

## ارائه مدلی برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های کربناته چاه‌های نفت ایران

مهدی آریا<sup>۱</sup>، مهدی حسینی<sup>۲</sup>، افشین فلاح<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۳- دانشیار، گروه آمار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۷/۰۲/۰۸)

### چکیده

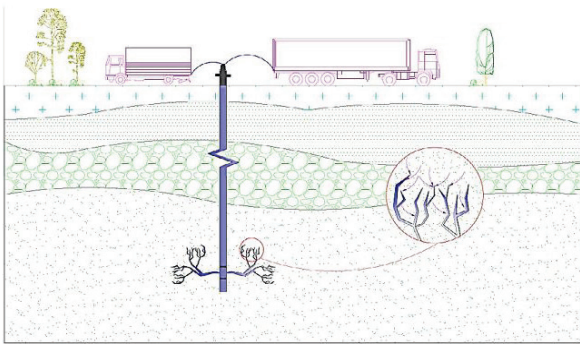
با توجه به نیاز روزافزون کشور به نرخ تولید بیشتر از چاه‌های نفتی و بازدهی بیشتر مخازن نفت، فعال‌سازی مجدد چاه‌های نفت در ایران امری ضروری به نظر می‌رسد. تولید نفت با گذشت زمان، به دلیل کاهش فشار مخزن و بسته شدن ترک‌ها و منافذ میکروسکوپی موجود در سنگ مخزن کاهش می‌یابد. شکست هیدرولیکی به عنوان روشی برای تحریک مخازن نفتی به عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های محیطی که شکستگی در آن رشد می‌کند، بستگی دارد. ویژگی‌های مکانیکی لایه‌ها به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر روند پیشروی شکست هیدرولیکی و هندسه آن شناخته شده‌اند. در این تحقیق سنگ اولیه به صورت بکر و بدون ترک فرض شده و تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف در ۲۱ حالت بر فشار شکست هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل حساسیت شده است. پارامترهای ورودی که تاثیر آن‌ها بر فشار شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته شامل مدول الاستیسیته، تنش افقی حداقل و حداکثر، تنش قائم، مقاومت کششی، نسبت پواسون و فشار منفذی است. اطلاعات مورد نیاز از چاه‌های حفر شده در سنگ‌های کربناته ایران گرفته شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماری رگرسیون چند متغیره، تخمین فشار شکست هیدرولیکی به عنوان تابعی از تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، فشار منفذی و مقاومت کششی ارایه شده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان‌دهنده دقت بسیار بالای خط رگرسیونی برازش شده و در واقع رابطه ارایه شده است. در این رابطه به ترتیب پارامترهای تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، فشار منفذی و مقاومت کششی بیشترین تاثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی نشان دادند. به کمک رابطه ارایه شده در این تحقیق، می‌توان فشار شروع شکست هیدرولیکی در سنگ‌های کربناته با ویژگی‌های متفاوت را به دست آورد. به دست آوردن این فشار به تعیین پمپ مناسب کمک می‌کند و باعث پایین آمدن هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

### کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، سنگ‌های کربناته، مدل‌سازی عددی، رگرسیون چند متغیره، تحلیل آماری.

## ۱- مقدمه

ایجاد می‌شود. این فشار، فشار فروشکست سازندی<sup>۳</sup> نام دارد. تداوم تزریق می‌تواند سبب گسترش شکاف به اطراف و داخل مخزن شود. مرحله اول اجرای عملیات تا رسیدن شکاف به ابعاد طراحی شده ادامه می‌یابد (شکل ۱) [۵].



شکل ۱: نمایی از عملیات شکست هیدرولیکی [۶]

پس از اثبات کارایی روش شکست هیدرولیکی به صورت صنعتی توسط شرکت هالیبرتون<sup>۴</sup>، این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ متداول شد و از آن زمان، تحقیقات و مطالعات زیادی برای بهبود عملیات و کنترل این روش انجام شده است. هوبرت و ویلیس<sup>۵</sup> عنوان کردند که شکست در امتداد تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل، شروع و گسترش می‌یابد. بر این اساس هوبرت و ویلیس [۷] برای تعیین فشار شکست، رابطه ۱ را ارائه کردند:

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

که در آن:

$\sigma_{hmin}$ : تنش افقی حداقل

$\sigma_{Hmax}$ : تنش افقی حداکثر

$T$ : مقاومت کششی

$P_p$ : فشار منفذی

$P_b$ : فشار شکست [۷] است.

دانشی<sup>۶</sup> در مطالعاتش به نتایجی که قبلاً توسط هوبرت و ویلیس ارائه شده بود، دست یافت. اما این محقق عنوان کرد که شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند بر روی گسترش و توسعه شکافت هیدرولیکی تاثیرگذار است [۸]. بلانتون<sup>۷</sup> با انجام مطالعات آزمایشگاهی اظهار داشت که تنش تفاضلی (اختلاف میان تنش افقی حداقل و حداکثر) و زاویه برخورد میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی، فاکتورهای مهم

بسیاری از مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری بالا در نقاط مختلف جهان، در حال تمام شدن است. از این رو، تامین مواد خام اولیه مورد نیاز برای مصارف گوناگون صنعتی، از مخازن با نفوذپذیری پایین انجام می‌شود. برای بهره‌برداری بهینه از این مخازن، لازم است که عملیات اضافی روی این نوع مخازن انجام شود. این عملیات اضافی، افزایش بازده چاه در پی دارد [۱]. روش‌های گوناگونی برای افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد که عمده‌ترین این روش‌ها عبارتند از [۲]:

- روش‌های حرارتی و تولید نفت سنگین سرد

- تزریق گاز

- روش‌های شیمیایی

- تزریق هوا برای بیشترین بازیافت

- ازدیاد برداشت به روش ایجاد شکاف در دیواره چاه

یکی از روش‌های ازدیاد برداشت که در ساختارهای با نفوذپذیری پایین به فراوانی کاربرد دارد، فرآیند شکست هیدرولیکی است که برای افزایش نرخ تولید و اقتصادی‌تر کردن برداشت محصول در این نوع ساختارها به کار می‌رود [۳].

از جمله کاربردهای این روش به شرح زیر است [۴،۳]:

- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از مخازن با نفوذپذیری

پایین

- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از چاه‌هایی که دچار

آسیب‌دیدگی شده‌اند.

- متصل کردن شکاف‌های طبیعی موجود در اطراف چاه

مورد بهره‌برداری

- تعدیل افت فشار برای کمینه کردن مشکلات ناشی از

رسوب‌دهی آسفالتین<sup>۱</sup> و پارافین<sup>۲</sup>

- تعدیل افت فشار اطراف چاه برای کمینه کردن تولید شن

- افزایش ناحیه زهکشی و یا افزایش سطح موثر چاه

- وصل کردن مخازن عمودی به مخازن فرعی اریب یا

چاه‌های افقی

در عملیات شکافت هیدرولیکی ابتدا سیال (آب، فوم یا

نظایر آن) به داخل چاه تزریق شده و حد فاصل مشخصی

از ناحیه مخزنی را که با پکرها از سایر بخش‌های چاه جدا

شده‌اند، تحت فشار قرار می‌دهد. هنگامی که فشار سیال به

حد مشخصی رسید، دیواره چاه شکسته شده و در آن شکاف

و تاثیرگذار بر روی شکل و امتداد شکست می‌باشند. وی یک معیار برای برهم کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی ارایه کرد [۹].

دپاتر و بیوگلسدایک<sup>۸</sup> [۱۰] آزمایش و شبیه‌سازی عددی شکست هیدرولیکی در سنگ شکافدار طبیعی را انجام دادند. در سازندهای شکافدار طبیعی، سیال تزریقی می‌تواند در شکاف‌های موجود جریان پیدا کرده یا باعث ایجاد شکست جدید شود. آزمایش‌ها بر روی بلوکی شکافدار انجام شد و سپس نتایج با مدل عددی مقایسه شد. در نرخ جریان پایین، تزریق همیشه منجر به جریان سیال در شکاف‌های طبیعی می‌شود. در نرخ جریان بالاتر، شکست‌های جدید می‌تواند گسترش پیدا یابد. نرخ جریان بالا یا ویسکوزیته بالا باعث ایجاد شکست می‌شود، درحالی‌که نرخ جریان پایین شبکه شکست اولیه را باز کرده و فشار شکست کمتر است.

