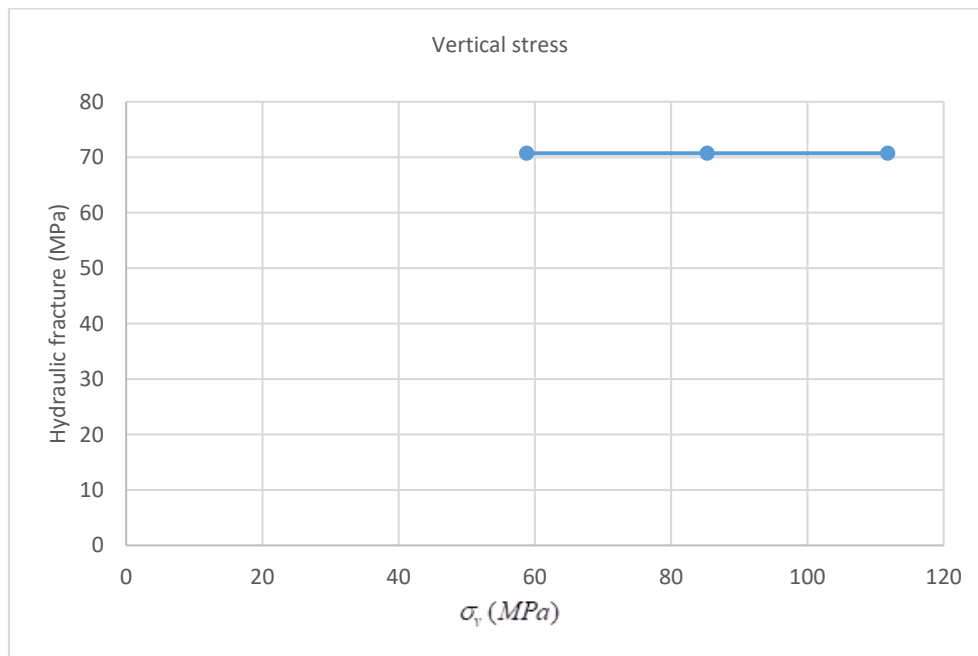
۳-۳. تحلیل حساسیت روی تنش قائم

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییرات تنش قائم تأثیری بر روی فشار شکست ندارد. نمودار تغییرات فشار شکست با توجه به تغییرات تنش قائم در شکل ۱۳ آورده شده است.

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی تنش قائم در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت روی تنش قائم

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	54	111.8	4.75	21.8	26	0.25	70.94
2	61	54	85.3	4.75	21.8	26	0.25	70.94
3	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	70.94



شکل ۱۳. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب تنش قائم

افزایش ۶۳/۸٪ مقاومت کششی فشار شکست ۸/۵٪ افزایش و در اثر کاهش ۶۴٪ آن فشار شکست ۸/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. نمودار تغییرات فشار شکست بر حسب تغییرات مقاومت کششی در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند این تغییرات خطی است.

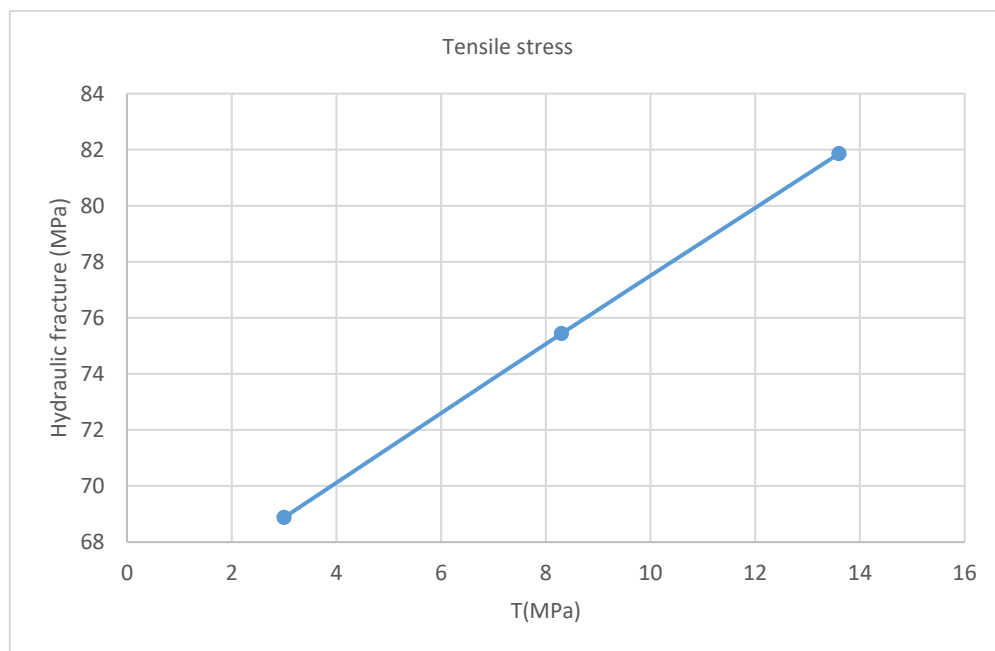
۳-۴. تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی در جدول ۷ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش مقاومت کششی باعث افزایش فشار شکست می‌شود. قابل ذکر است که در اثر

