

تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد ترک، در عملیات شکست هیدرولیکی

مجیدرضا آیت‌اللهی^{۱*}، محمد حسن پورکاویان، محمدرضا محمدعلیها

آزمایشگاه خستگی و شکست دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، ۱۶۸۴۶، تهران، ایران
Email: m.ayat@iust.ac.ir, pourkavian@mecheng.iust.ac.ir, mrm_aliha@iust.ac.ir,

(دریافت ۲۳ دی ۱۳۸۸، پذیرش ۲۱ فروردین ۱۳۹۰)

چکیده

عملیات شکست هیدرولیکی، یکی از روش‌های افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز محسوب می‌شود. این عملیات، فرآیندی است که در آن سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا درون چاه پمپ می‌شود. عملیات پمپ کردن تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به حدی برسد که باعث ایجاد و سپس گسترش شکافی در دیواره چاه شود. در این مقاله، هدف تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، از محل شکاف اولیه ایجادشده در دیواره چاه، است. این بررسی از این نظر اهمیت دارد که اگر حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف مشخص باشد، می‌توان در انتخاب پمپ مورد نیاز، با دقت بیشتری عمل کرد و از هزینه‌های غیر لازم خودداری نمود. اما از آنجایی که روش شکست هیدرولیکی اساساً یک فرآیند بروز و گسترش ترک است، استفاده از مبانی مکانیک شکست می‌تواند ابزاری مناسب برای بررسی مناسب و مطالعه دقیق‌تر رفتار شکست توده‌های سنگی باشد. در این بررسی نمودارهای حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، در حالت‌های مختلف یک چاه در حین عملیات شکست هیدرولیکی ارائه شده است. بدین منظور تعداد زیادی مدل المان محدود چاه ترک‌دار، در معرض بارگذاری‌های مختلف، مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف نظیر تنش‌های ساختاری، عمق نسبی ترک اولیه ایجادشده در دیواره چاه و نیز زاویه چاه، بر حداقل فشار لازم برای آغاز و گسترش شکاف، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مهمترین پارامتر اثرگذار بر حداقل فشار لازم، تنش افقی مینیمم در اعماق زمین است. افزایش تنش بر جای افقی مینیمم، فشار شکست بیشتری را موجب می‌شود. ضمناً با ایجاد چاه مایل می‌توان با فشار پمپ کمتری، شکاف را گسترش داد.

کلمات کلیدی

مکانیک شکست، شکست هیدرولیکی، ضریب شدت تنش، تنش‌های ساختاری، فشار مینیمم پمپاژ، مدل‌سازی اجزای محدود

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

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

- 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

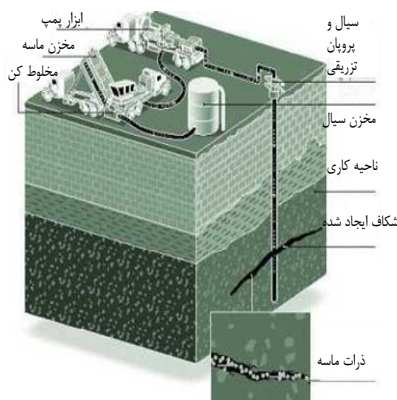
یکی از روش‌های ازدیاد برداشت که در ساختارهای^۱ با نفوذپذیری پایین به فراوانی کاربرد دارد، فرآیند شکست هیدرولیکی^۲ است که برای افزایش نرخ تولید و اقتصادی‌تر کردن برداشت محصول در این نوع ساختارها به کار می‌رود [۲].

کاربردهای مختلفی برای عملیات شکست هیدرولیکی وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از [۳]:

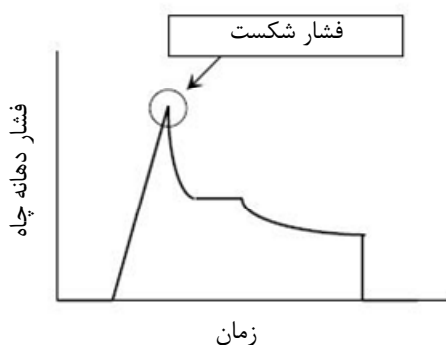
- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از مخازن با نفوذپذیری پایین
- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از چاه‌هایی که دچار آسیب دیدگی شده‌اند.
- متصل کردن شکاف‌های طبیعی موجود در اطراف چاه مورد بهره‌برداری
- تعدیل افت فشار برای کمینه کردن مشکلات ناشی از رسوبدهی آسفالتین و پارافین
- تعدیل افت فشار اطراف چاه برای کمینه کردن تولید شن
- افزایش ناحیه زه‌کشی^۳ و یا افزایش سطح مؤثر چاه
- وصل کردن مخازن عمودی به مخازن فرعی اریب یا چاه‌های افقی

عملیات شکست هیدرولیکی، فرآیندی است که در آن سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا درون چاه پمپ می‌شود. قبل از پمپ