ژانگ و چن<sup>۹</sup> [۱۱] گسترش شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها بر اساس مکانیزم شکست و تئوری‌های شکست هیدرولیکی، مدلی را برای مسیر گسترش شکست ارائه دادند که این مدل تاثیر تنش‌های مختلف را بر تغییر مسیر گسترش شکست، نشان می‌دهد. شکست جدید به تدریج جهت خود را تغییر داده تا در جهت ماکزیمم تنش افقی قرار گیرد. مسیرهای پیش‌بینی شده در تطابق با آزمایشات سه محوری است.

عبدالله‌پور و همکاران [۶] اثر فشار محصورکننده بر روی بازشدگی ترک و جابه‌جایی ناشی از آن را با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کردند. نتایج عددی آن‌ها حاکی از آن است که فشار محصورکننده تاثیر زیادی بر روی بازشدگی ترک و جابه‌جایی ناشی از آن دارد. آن‌ها با استفاده از رگرسیون چند متغیره بین پارامترهایی مانند فشار محصورکننده، ویژگی‌های توده‌سنگ و فشار سیال و با استفاده از نتایج روش عددی یک معادله تجربی برای تعیین بازشدگی ترک با در نظر گرفتن اثر فشار محصورکننده ارایه دادند.

شیمیزو و همکاران [۱۲] با استفاده از مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در سنگ‌های سخت اثر ویسکوزیته سیال و توزیع اندازه ذرات را بررسی کردند. نتایج نشان داد هنگامی‌که از سیال با ویسکوزیته پایین استفاده شود، نفوذ سیال در شکستگی‌ها سریع‌تر می‌شود و هنگامی‌که از سیال با ویسکوزیته بالا استفاده شود، نفوذ سیال به داخل ترک کند و شکستگی باریک و کشیده می‌شود. در این مدل‌ها ترک‌های

کششی ناشی از بارگذاری ایجاد شده و نرخ آزادسازی کرنش در هنگام به وجود آمدن ترک‌ها اندک است. همچنین زمانی که از سیال با ویسکوزیته پایین استفاده شود، تعداد کمتری از ترک‌های برشی نسبت به حالتی که ویسکوزیته سیال بالا است، پدید می‌آید.

جیانگچن و همکاران [۱۳] با استفاده از یک مدل‌سازی دوبعدی مایع-جامد و به وسیله المان محدود توسعه یافته مسیر انتشار ترک را در حالت ناهمسانگرد<sup>۱</sup> مشخص کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر ترک اولیه ایجاد شده، دارای زاویه‌ای با محور ناهمسانگردی باشد، مسیر گسترش ترک از حالت مستقیم منحرف می‌شود. زاویه انحراف ایجاد شده با تغییر مصالح تشکیل‌دهنده تغییر می‌کند و با کاهش مدول یانگ افزایش می‌یابد. این انحراف مسیر فقط زمانی از بین می‌رود که ترک موازی با یکی از محورهای مصالح ناهمسانگرد باشد. همچنین نتایج نشان داد که عرض شکستگی‌های ایجاد شده در مصالح با مدول‌های یانگ مختلف و زاویه ناهمسانگردی مختلف تقریباً یکسان است، با این تفاوت که یک تغییر ناگهانی کوچک در عرض شکستگی در محلی که انحراف رخ می‌دهد، وجود دارد.

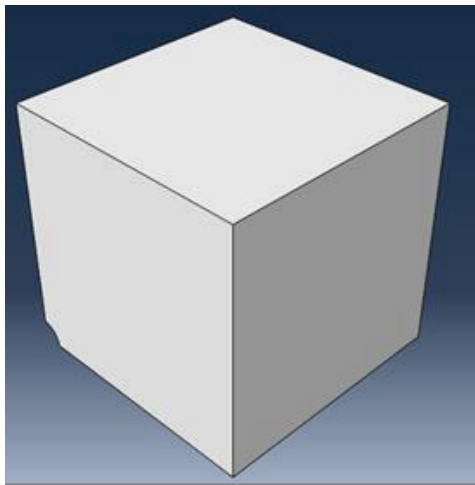
ملاعلی و یزدانی [۱۴] اثر نرخ تزریق سیال گوناگون و اثر مقادیر مختلف لزجت سیال را بر روی فشار شکست و بازشدگی ترک بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ تزریق بالاتر باعث ایجاد فشار بیشتر در طول ترک می‌شود. همچنین در نرخ تزریق بالاتر بازشدگی بیشتر که به علت فشار بیشتر است، رخ می‌دهد. با افزایش لزجت نیز به دلیل مقاومت اضافه شده برای وارد کردن سیال در ترک، فشار افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، در نرخ تزریق یکسان، افزایش لزجت باعث افزایش بازشدگی ترک می‌شود.

دهقان و همکاران [۱۵] بر روی شروع و گسترش شکست هیدرولیکی در نمونه‌های 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 شکست در نمونه‌های بدون شکاف طبیعی می‌شود.

در یکی از جدیدترین تحقیقات اکرمی و حسینی [۱۶] مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را با استفاده از سلول سه محوری هوک تغییر یافته انجام دادند. آن‌ها برای انجام این تحقیق از نمونه‌های کربناته استوانه‌ای تو خالی جدار

پواسون و مدول یانگ است. در این تحقیق از ۲۱ گروه داده که از نقاط مختلف چاه‌های نفت ایران در سنگ‌های کربناته به دست آمده، استفاده شده است [۲۷-۱۸] (جدول ۱). در ابتدا پس از ساخت مدل اولیه ویژگی‌های محیط مطابق جدول ۱ تعریف شد. در همه مدل‌سازی‌ها رفتار محیط، الاستیک فرض شد، سپس محیط گسترش ترک به روش المان محدود توسعه یافته، تعریف شد و در کل نمونه اجازه رشد ترک داده شد و مکان خاصی برای گسترش ترک در نظر گرفته نشد. پس از انجام این کار تنش‌های اعمالی به محیط شامل تنش افقی حداکثر و حداقل، تنش قائم و فشار سیال داخل گمانه تعریف شد که در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است.

در جدول ۱،  $T$  مقاومت کششی،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  نسبت پواسون،  $K_{IC}$  چقرمگی شکست مود  $I$  و  $G_I$  انرژی شکست است.



شکل ۲: هندسه نهایی مدل ساخته شده

بار اعمال شده برای فشار سیال داخل گمانه به صورت خطی و صعودی تغییر می‌کند. این بار به کل مقطع مدل‌سازی شده که معادل فاصله پکرها در شرایط واقعی است، اعمال می‌شود. شرایط مرزی که به نمونه اعمال شد در شکل ۷ قابل مشاهده است. که در دو جهت  $XZ$  و  $YZ$  به دلیل استفاده از مقطع یک چهارم جابه‌جایی و اعمال بار محدود شده و در جهت عمود بر راستای چاه یعنی صفحه  $XY$  نیز جابه‌جایی‌ها محدود شده‌اند.

ضخیم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش جانبی فشار شکست نیز افزایش می‌یابد ولی با تغییر تنش محوری، فشار شکست تغییر چندانی نمی‌کند و همچنین شکستگی‌های ایجاد شده عمدتاً در راستای قائم (محور گمانه) است.

پژوهش حاضر به کمک مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های آماری انجام شده است. روش کار در این پژوهش بدین صورت است که ابتدا برای ۲۱ داده مختلف که از چاه‌های مختلف کربناته ایران به دست آمده‌اند، فشار شکست از طریق مدل‌سازی عددی به دست آمد. سپس با توجه به داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی عددی و با کمک رگرسیون چند متغیره یک رابطه برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی ارائه شد. تا کنون در ایران رابطه‌ای برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های کربناته ارائه نشده است که جزو نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود. در دنیا نیز تحقیقات در این مورد اندک است.