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت روی مقاومت کششی

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	54	58.8	13.6	21.8	26	0.25	81.76
2	61	54	58.8	8.3	21.8	26	0.25	75.44
3	61	54	58.8	3	21.8	26	0.25	68.88



شکل ۱۴. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مقاومت کششی

۵-۳. تحلیل حساسیت روی فشار منفذی

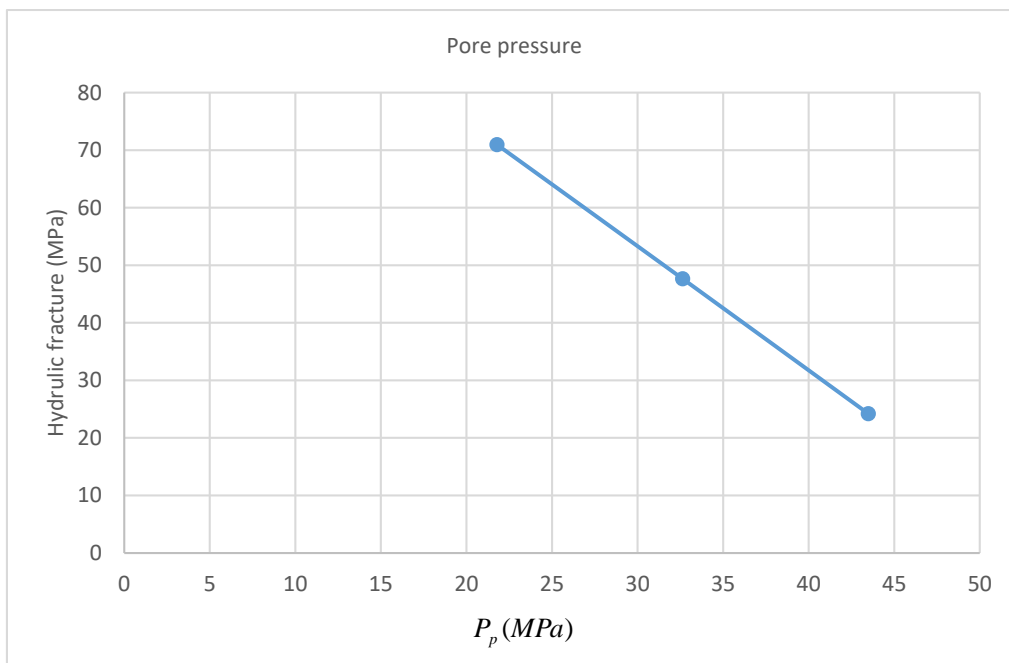
داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی فشار منفذی در جدول ۸ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش فشار منفذی باعث کاهش فشار شکست می‌شود. در واقع فشار منفذی باعث کاستن از سهم تنش‌های فشاری شده و موجب سریع‌تر

شکستن سنگ می‌گردد. قابل ذکر است که در اثر افزایش ۳۳٪ فشار منفذی فشار شکست ۴۸/۹٪ کاهش و در اثر کاهش ۳۳٪ آن فشار شکست ۴۸/۹٪ افزایش یافته است. نمودار تغییرات فشار شکست بر حسب فشار منفذی در شکل ۱۵ آورده شده است.