کردن سیال، یک شکاف اولیه^۴ در دیواره چاه ایجاد می‌شود. به موازات پمپ شدن سیال، فشار در چاه بالا می‌رود. برای انجام این عملیات به پمپ‌هایی با قدرت 2000 hp (1500 kW) نیاز است. عملیات پمپ کردن تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به حدی برسد که شکست آغاز شود و شکاف درون دیواره چاه رشد کند. هنگامی که دیواره می‌شکند، سیال درون شکاف جریان می‌یابد. سپس برای جلوگیری از بسته شدن شکاف، عامل پروپانی درون شکاف قرار می‌گیرد [۳]. شکل ۱ نمای شماتیکی از یک عملیات شکست هیدرولیکی در چاه‌داره چاه و شکل ۲ منحنی فشار تزریق را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، در یک فشار بحرانی، شکست آغاز می‌شود. در این مقاله، هدف یافتن فشار آغاز شکست در شرایط مختلف است که در ادامه به آن پرداخته شده است.



شکل ۱: نمای شماتیکی از یک عملیات شکست هیدرولیکی در چاه‌داره چاه و ابزار پمپاژ [۴]



شکل ۲: نمودار شماتیک فشار بر حسب زمان در عملیات شکست هیدرولیکی [۵]

کرد. این کار صرفه اقتصادی و زمانی مطلوبی را برای شرکت-های مجری عملیات شکست هیدرولیکی در پی خواهد داشت.

۲- مقادیر تنش های ساختاری در اعماق مختلف زمین

ساختارهای زیرزمینی محبوس شده و تحت تنش می باشند. تنش ها به سه تنش اصلی تقسیم می شوند. در این بررسی σ_1 تنش عمودی، σ_2 تنش افقی ماکزیمم و σ_3 تنش افقی مینیمم است.

برای بررسی هر چه بهتر عملیات شکست هیدرولیکی، لازم است که مقادیر مختلف تنش های ساختاری محاسبه شود. این عملیات در اعماق مختلفی از زمین انجام می شود و از این رو لازم است که مقادیر تنش های ساختاری، به صورت تابعی از عمق مورد نظر بیان شود. تنش های ساختاری باید با در نظر گرفتن خواص سنگ نظیر شکل پذیری، استحکام و نفوذپذیری مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به این خواص، مقادیر این تنش ها می تواند از یک نقطه به نقطه دیگر تغییر کند. تنش عمودی برابر با فشار لایه سربار^۸ و یا فشار ناشی از وزن توده های سنگی موجود است که از معادله ۱ به دست می آید.

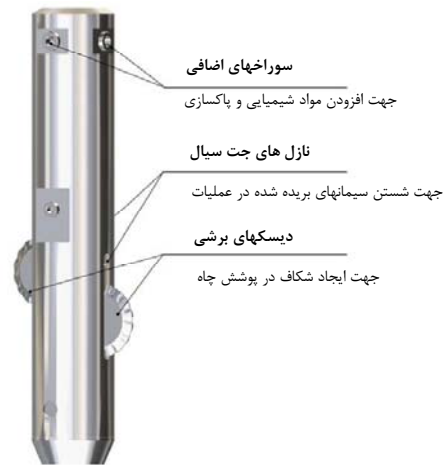
$$\sigma_1 = \rho gh \quad (1)$$

که در آن σ_1 تنش عمودی، ρ چگالی توده سنگی، g شتاب گرانشی و h عمق مورد نظر است [۹]. اما تنش های افقی به وجود آمده، عموماً به وسیله آزمایش های صحرایی اندازه گیری می شوند. کریستوفر^۹ و همکارانش [۱۰]، نمودارهایی را برای به دست آوردن تنش افقی مینیمم (σ_3) و تنش افقی ماکزیمم (σ_2)، با توجه به تنش عمودی و عمق مورد نظر، توسعه داده اند.

۳- تئوری های رشد شکاف

از آنجا که روش شکست هیدرولیکی اساساً یک فرآیند بروز و گسترش ترک است، استفاده از مبانی مکانیک شکست می تواند ابزاری مناسب برای بررسی مناسب و مطالعه دقیق تر رفتار شکست توده های سنگی و نیز تخمین تنش های برجای اعماق زمین باشد. بر اساس تئوری های موجود شکاف [۱۱-۱۳]، شکست و رشد ترک زمانی اتفاق می افتد که مقدار پارامترهایی نظیر تنش، کرنش و انرژی در اطراف نوک ترک به مقدار بحرانی خود که معمولاً یک مشخصه ذاتی از هر ماده ترک داری

مهم ترین عامل برای جابه جایی سیال بین مخزن و دهانه چاه، ایجاد شکاف اولیه در دیواره چاه است. به طور کلی روش های مختلفی برای ایجاد شکاف درون دیواره چاه وجود دارد. از مرسوم ترین روش هایی که در عمل مورد استفاده قرار می گیرد، می توان به مواردی نظیر روش برشی، تفنگ های نفوذی، جت سیال و ... اشاره کرد. در این مقاله، شکاف اولیه ایجاد شده به روش برشی در دیواره چاه، بررسی و مدل سازی شده است. در این روش از تیغه های برشی دورانی استفاده می شود که قابلیت ایجاد شکاف های نیم دایره ای را فراهم می کند. در شکل ۳ ابزار برشی و قسمت های مختلف آن مشاهده می شود.