در این پژوهش، برای انجام مدل‌سازی‌های عددی از نرم‌افزار Abaqus و برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

## ۲- مدل‌سازی‌های انجام شده

### ۲-۱- مدل‌سازی به وسیله نرم‌افزار آباکوس

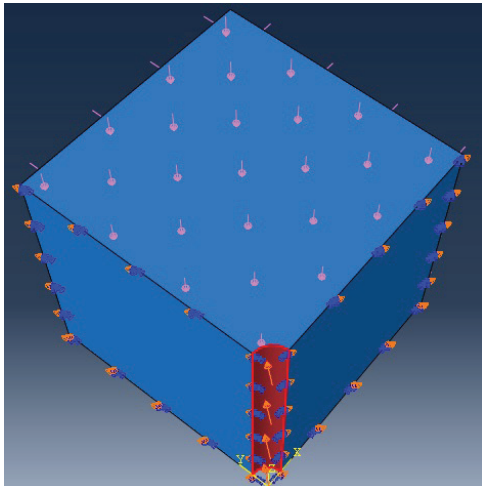
یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در زمینه انجام آنالیزهای اجزای محدود، نرم‌افزار ABAQUS است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هیبیت<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۷] ایجاد شد. در ابتدا این نرم‌افزار برای حل مسایل انرژی هسته‌ای و مهندسی حفاری طراحی شده بود چرا که مهندسان در این شاخه‌ها به ابزاری برای مطالعه مسایل پیچیده و غیرخطی نیاز داشتند. برای مدل‌سازی در این تحقیق از نرم‌افزار ABAQUS ویرایش ۶،۱۴ استفاده شد.

برای مدل‌سازی چاه نفت و محیط اطراف آن یک مربع  $۴ \times ۴$  و یک دایره به قطر  $۰٫۳$  متر (معادل ۱۲ اینچ) رسم شد. برای متقارن بودن نمونه و صرفه‌جویی در وقت و هزینه از مقطع یک چهارم مدل استفاده شد و در نهایت یک ارتفاع ۲ متری برای مدل در نظر گرفته شد که مقطع نهایی مدل ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

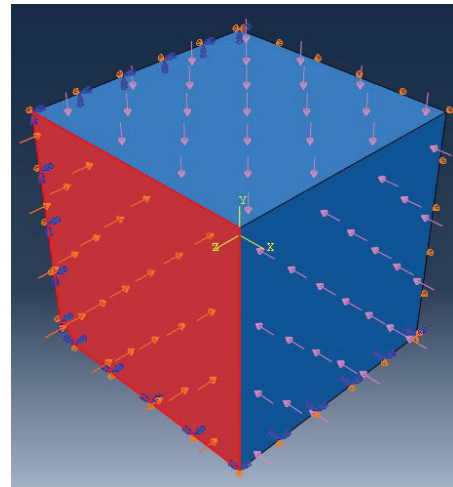
پارامترهای ورودی به این مدل شامل تنش افقی حداقل و حداکثر، تنش قائم، مقاومت کششی، فشار منفذی، نسبت

جدول ۱: ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های کربناته در چاه‌های نفتی [۱۸-۲۷]

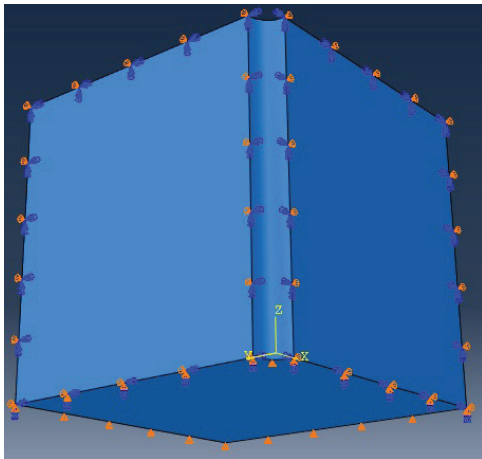
$G_1$	$K_{IC}(MPa.m)^{1/2}$	$\nu$	E(GPa)	T(MPa)	ردیف
۲۷,۷۲	۱,۱۸	۰,۳	۵۰	۸,۱	۱
۶۳,۳۷	۰,۴۳۶	۰,۳	۳	۳	۲
۶۳,۳۷	۰,۴۳۶	۰,۳	۳	۳	۳
۸۸,۸	۱,۹۸	۰,۳	۴۴	۱۳,۶	۴
۱۸,۳۳	۰,۶۹	۰,۲۵	۲۶	۴,۷۵	۵
۱۹,۹۵	۰,۶۹۸	۰,۲	۲۴,۴	۴,۸	۶
۱۸,۵	۰,۴۶۵	۰,۲۲	۱۱,۷	۳,۲	۷
۱۲,۸۵	۰,۷۷	۰,۳	۴۶,۱۹۵	۵,۳	۸
۲۶,۶۳	۱,۱۳	۰,۳	۴۸,۲۶۴	۷,۸	۹
۱۴,۲۸	۰,۷۵	۰,۳	۴۰	۵,۲	۱۰
۵۶,۴	۱,۳	۰,۳	۳۰	۸,۹۵	۱۱
۳۱,۰۶	۱,۲۰۶	۰,۲	۴۶,۸۸۵	۸,۳	۱۲
۱۹,۹۱	۱,۰۴۶	۰,۲۵	۵۵	۷,۲	۱۳
۱۰,۸۵	۰,۴۴۱	۰,۲۱۸	۱۷,۹۶	۳,۰۳۸	۱۴
۱۰۷,۷۴	۱,۲۳	۰,۳	۱۴	۸,۴۵	۱۵
۳۴,۷۴	۱,۱۳	۰,۲۵	۳۷	۷,۸	۱۶
۴۸,۵۱	۱,۲	۰,۲	۳۰	۸,۳	۱۷
۳۴,۷۷	۰,۶۹۸	۰,۲	۱۴	۴,۸	۱۸
۵۰,۷۲	۱,۴۲	۰,۲۵	۴۰	۹,۸	۱۹
۸۱,۴	۱,۴۸	۰,۳	۲۷	۱۰,۲	۲۰
۸۸,۲۷	۰,۹	۰,۲۵	۹,۲	۶,۲	۲۱



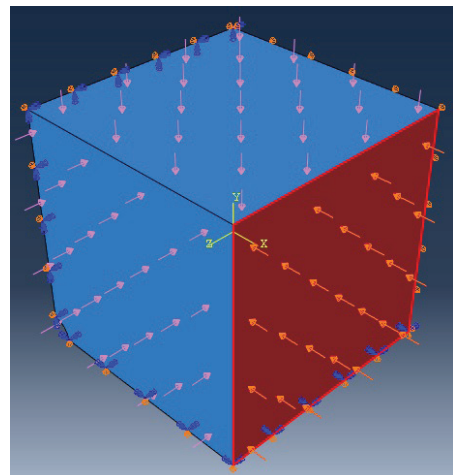
شکل ۶: سطح مورد نظر برای اعمال فشار داخل گمانه



شکل ۳: سطح مورد نظر برای اعمال تنش عمودی



شکل ۷: شرایط مرزی اعمال شده به نمونه

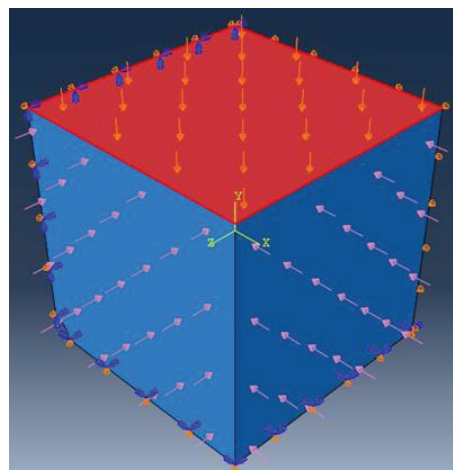


شکل ۴: سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداکثر

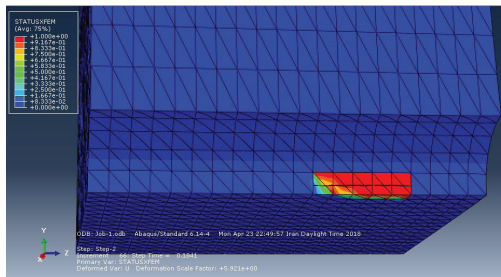
برای مش‌زنی مدل از المان‌های چهار وجهی Tet و تکنیک مش‌زنی از نوع Free استفاده شد تا مش از الگوی از پیش تعیین شده پیروی نکند. در این پژوهش، از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه که در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی شده، استفاده شد. این معیار بر اساس رابطه ۲ تعریف شده است.