جدول ۸. نتایج تحلیل حساسیت روی فشار منفذی

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	54	58.8	4.75	43.5	26	0.25	24.19
2	61	54	58.8	4.75	32.65	26	0.25	47.63
3	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	70.94



شکل ۱۵. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب فشار منفذی

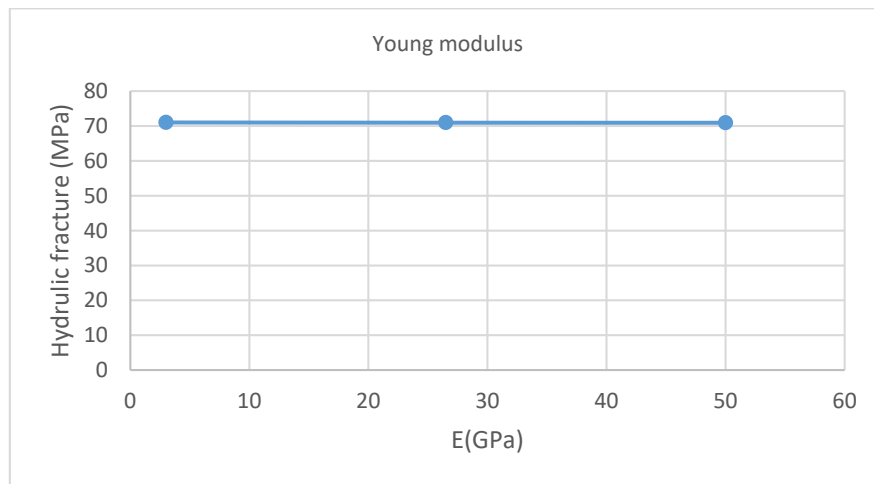
بر روی فشار شکست هیدرولیکی بسیار ناچیز و قابل اغماض است. نمودار تغییرات فشار شکست با توجه به تغییرات مدول یانگ در شکل ۱۶ آورده شده است.

۳-۶. تحلیل حساسیت روی مدول یانگ

داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی مدول یانگ در جدول ۹ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اثر مدول یانگ

جدول ۹. نتایج تحلیل حساسیت روی مدول یانگ

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P _p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	54	58.8	4.75	21.8	50	0.25	70.92
2	61	54	58.8	4.75	21.8	26.5	0.25	70.94
3	61	54	58.8	4.75	21.8	3	0.25	71.01



شکل ۱۶. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب مدول یانگ

۳-۷. تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون

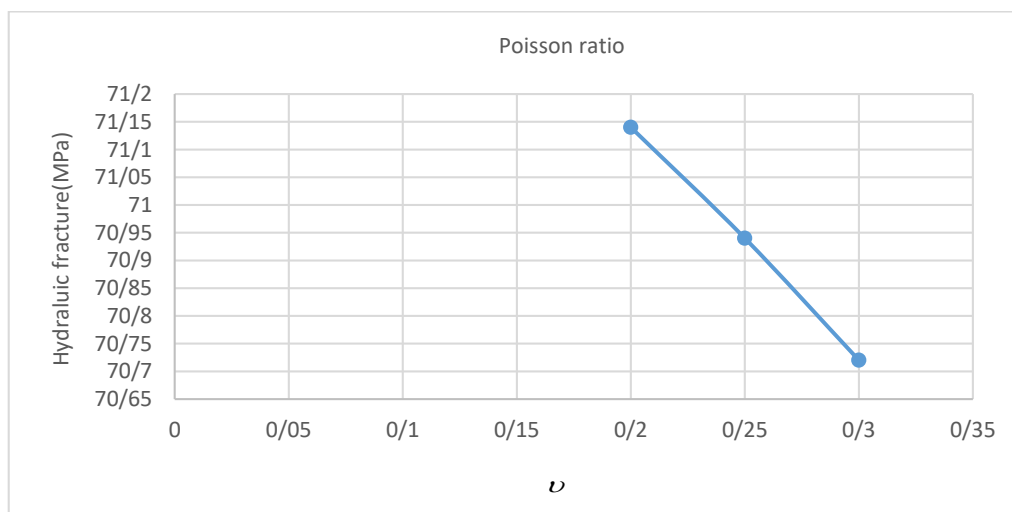
داده‌ها و نتایج تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون جدول ۱۰ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییرات نسبت پواسون تأثیر بسیار کمی بر روی فشار شکست دارد و با کاهش نسبت

پواسون فشار شکست افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که با افزایش ۲۰٪ نسبت پواسون فشار شکست ۰/۳٪ کاهش و در اثر کاهش ۲۰٪ آن فشار شکست ۰/۲۸٪ افزایش پیدا می‌کند. نمودار تغییرات فشار شکست بر حسب نسبت پواسون در شکل ۱۷ آورده شده است.