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

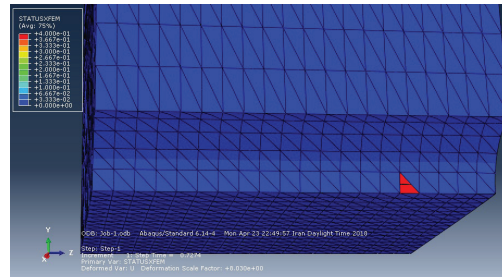
در این رابطه  $\sigma_{max}^0$  به معنای بیشترین تنش اصلی مجاز ماده است. نماد  $\langle \rangle$  به پارانترز ماکالای معروف است. هنگامی که آرگومان این تابع منفی شود، تابع مقدار صفر می‌گیرد و برای مقادیر مثبت آرگومان، تابع برابر با مقدار آرگومانش می‌شود، بنابراین تنش فشاری نمی‌تواند منجر به ایجاد آسیب شود.



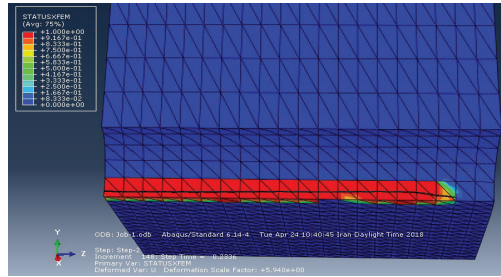
شکل ۵: سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداکثر



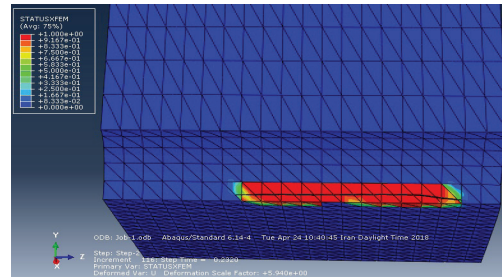
ب- راستای گسترش ترک در مدل شماره ۶



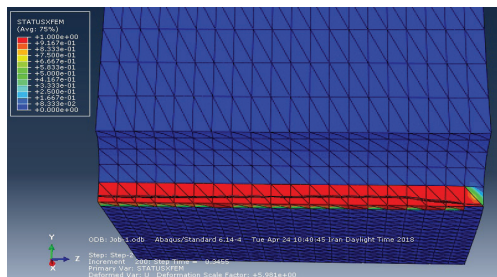
الف- نحوه شروع ترک در مدل شماره ۶



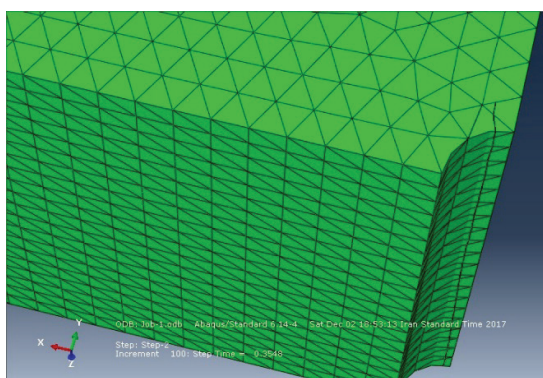
ج- نحوه رشد ترک در مدل شماره ۶



د- ترک کاملاً گسترش یافته در مدل شماره ۶



شکل ۸: وضعیت رشد و گسترش ترک در مدل ۶



شکل ۹: مسیر گسترش ترک در مدل شماره ۶

برای حل این مدل دو step در نظر گرفته شد که از step-1 برای تعریف تنش‌های موجود در محیط و از step-2 برای اعمال فشار سیال داخل گمانه استفاده شد. فشار شکست از طریق گام زمانی که در step-2 در لحظه شروع شکست و با توجه به فشار سیالی که در ابتدا تعریف شده به دست آمد (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 است). داده‌های ورودی و نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. وضعیت رشد و گسترش ترک در مدل ۶، در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است.

## ۲-۲- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت برای تاثیر هر یک از پارامترها بر فشار

شکست هیدرولیکی بر روی هر پارامتر انجام شد. در این تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای تاثیرگذار به میزان ۱۰ درصد افزایش یافت تا با یک افزایش ثابت برای همه پارامترها تغییرات

جدول ۲: نتایج مدل‌سازی‌های عددی

ردیف	$\sigma_{Hmax}$ (MPa)	$\sigma_{hmin}$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	T (MPa)	Pp (MPa)	E (GPa)	$\nu$	فشار شکست (MPa)
۱	۴۸٫۱۲	۴۵٫۷۱	۷۵٫۰۶	۸٫۱	۲۷٫۴۶	۵۰	۰٫۳	۴۷٫۲۵۷
۲	۹۲٫۱	۶۴٫۴	۹۴٫۵	۳	۲۸	۳	۰٫۳	۶۵٫۴۹۲
۳	۹۹٫۳۶	۵۱٫۳	۹۴٫۵	۳	۲۸	۳	۰٫۳	۲۰٫۵۳۱
۴	۵۹٫۴	۴۴٫۵	۹۶٫۷	۱۳٫۶	۳۱٫۱	۴۴	۰٫۳	۳۵٫۸۹۵
۵	۶۱	۵۴	۵۸٫۸	۴٫۷۵	۲۱٫۸	۲۶	۰٫۲۵	۷۰٫۹۴
۶	۵۱٫۴	۳۷٫۸	۶۸٫۵	۴٫۸	۲۷	۲۴٫۴	۰٫۲	۲۰٫۶۴۸
۷	۶۲	۵۷٫۹	۵۹٫۷	۳٫۲	۳۲	۱۱٫۷	۰٫۲۲	۵۷٫۱۶۹
۸	۸۴	۶۳٫۵	۹۹٫۸	۵٫۳	۴۳٫۵	۴۶٫۱۹۵	۰٫۳	۳۷٫۲۵۶
۹	۷۱٫۲	۵۷٫۸	۱۰۷٫۸	۷٫۸	۴۲	۴۸٫۲۶۴	۰٫۳	۳۴٫۷۶
۱۰	۹۴٫۷	۸۴٫۵	۱۱۱٫۸	۵٫۲	۵۳٫۵	۴۰	۰٫۳	۶۶٫۹۴۴
۱۱	۶۶	۵۶	۷۳٫۶	۸٫۹۵	۴۰	۳۰	۰٫۳	۳۹٫۰۳۵
۱۲	۷۵	۶۸	۱۰۳٫۵	۸٫۳	۵۴٫۳	۴۶٫۸۸۵	۰٫۲	۳۵٫۴۰۵
۱۳	۷۹٫۸	۶۰	۱۰۹	۷٫۲	۴۰	۵۵	۰٫۲۵	۳۹٫۷۸۸
۱۴	۶۹٫۸۲	۵۷٫۷۲	۹۹٫۸۹	۳٫۰۳۸	۳۵٫۷۹	۱۷٫۹۶	۰٫۲۱۸	۴۳٫۷۲۵
۱۵	۸۱	۷۳	۵۴	۸٫۴۵	۲۶	۱۴	۰٫۳	۱۰۶٫۴۰۳
۱۶	۷۴٫۶	۵۳٫۵	۱۰۷٫۸	۷٫۸	۴۳٫۵	۳۷	۰٫۲۵	۱۷٫۵۳۲۵
۱۷	۷۹٫۵	۶۵٫۵	۱۱۷٫۶	۸٫۳	۴۵٫۵	۳۰	۰٫۲	۴۴٫۷۶
۱۸	۷۷٫۱۵	۶۳٫۵۷	۱۱۰٫۷	۴٫۸	۲۸٫۸	۱۴	۰٫۲	۷۲٫۶
۱۹	۶۳	۶۰٫۵	۸۰٫۳	۹٫۸	۲۰	۴۰	۰٫۲۵	۹۷٫۱۷
۲۰	۷۰	۶۸	۹۴	۱۰٫۲	۲۶	۲۷	۰٫۳	۱۰۱٫۲۷۲۵
۲۱	۶۳	۶۲٫۵	۹۶	۶٫۲	۳۲	۹٫۲	۰٫۲۵	۷۲٫۷۰۴

موثر بر فشار شکست به ترتیب شامل تنش افقی حداقل، فشار منفذی، تنش افقی حداکثر، مقاومت کششی و نسبت پواسون‌اند. رابطه هر یک از پارامترهای یاد شده با فشار شکست به صورت خطی بوده است و به همین دلیل در انجام تحلیل‌های آماری از رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شد.

#### ۲-۳- صحت‌سنجی نتایج عددی

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی از داده‌های فشار شکست هیدرولیکی که از روش آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، کمک گرفته شد. روش کار به این ترتیب بود که مدل‌سازی عددی با شرایط یاد شده در آزمایش انجام و نتایج به دست آمده با روش آزمایشگاهی مقایسه شد. ابعاد بلوک ساخته شده برای آزمایش  $30 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر بود [۱۵]. برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه و متقارن بودن مدل در اینجا نیز از یک چهارم مقطع در مدل‌سازی استفاده شد. نتیجه فشار

فشار شکست بررسی شود. که در انجام این تحلیل حساسیت از داده‌های جدول ۳ به عنوان داده‌های مبنا استفاده شد.

نتایج تحلیل حساسیت به شرح زیر بود:

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی تنش افقی حداقل، فشار شکست ۲۱ درصد افزایش یافت.

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی تنش افقی حداکثر، فشار شکست ۵ درصد کاهش یافت.

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی، فشار شکست ۰٫۹۷ درصد افزایش یافت.

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی فشار منفذی، فشار شکست ۶٫۶ درصد کاهش یافت.

- در اثر افزایش ۱۰ درصدی نسبت پواسون، فشار شکست ۰٫۱۶ درصد کاهش یافت.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تنش قائم و مدول یانگ تاثیری بر فشار شکست ندارد. در نتیجه پارامترهای



جدول ۳: داده‌های مورد استفاده برای تحلیل حساسیت [۲۱]

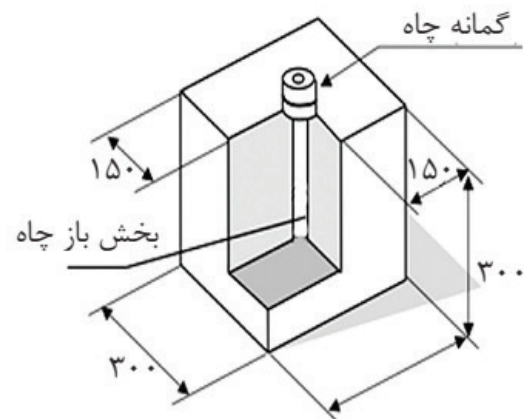
مدل	$\sigma_{Hmax}$ (MPa)	$\sigma_{hmin}$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	T (MPa)	Pp (MPa)	E (GPa)	$\nu$	فشار شکست (MPa)
۱	۶۱	۵۴	۵۸٫۸	۴٫۷۵	۲۱٫۸	۲۶	۰٫۲۵	۷۰٫۹۴

جدول ۴: داده‌ها و نتایج روش عددی و آزمایشگاهی

مدل	$\sigma_{Hmax}$ (MPa)	$\sigma_{hmin}$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	T (MPa)	Pp (MPa)	E (GPa)	$\nu$	فشار شکست آزمایشگاهی (MPa)	فشار شکست عددی (MPa)
۱	۶	۴	۱۰	۵٫۰۵	۰	۳۰	۰٫۲	۱۴٫۷۲	۱۳٫۸۲

نسبی (این نوع مقیاس کامل‌ترین نوع مقیاس است و برای متغیرهای قابل شمارش یا اندازه‌گیری مانند وزن، طول و نظایر آن به کار می‌رود) است. متغیرهای آماری نیز به دو دسته کلی متغیر مستقل و متغیر وابسته تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۸]. متغیرهای وابسته و مستقل این تحقیق در جدول ۵ قابل مشاهده است.

شکست حاصل از روش عددی و آزمایشگاهی برای داده‌های متعارف در جدول ۴ با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۰: شماتیک طرح استفاده شده برای مدل‌سازی [۱۵]

جدول ۵: متغیرهای موثر استفاده شده در فرآیند مدل‌سازی

ردیف	نام متغیر	شناسه	واحد اندازه‌گیری	نوع متغیر
۱	فشار شکست	$P_f$	نسبی (MPa)	وابسته
مستقل	تنش افقی حداکثر	$\sigma_{Hmax}$	نسبی (MPa)	مستقل
	تنش افقی حداقل	$\sigma_{hmin}$	نسبی (MPa)	
	تنش قائم	$\sigma_v$	نسبی (MPa)	
	مقاومت کششی	T	نسبی (MPa)	
	فشار منفذی	Pp	نسبی (MPa)	
	مدول یانگ	E	نسبی (GPa)	
	نسبت پواسون	$\nu$	نسبی	

همان‌طور که مشاهده شد نتایج روش عددی و روش آزمایشگاهی اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. این اختلاف بسیار کم (اختلاف ۶٫۵ درصد)، صحت نتایج روش عددی را تایید می‌کند.

### ۳- تحلیل‌های آماری

#### ۳-۱- معرفی

در آمار، مقیاس‌ها و واحدهای اندازه‌گیری به چهار دسته کلی مقیاس‌های اسمی، ترتیبی، فاصله‌ای و نسبی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق داده‌های استفاده شده همه از نوع

۳-۲- بررسی همبستگی بین پارامترهای مستقل

برای انجام تحلیل‌های آماری در این تحقیق از نرم افزار SPSS استفاده شد. برای اخذ تصمیم درباره‌ی اینکه آیا رابطه آماری معنا داری بین دو متغیر وجود دارد یا خیر از ضریب همبستگی استفاده می‌شود. ضریب همبستگی همواره عددی بین -۱ تا ۱ است، اگر این عدد نزدیک به یک بوده یعنی دو متغیر باهم همبستگی مستقیم داشته و افزایش یا کاهش یکی همواره بر دیگری اثر مثبت می‌گذارد، اگر ضریب همبستگی -۱ باشد یعنی دو متغیر باهم همبستگی معکوس داشته و افزایش یکی باعث کاهش دیگری می‌شود و اگر ضریب همبستگی نزدیک به صفر باشد، یعنی بین دو متغیر همبستگی خطی وجود ندارد. در جدول ۶ همبستگی بین پارامترهای مستقل بررسی شده است. اگر بین دو متغیر

همبستگی خطی وجود داشته باشد، در تحلیل‌های آماری و انجام رگرسیون باید از یکی از این دو متغیر استفاده شود [۲۹].

همان‌طور که در جدول ۶ نیز مشاهده شد بین هیچ دو متغیر مستقلی همبستگی کامل وجود ندارد ولی با توجه به نتایج تحلیل حساسیت حاصل از مدلسازی عددی از پارامتر مدول یانگ، تنش عمودی و ضریب پواسن در رگرسیون چند متغیره استفاده نشده است.