جدول ۱۰. نتایج تحلیل حساسیت روی نسبت پواسون

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	fracture pressure(MPa)
1	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.3	70.72
2	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.25	70.94
3	61	54	58.8	4.75	21.8	26	0.2	71.14



شکل ۱۷. نمودار تغییرات فشار شروع شکست بر حسب نسبت پواسون

۳-۱. جمع بندی نتایج تحلیل حساسیت

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی نسبت پواسون، فشار شکست ۰/۱۶٪ کاهش می یابد.

در نتیجه اثر پارامترهای فوق بر فشار شکست به ترتیب زیر خلاصه می شوند:

۱- تنش افقی حداقل

۲- فشار منفذی

۳- تنش افقی حداکثر یا در واقع اختلاف تنش های افقی حداکثر و حداقل

۴- مقاومت کششی

۵- نسبت پواسون

۴. صحت سنجی نتایج

برای صحت سنجی مدل سازی های عددی از داده های فشار شکست هیدرولیکی که از روش آزمایشگاهی به دست آمده اند، کمک گرفته شد. روش کار به این صورت است که مدل سازی عددی با شرایط ذکر شده در آزمایش انجام و نتایج به دست آمده با روش آزمایشگاهی مقایسه شد. ابعاد بلوک ساخته شده برای آزمایش ۳۰×۳۰×۳۰ سانتی متر بوده که پس از ساخت بلوک یک حفره به قطر ۶ میلی متر و ارتفاع ۱۵ سانتی متر در وسط بلوک به منظور تزریق سیال حفاری شده است (شکل ۱۸) (دهقان و همکاران، ۱۳۹۴). قابل ذکر است که جهت صرفه جویی در زمان و هزینه و به جهت مقارن بودن مدل در اینجا نیز از ۱/۴ مقطع در مدل سازی استفاده شده است. در شکل ۱۹ نمایی از مقطع مدل سازی شده قابل مشاهده است (دهقان و همکاران، ۱۳۹۴). داده ها و فشار شکستی که از روش عددی و آزمایشگاهی به دست آمده است، در جدول ۱۱ قابل مشاهده است.

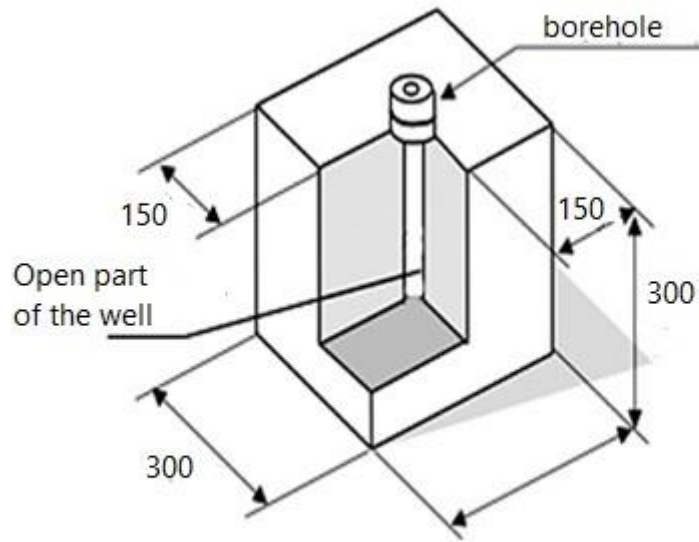
بر اساس نتایج می توان گفت تنش عمودی که نشان دهنده عمق مخزن است تاثیری بر فشار شکست هیدرولیکی ندارد. تنش های افقی حداکثر و حداقل در صورتی که تنش های تکتونیک در منطقه حاکم نباشد با افزایش عمق مخزن افزایش می یابند و اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل کاهش می یابند و فشار شکست افزایش می یابد. در ضمن پارامترهای تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر (اختلاف تنش افقی حداکثر و حداقل)، مقاومت کششی، فشار منفذی و نسبت پواسون در تخمین فشار شکست تأثیرگذار هستند. حال برای اینکه مشخص شود فشار شکست به کدام یک از این پارامترها حساس تر است، یک تحلیل حساسیت دیگر نیز انجام شد. در این تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای تأثیرگذار به میزان ۱۰٪ افزایش می یابند تا با یک افزایش ثابت برای همه ی پارامترها تغییرات فشار شکست بررسی گردد. قابل ذکر است که در انجام این تحلیل حساسیت نیز از داده های جدول ۳ به عنوان داده های مبنا استفاده گردیده است.