۳-۳- ارزیابی معادله پیش‌بینی فشار شکست هیدرولیکی با استفاده از رگرسیون چند متغیره

رگرسیون چند متغیره برای یافتن رابطه‌ای بین فشار شکست با پارامترهای مستقل از رگرسیون خطی چند متغیره

جدول ۶: مقادیر ضریب همبستگی بین متغیرهای وابسته

		$\sigma_{hmin}$	$\sigma_{HMAX}-\sigma_{hmin}$	$\sigma_v$	T	Pp	E	$\nu$
$\sigma_{hmin}$	Pearson Correlation	۱	-۰٫۱۷۷	۰٫۳۰۴	-۰٫۰۶۲	۰٫۴۱۶	-۰٫۰۴۹	۰٫۱۱۲
	Sig. (2-tailed)		۰٫۴۳۳	۰٫۱۸۱	۰٫۷۹۰	۰٫۰۶۱	۰٫۸۳۲	۰٫۶۳۰
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
$\sigma_{HMAX}-\sigma_{hmin}$	Pearson Correlation	-۰٫۱۷۷	۱	۰٫۳۱۳	-۰٫۳۷۳	۰٫۰۷۵	-۰٫۲۴۳	۰٫۲۰۸
	Sig. (2-tailed)	۰٫۴۴۳	-	۰٫۱۶۷	۰٫۰۹۶	۰٫۷۴۸	۰٫۲۸۸	۰٫۳۶۵
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
$\sigma_v$	Pearson Correlation	۰٫۳۰۴	۰٫۳۱۳	۱	۰٫۰۶۷	۰٫۶۱۹	۰٫۲۸۶	-۰٫۱۰۱
	Sig. (2-tailed)	۰٫۱۸۱	۰٫۱۶۷	-	۰٫۷۷۲	۰٫۰۰۳	۰٫۲۰۹	۰٫۶۶۴
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
T	Pearson Correlation	-۰٫۰۶۲	-۰٫۳۷۳	۰٫۰۶۷	۱	۰٫۰۴۰	۰٫۵۶۷	۰٫۲۴۷
	Sig. (2-tailed)	۰٫۷۹۰	۰٫۰۹۶	۰٫۷۷۲	-	۰٫۸۶۴	۰٫۰۰۷	۰٫۲۸۱
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
Pp	Pearson Correlation	۰٫۴۱۶	۰٫۰۷۵	۰٫۶۱۹	۰٫۰۴۰	۱	۰٫۴۵۷	-۰٫۱۰۳
	Sig. (2-tailed)	۰٫۰۶۱	۰٫۷۴۸	۰٫۰۰۳	۰٫۸۶۴	-	۰٫۰۳۷	۰٫۶۵۵
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
E	Pearson Correlation	-۰٫۰۴۹	-۰٫۲۴۳	۰٫۲۸۶	۰٫۵۶۷	۰٫۴۵۷	۱	۰٫۱۱۸
	Sig. (2-tailed)	۰٫۸۳۲	۰٫۲۸۸	۰٫۲۰۹	۰٫۰۰۷	۰٫۰۳۷	-	۰٫۶۱۱
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
$\nu$	Pearson Correlation	۰٫۱۱۲	۰٫۲۰۸	-۰٫۱۰۱	۰٫۲۴۷	-۰٫۱۰۳	۰٫۱۱۸	۱
	Sig. (2-tailed)	۰٫۶۳۰	۰٫۳۶۵	۰٫۶۶۴	۰٫۲۸۱	۰٫۶۵۵	۰٫۶۱۱	-
	N	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱

استفاده شد (رابطه ۳) [۲۹]:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_iX_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

که در آن:

$Y$ : متغیر وابسته

$\varepsilon_i$ : خطا

$X_i$ : متغیرهای مستقل

$B_0$ : عرض از مبدا معادله رگرسیونی

$i$ : تعداد متغیرهای مستقل

$B_i$ : ضریب معادله رگرسیون [۲۹] است.

خلاصه مدل آماری برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ۷ ضریب همبستگی مشترک بین متغیرهای مستقل و وابسته برابر ۱,۰۰۰ و ضریب تعیین برابر ۱,۰۰۰ است. میزان ضریب تعیین تعدیل یافته نیز ۱,۰۰۰ است که این به این معنی است که متغیرهای مستقل به طور مشترک ۱۰۰ درصد تغییرات مربوط به متغیر وابسته را تعیین می‌کنند، به عبارت دیگر ۱۰۰ درصد تغییرات فشار شکست می‌تواند از طریق این معادله رگرسیونی پیش‌بینی و تعریف شود. آماره دوربین- واتسن<sup>۱۲</sup> یک آماره آزمون است که برای بررسی وجود خود همبستگی بین باقیمانده‌ها در تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. مقدار این آماره همواره بین ۰ تا ۴ است. اگر بین باقیمانده‌ها همبستگی متوالی وجود نداشته باشد، مقدار این آماره به ۲ نزدیک است. اگر این آماره به صفر

نزدیک باشد نشان‌دهنده همبستگی مثبت و اگر به ۴ نزدیک باشد نشان‌دهنده همبستگی منفی است. مقدار آماره آزمون دوربین-واتسون در این مدل نیز در محدوده قابل قبول قرار دارد.

جدول ۸، جدول ANOVA برای فشار شکست در مدل دوم را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در جدول ۸ مقدار سطح معناداری در مدل دوم کمتر از ۰,۰۵ است، آزمون F مورد تایید و استفاده از مدل خطی رگرسیون مجاز است. در جدول ۹ ضرایب رگرسیون مربوط به این مدل آماری ارائه شده است.

رابطه به دست آمده از مدل آماری به صورت رابطه ۴ است:

$$P_f = 2.155(\sigma_{h \min}) - 0.670(\sigma_{h \max} - \sigma_{h \min}) + 1.155(T) - 2.130(P_p) \quad (4)$$

تمامی پارامترهای تاثیرگذار که در آنالیز حساسیت نیز موثرند در رابطه ۴ حضور دارند که باید صحیح بودن این رابطه به چند روش بررسی شود.

### ۳-۴- کنترل اعتبار رابطه پیشنهاد شده

برای تایید صحت رابطه، اولین مرحله چک کردن نرمال بودن باقیمانده‌هاست که این موضوع با نمودار شکل ۱۱ و جدول ۱۰ چک شده است. با توجه به اینکه سطح معناداری

جدول ۷: خلاصه مدل آماری برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
۱	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۶۷۷۵۷	۱,۴۰۰

جدول ۸: جدول ANOVA برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

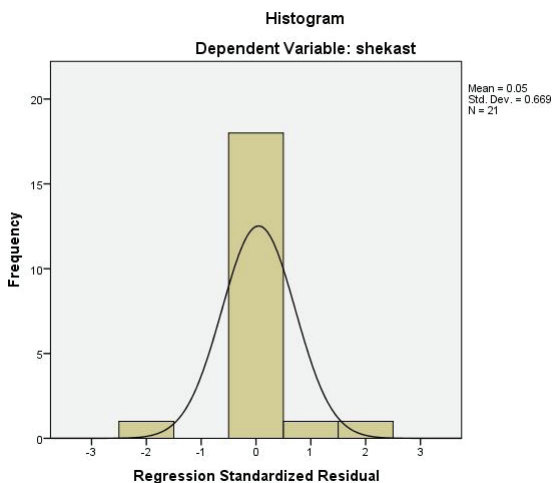
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
۱	Regression	۷۴۱۵۷,۷۲۴	۴	۱۸۵۳۹,۴۳۱	۴۰۳۸۲,۵۰۰	۰,۰۰۰
	Residual	۷,۸۰۵	۱۷	۰,۴۵۹		
	Total	۷۴۱۶۵,۵۲۸	۲۱			

جدول ۹: جدول ضرایب رگرسیون برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
۲	$\sigma_{hmin}$	۲,۱۵۵	۰,۰۱۱	۲,۱۸۸	۱۹۹,۶۲۱	۰,۰۰۰
	$\sigma_{HMAX}-\sigma_{hmin}$	-۰,۶۷۰	۰,۰۱۴	-۰,۱۸۸	-۴۷,۷۰۳	۰,۰۰۰
	T	۱,۱۵۵	۰,۰۵۱	۰,۱۴۲	۲۲,۶۶۴	۰,۰۰۰
	Pp	-۲,۱۳۰	۰,۰۱۷	-۱,۲۸۶	-۱۲۲,۱۳۶	۰,۰۰۰

جدول ۱۰: بررسی میزان نرمال بودن باقیمانده‌ها برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Residual	۰,۱۲۹	۲۱	۰,۲۰۰	۰,۹۵۱	۲۱	۰,۳۵۹



شکل ۱۱: نمودار باقیمانده‌ها برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

بیانگر تبعیت آن‌ها از توزیع نرمال است. شکل ۱۲ نیز نتایج آزمون‌های شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف را تایید می‌کند.

در شکل ۱۳ پراکنش باقیمانده‌ها نشان داده شده است که

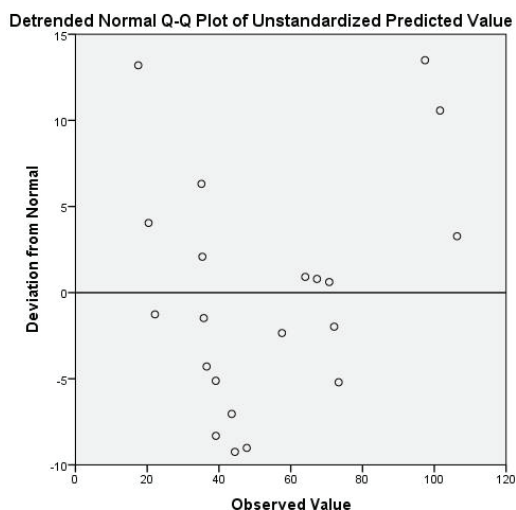
برای آزمون‌های شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف بیشتر از ۰,۰۵ است، فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها برای فشار شکست در این مدل قابل تایید است.

دومین مرحله چک کردن میانگین باقیمانده‌هاست که صفر باشند. در جدول ۱۱ میانگین باقیمانده‌ها برای این مدل ارایه شده است. میانگین باقیمانده‌ها برای این مدل اختلاف اندکی با صفر دارد که این جدول نیز صحت رابطه رگرسیونی را تایید می‌کند.

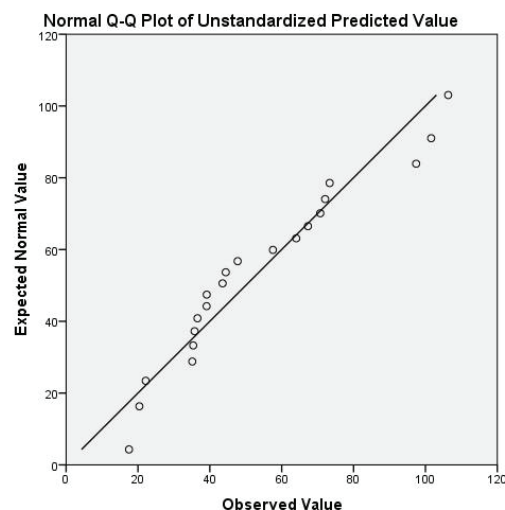
با استفاده از نمودار Q-Q plot می‌توان توزیع دو مجموعه را با هم مقایسه کرد و همچنین تعبیر اینکه یک مجموعه داده از توزیع خاصی پیروی می‌کند یا خیر، از این نمودار به دست می‌آید. در این نمودار پراکنش‌های یک توزیع تجربی با پراکنش‌های یک توزیع نرمال مورد مقایسه قرار گرفته است که خط راست بیانگر برازش کامل داده‌ها با توزیع نرمال است و داده‌ها باید نزدیک به خط قرار گرفته باشند [۲۸]. در شکل ۱۲ نمودار Q-Q plot برای این مدل آورده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این نمودار نقاط حاصل از داده‌های باقیمانده حول محور خط راستی قرار گرفته‌اند که

جدول ۱۱: میانگین باقیمانده‌ها برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی

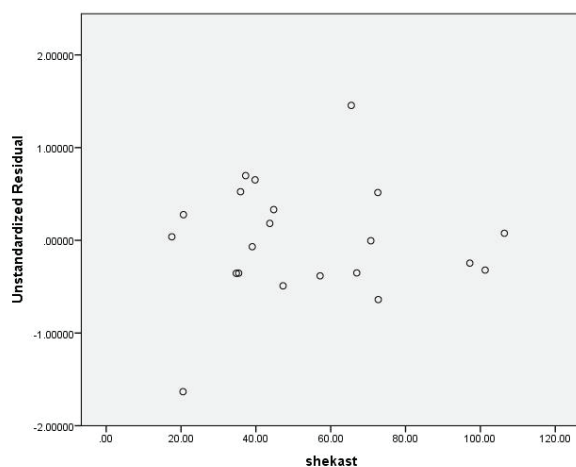
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	۱۷,۴۹۴۴	۱۰۶,۳۲۶۵	۵۳,۶۷۴۶	۲۶,۱۳۱۹۲	۲۱
Residual	-۱,۶۳۲۸۳	۱,۴۵۵۴۲	-۰,۰۰۰۴۷۲	۰,۶۲۴۶۷	۲۱
Std. Predicted Value	-۱,۳۸۵	۲,۰۱۵	۰,۰۰۰	۱,۰۰۰	۲۱
Std. Residual	-۲,۴۱۰	۲,۱۴۸	-۰,۰۰۷	۰,۹۲۲	۲۱



شکل ۱۳: پراکنش باقیمانده‌ها پس از برازش خط رگرسیون



شکل ۱۲: نمودار آزمون نرمال بودن باقیمانده‌ها برای رابطه فشار شکست هیدرولیکی



شکل ۱۴: نمودار باقیمانده‌ها در مقابل فشار شکست

با استفاده از این نمودار می‌توان ثابت بودن واریانس مانده‌ها را بررسی کرد. همان‌طور که از نمودار مشهود است داده‌ها به صورت تصادفی پخش شده‌اند و پراکنش تصادفی دارند و شکل و حالت خاصی را نشان نمی‌دهند که این موضوع نشان می‌دهد که هیچ رابطه مشخصی میان باقیمانده‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده وجود ندارد که با فرض خطی بودن و ثابت بودن واریانس مانده‌ها سازگار است. برای بررسی بیشتر این موضوع نمودار باقیمانده‌ها در مقابل فشار شکستی که از روش عددی به دست آمده رسم شد که این نمودار در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ نیز مشهود است داده‌ها به صورت کاملاً تصادفی پخش شده‌اند که این موضوع نیز ثابت بودن واریانس مانده‌ها را تایید می‌کند.

جدول ۱۲: مشخصات ژئومکانیکی و تنش‌های سازند کربناته ی مخزن بنگستان [۱۶]

ردیف	$\sigma_{HMAX}$ (MPa)	$\sigma_{hmin}$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	T (Mpa)	Pp (MPa)	E (Gpa)	$\nu$
۱	۵	۵	۱۷	۴٫۳	۰	۳۲٫۴۳	۰٫۲۹۴
۲	۶	۶	۱۹٫۲	۴٫۳	۰	۳۲٫۴۳	۰٫۲۹۴

جدول ۱۳: مقایسه نتایج حاصل از رابطه ارایه شده و نتایج آزمایشگاهی

فشار شکست (نتایج آزمایشگاهی) (MPa)	فشار شکست (حل با رابطه به دست آمده) (MPa)	فشار شکست (حل از رابطه هوبرت و ویلیس) (Mpa)	درصد اختلاف نتایج آزمایشگاهی و رابطه به دست آمده
۱۵	۱۵٫۷۴	۱۴٫۳	۴٫۹۳
۱۶٫۴۹	۱۷٫۸۹	۱۶٫۳	۸٫۴۹

### ۳-۵- صحت‌سنجی رابطه پیشنهاد شده

برای صحت‌سنجی رابطه ارایه شده داده‌هایی از سنگ‌های کربناته مخزن بنگستان که در آن فشار شکست از طریق روش آزمایشگاهی به دست آمده بود، استخراج (جدول ۱۲) و سپس با رابطه ارایه شده، فشار شکست محاسبه و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شد. این نتایج در جدول ۱۳ ارایه شده است. همان‌طور که در جدول ۱۳ دیده می‌شود، نتایج حل با رابطه و نتایج آزمایشگاهی نزدیک به هم بوده و اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. اختلاف به دست آمده بین نتایج تقریباً ۱ مگا پاسکال است که احتمالاً به دلیل وجود ریز ترک‌ها در نمونه است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا فشار شکست هیدرولیکی برای ۲۱ حالت مختلف با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به دست آمد و سپس بر روی هر یک از پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام شد تا اثر هر پارامتر بر فشار شکست هیدرولیکی مشخص شود. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره یک رابطه برای فشار شروع شکست هیدرولیکی ارایه شد.