نتایج این تحلیل حساسیت به شرح ذیل می باشد:

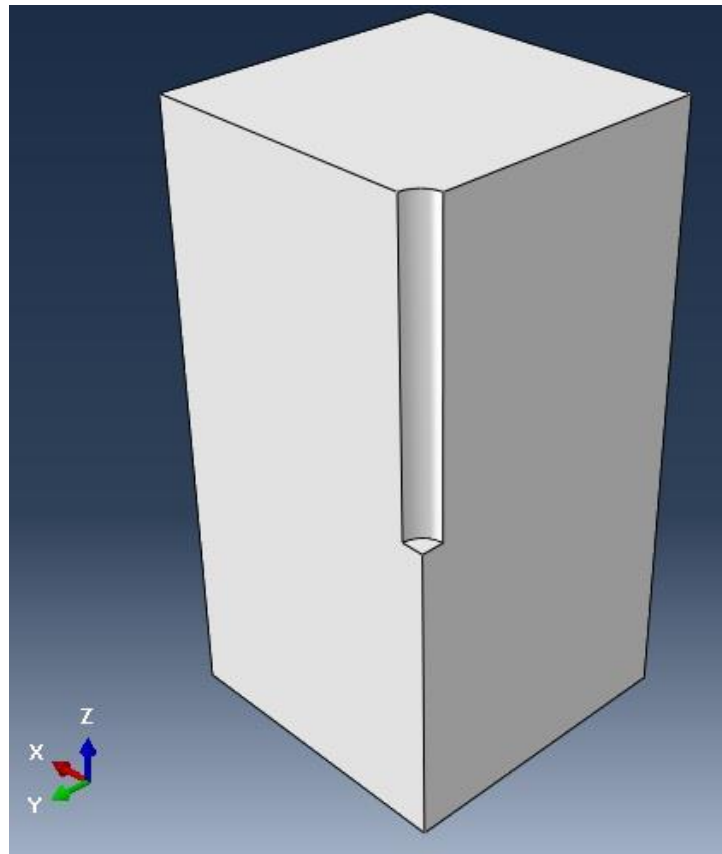
- در اثر افزایش ۱۰ درصدی تنش افقی حداقل، فشار شکست ۲۱٪ افزایش می یابد.
- در اثر افزایش ۱۰ درصدی تنش افقی حداکثر، فشار شکست ۵٪ کاهش می یابد.
- در اثر افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی، فشار شکست ۰/۹۷٪ افزایش می یابد.
- در اثر افزایش ۱۰ درصدی فشار منفذی، فشار شکست ۶/۶٪ کاهش می یابد.

جدول ۱۱. داده ها و نتایج روش عددی و آزمایشگاهی

Number	σ_{HMax} (MPa)	σ_{hmin} (MPa)	σ_v (MPa)	T(Mpa)	P_p (MPa)	E(GPa)	ν	Experimental fracture pressure (MPa)	Numerical fracture pressure (MPa)
1	6	4	10	5.05	0	30	0.2	14.72	13.82



شکل ۱۸. شماتیک طرح استفاده شده برای مدل‌سازی (دهقان و همکاران، ۱۳۹۴)



شکل ۱۹. نمایی از مقطع مدل‌سازی شده

به دست آمد. سپس بر روی هر یک از پارامترهای ورودی با در نظر گرفتن یک داده به عنوان داده ی مبنا و بیشترین و کمترین مقدار آن پارامتر در ۱۰ مدل آنالیز شده، تحلیل حساسیت انجام شد، تا اثر هر پارامتر بر فشار شکست هیدرولیکی مشخص گردد.

به طور کلی نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به شرح ذیل است:

- ۱- تنش افقی حداقل بیشترین تأثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی دارد و همانطور که انتظار می‌رفت جوانه‌زنی و رشد ترک در راستای عمود بر این تنش اتفاق می‌افتد.
- ۲- یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر فشار شکست هیدرولیکی اختلاف تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشد به نحوی که هر چه این اختلاف کمتر باشد، فشار شکست بیشتر می‌گردد.
- ۳- پارامترهایی مثل مدول یانگ و تنش قائم تأثیری بر فشار شکست هیدرولیکی ندارند و همچنین پارامتر نسبت پواسون کمترین تأثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی دارد به نحوی که از آن می‌توان صرف‌نظر کرد.