به‌طور کلی نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به شرح

زیر است:

تنش افقی حداقل، بیشترین تاثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی داشت و همان‌طور که انتظار می‌رفت جوانه‌زنی و رشد ترک در راستای عمود بر این تنش اتفاق افتاد. پارامترهایی مانند مدول یانگ و تنش قائم تاثیر بر فشار شکست هیدرولیکی نداشتند و همچنین پارامتر نسبت پواسون کمترین تاثیر را بر فشار شکست هیدرولیکی داشت به نحوی که از آن می‌توان صرف‌نظر کرد. تحلیل حساسیت به کمک روش عددی نیز این موضوع را تایید کرد. نتیجه اصلی این پژوهش یک رابطه است که با دقت بسیار بالایی فشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های کربناته را بر اساس تنش افقی حداقل، اختلاف تنش افقی حداقل و حداکثر، مقاومت کششی و فشار منفذی تخمین می‌زند. این رابطه بر اساس نتایج مدلسازی‌های عددی و تحلیل‌های آماری ارایه شد.

### ۵- مراجع

[۱] آیت‌اللهی، م. ر؛ پور کاویان، م. ح؛ محمد علیها، م. ر؛ ۱۳۹۰؛ "تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد ترک، در عملیات شکست هیدرولیکی". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن،

دوره ۶، شماره ۱۲، ص ۷۰-۶۱.

[2] Wilkinson, J. R., Teletzke, G. F., and King, K. C. (2006). "Opportunities and Challenges for Enhanced Recover in Middle East". Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 5-8 November, Abu Dhabi, UAE, 15-20.

هیدرولیکی در مخازن نفتی با اجزاء محدود توسعه یافته". مهندسی عمران شریف، دوره ۳۰-۲، شماره ۱/۴، ص ۱۱-۳.

[۱۵] دهقان، ع. ن؛ گشتاسی، ک؛ آهنگری، ک؛ جبین، ی؛ میکیمینس، 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، شماره ۱، ۸۵-۲، ص ۱۸۹-۱۸۰.

[۱۶] اکرمی، ع؛ حسینی، م؛ ۱۳۹۶؛ "مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی". یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱ یازدهم، شماره ۱، ص ۸۳-۹۱.

[۱۷] شلیلیان، ر؛ ۱۳۹۵؛ "آموزش گام به گام Abaqus". انتشارات خلیج فارس.

[۱۸] شیرین آبادی، ر؛ رسولی، و؛ گشتاسی، ک؛ ۱۳۸۵؛ "تحلیل پایداری چاه در یکی از مخازن نفتی ایران". اولین کنگره مهندسی نفت ایران، ۹-۱۰ خرداد، تهران.

[۱۹] شفائی زاده، ا؛ فروزان، م. ر؛ فرامرز، ل؛ ۱۳۹۳؛ "شبیه‌سازی جوانه‌زنی و رشد ترک در عملیات شکست هیدرولیکی چاه نفت با استفاده از معیار آسیب تنش اصلی پیشینه". مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره چهاردهم، شماره ۵، ص ۱۷۴-۱۶۴.

[۲۰] کوچکی، ا؛ گشتاسی، ک؛ ۱۳۸۶؛ "تحلیل پایداری چاه نفت سازند آسماری مخزن کوپال". ششمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، ۲۱-۲۳ اسفند، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ص ۴۳۴-۴۲۷.

[۲۱] چمن زاد، م. ع؛ نوروزی بزمین آبادی، س؛ رمضان زاده، ا؛ تخم چی، ب؛ 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، ص ۵۳۱-۵۲۴.

[۲۲] سید سجادی، ش؛ عقیقی، م. ع؛ ۱۳۹۴؛ "ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان در میدان کوپال". نشریه علمی-پژوهشی معدن، دوره دهم، شماره ۲۶، ص ۳۴-۲۱.

[۲۳] عسگری، ر؛ عقیقی، م. ع؛ قویدل، ن؛ بلقن آبادی، ر. ا؛ ۱۳۹۴؛ "پایداری چاه و تعیین فشار بهینه گل در یکی از میادین نفتی جنوب ایران". اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، ۲۴-۲۲ اردیبهشت، مرکز همایش‌های بین‌المللی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران، ص ۳۰۸-۲۹۹.

[۲۴] توکلی فر، ع؛ آبدیده، م؛ ۱۳۹۱؛ "تحلیل پایداری چاه توسط معیار مور-کلمب و تعیین پنجره ایمن گل در یکی از مخازن جنوب غربی ایران". نخستین همایش ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری، علوم و صنایع مرتبط، ۲۵ خرداد، هم اندیشان انرژی کیمیا، تهران.

[۲۵] طواف، س؛ آبدیده، م؛ ۱۳۹۱؛ "طراحی مدل ژئومکانیکی سنگ مخزن در یکی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان". سی و یکمین

[3] Bareer R. D., Fisher M. K., and Woodroof R. A. (2002). "A practical guide to hydraulic fracturing diagnostic technologies". SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 29 September-2 October, San Antonio, Texas, 10-15.

[4] Nasehi, M. J., and Mortazavi, A. (2013). "Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing". Journal of Petroleum Science and Engineering, 108: 211-221.

[۵] برهانی کودهی، ه؛ عقیقی، م. ع؛ ۱۳۹۳؛ "مدل‌سازی تقریبی عملیات شکافت هیدرولیکی: مطالعه موردی بر روی یک میدان نفتی در غرب ایران". پژوهش نفت، شماره ۸۱، ص ۱۲۴-۱۱۲.

[6] Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A., and Gholamnejad, J. (2016). "DEM simulation of confining pressure effects on crack opening displacement in hydraulic fracturing". International Journal of Mining Science and Technology, 26: 577-561.

[7] Hubbert, M. K., and Willis, D. G. (1957). "Mechanics of hydraulic fracturing". Society of Petroleum Engineers, 210: 153-163.

[8] Daneshy, A. A., (1974). "Hydraulic Fracture Propagation in the Presence of Planes of Weakness". Presented at the SPE European Spring Meeting, 29-30 May, Amsterdam, the Netherlands, 153-163.

[9] 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, Kentucky, 613-621.

[10] De pater, C. J., and Beugelsdijk, L. J. L. (2005). "Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock". The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 25-29 June, Anchorage, Alaska.

[11] Zhang, G., and Chen, M. (2010). "Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing". Journal of Petroleum Science and Engineering, 70: 266-272.

[12] Shimizu, H., Murata, S., and Ishida, T. (2011). "The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48: 712-727.

[13] Jianchun, G., Xing, Z., Haiyan, Z., Xudong, Z., and Rui, P. (2015). "Numerical simulation of interaction of hydraulic fracture and natural fracture based on the cohesive zone finite element method". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 25: 180-188.

[۱۴] ملاعلی، م؛ یزدانی، م؛ ۱۳۹۳؛ "مدل‌سازی عددی شکست

گردهمایی علوم زمین، ۱۱-۱۲ آذر، تهران، ص ۱۰-۱.

<sup>۱</sup> Asphaltin

<sup>۲</sup> Paraffin

<sup>۳</sup> Breakdown pressure formation

<sup>۴</sup> Hallibriton

<sup>۵</sup> Hubbert & Willis

<sup>۶</sup> Daneshy

<sup>۷</sup> Blanton

<sup>۸</sup> De patr and Beugelsdijk

<sup>۹</sup> Zhang and Chen

<sup>۱۰</sup> Anisotropic (Orthotropic)

<sup>۱۱</sup> David Hibbitt

<sup>۱۲</sup> Durbin-Watson

[۲۶] فاطمی عقدا، س. م؛ تلخابو، م؛ طاهری حاجی وند، ا؛ ۱۳۹۳؛ "تهیه مدل ژئومکانیکی و تعیین پنجره ایمن گل حفاری به منظور جلوگیری از ناپایداری دیواره چاه (مطالعه موردی: یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران)". همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، ۲۰ اسفند، شیراز، ایران.

[۲۷] زارع زاده، ع؛ آبدیده، م؛ ۱۳۹۲؛ "بررسی فشار شکست و تهیه مدل ژئومکانیکی یکی از چاه‌های میدان نفتی مارون". اولین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، ۲۴-۲۶ اردیبهشت، تهران، ایران، ص ۷-۱.

[۲۸] میرزا قادری، ق؛ مرادی، م؛ فلاح، ا؛ ۱۳۸۹؛ "مقدمه‌ای بر آمار و احتمال". انتشارات دانشگاه کردستان، (چاپ دوم).

[۲۹] اسماعیلیان، م؛ ربیعی، م. ر؛ ۱۳۹۴؛ "راهنمای جامع SPSS 22". نشر موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.