همان‌طور که در جدول ۱۱ نیز مشاهده می‌شود نتایج روش عددی و روش آزمایشگاهی اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. اختلاف ۶/۵٪ به دست آمده ناشی از شرایط واقعی موجود در زمین است. همچنین این اختلاف کم نتایج روش عددی را تأیید می‌کند.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد پارامترهای تنش افقی حداکثر و حداقل و اختلاف آن‌ها بیشترین تأثیر را بر روی فشار شکست و پارامترهایی مثل نسبت پواسون، مدول یانگ و تنش قائم کمترین تأثیر را روی این فشار دارند. همچنین اختلاف بسیار کم نتایج عددی و آزمایشگاهی در قسمت صحت سنجی، تمامی نتایج به دست آمده از روش عددی را مورد تأیید قرار داد.

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا فشار شکست هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS برای ۱۰ مدل مختلف که داده های آن از چاه های کربناته ی ایران در نقاط مختلف استخراج شده بود،

منابع

- اکرمی، ع. و حسینی، م.، ۱۳۹۶. مدلسازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره‌ی ۱۱، شماره‌ی ۲۱، ۸۳-۹۱
- چمن زاد، م. ع.، نوروزی بزمین آبادی س.، رمضان زاده ا.، تخم چی ب. و نوروزی ه.، ۱۳۹۴. مدلسازی ژئومکانیکی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری (مطالعه موردی در یکی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان)، اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، ۲۴-۲۲ اردیبهشت، مرکز همایش‌های بین‌المللی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.
- سید سجادی ش. و عقیقی م. ع.، ۱۳۹۴. ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان در میدان کوپال، نشریه‌ی علمی-پژوهشی معدن، دوره دهم، شماره ۲۶، ۲۱-۳۴.
- شفائی زاده ا.، فروزان م. ر.، فرامرزی ل.، ۱۳۹۳. شبیه‌سازی جوانه‌زنی و رشد ترک در عملیات شکست هیدرولیکی چاه نفت با استفاده از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۵، ۱۷۴-۱۶۴.
- شلیلیان، ر.؛ ۱۳۹۵. آموزش گام به گام Abaqus، انتشارات خلیج فارس، ۳۴۹ ص.
- شیرین آبادی ر.، رسولی و.، گشتاسبی ک.، ۱۳۸۵. تحلیل پایداری چاه در یکی از مخازن نفتی ایران، اولین کنگره مهندسی نفت ایران، ۹-۱۰ خرداد، تهران.
- دهقان ع. ن.، گشتاسبی ک.، آهنگری ک.، جین ی.، میسکیمینس ج.، ۱۳۹۴. مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه‌هایی از بلوک‌های سیمانی، پژوهش نفت، دوره ۲۵، شماره‌ی ۲-۸۵، ۱۸۹-۱۸۰.
- کوچکی ا. و گشتاسبی ک.، ۱۳۸۶. تحلیل پایداری چاه نفت سازند آسماری مخزن کوپال، ششمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، ۲۱-۲۳ اسفند، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

ملاعلی م. و یزدانی م.، ۱۳۹۳. مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن نفتی با اجزاء محدود توسعه یافته، مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۰، شماره ۱-۴، ۱۱-۳.

- Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A., Gholamnejad J., 2016. DEM simulation of confining pressure effects on crack opening displacement in hydraulic fracturing, *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Blanton, T.L., 1986. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium, 18-21 May, Louisville.
- Daneshy, A.A., 1974. Hydraulic Fracture Propagation in the Presence of Planes of Weakness, Soc. Petroleum Engineers Presented at the SPE European Spring Meeting, 29-30 May, Amsterdam, the Netherlands.
- Guo, F., Morgenstem, N. R., Scott, J. D., 2005. An experimental investigation into hydraulic fracture propagation" *Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Abstr., 30(3): 177-188.
- Hubbert, M. K., and Willis, D.G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing *Petr. Trans. AIME*, 210:153-163.
- Zhang, G., and Chen, M., 2010. Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70:, 266-272.
- Zhou, J., Chen, M., Jin, Y., Zhang, G.-q., 2007. Experimental study of propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir, *Acta Petrolei Sinica*, 28(5): 109-113.