شکل ۳: قسمت های مختلف تشکیل دهنده ابزار برشی [۶]

معیارهای مختلفی برای بررسی رشد ترک وجود دارد. معیار حداکثر تنش محیطی^۵ در حالت مود ترکیبی شکست، توسط اردوگان^۶ و همکارانش [۷] بسط داده شده است. اما از آنجایی که در این تحقیق مود I خالص مورد بررسی قرار می گیرد، لازم است که از معیارهای مربوط به مود I خالص استفاده شود. ریچی^۷ و همکارانش [۸]، چقرمگی شکست را به عنوان معیار آغاز رشد شکاف هیدرولیکی در مود I خالص، ارائه کرده اند. آن ها بیان می کنند که اگر $K_I \geq K_{IC}$ باشد، رشد شکاف آغاز می شود. اما در بررسی های انجام شده در این تحقیق، هدف این است که در شرایط مختلف، بتوان حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف را تخمین زد. این بررسی از این نظر اهمیت ویژه ای دارد که اگر حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف مشخص باشد، می توان در انتخاب پمپ مورد نیاز، با دقت بیشتری عمل نموده و از هزینه های غیر لازم خودداری

$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \right)$	(۳)
$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	(۴)

که در آن r و θ مؤلفه‌های مختصات نوک ترک در سیستم قطبی بوده و σ_{xx} ، σ_{yy} و σ_{xy} مؤلفه‌های تنش در سیستم مختصات کارتزین می‌باشند (شکل ۵). عبارت سمت راست معادلات ۲ تا ۴ وابسته به ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} (مربوط به مود I و مود II) است. ترم‌های بالاتر بسط سری سینگولار نبوده و معمولاً از اثر آن‌ها در مجاورت نوک ترک صرف‌نظر می‌شود.

ضریب شدت تنش مود I معمولاً به صورت معادله ۵ ارائه می‌شود:

$$\sigma_I = \rho gh \quad (۵)$$

که در آن a طول ترک، σ معرف تنش دور دست اعمالی و Y_I یک ضریب هندسی است که تابعی از طول ترک و پارامتر-های هندسی دیگر (با توجه به نوع قطعه) است.

در ادامه روابطی برای به‌دست آوردن ضریب شدت تنش به روش تحلیلی در چند مورد خاص ارائه شده است.

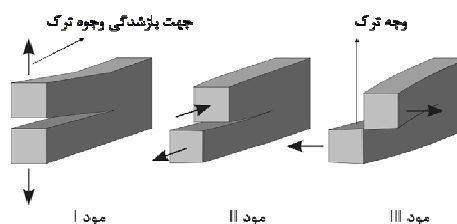
یک شکاف دوبعدی خطی، در معرض فشار تزریق داخلی یکنواخت P_f قرار گرفته است. فرض می‌شود این شکاف درون صفحه ای که تحت تنش افقی کمینه σ_3 قرار دارد، ایجاد شده است. ابعاد صفحه بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. ایروین^{۱۱} [۱۷] یک حل تحلیلی برای یافتن ضریب شدت تنش مود I، برای چنین شکافی بیان کرده است:

$$K_I = (P_f - \sigma_3) \sqrt{\pi L_f} \quad (۶)$$

که در آن L_f نصف طول شکست است.

یک شکست سه بعدی شعاعی در یک محیط بی‌نهایت، با یک فشار شکست داخلی یکنواخت P_f و تنش σ_3 وجود دارد. ندون^{۱۲} [۱۸]، بیان نمود که ضریب شدت تنش برای چنین شکافی، $\frac{2}{\pi}$ برابر شکاف دوبعدی خطی در محیط بی‌نهایت

است، برسد. مهم‌ترین پارامتری که در مکانیک شکست مطرح است، ضریب شدت تنش می‌باشد به گونه ای که می‌توان حوزه تنش، کرنش و انرژی اطراف نوک ترک را بر حسب این ضریب بیان کرد [۱۱-۱۳]. در نتیجه یکی از مهم‌ترین مراحل در تحلیل شکست و رفتار رشد ترک بر اساس مبانی مکانیک شکست، بررسی این پارامتر است. به همین منظور می‌بایست برای انواع ترک‌های موجود در سازه‌های ترک‌دار (نظیر دیواره معادن یا جداره چاه‌های نفت و گاز)، این ضریب محاسبه و مورد تحلیل قرار گیرد. مودهای بازشدگی ترک، بسته به هندسه سازه و بارگذاری روی آن می‌تواند به سه نوع وجود داشته باشد. حالت اول، مود I یا مود بازشدگی است که در این مود، جابه‌جایی وجوه ترک عمود بر جبهه ترک می‌باشد. حالت دوم، مود II یا مود لغزشی است که در آن، جابه‌جایی وجوه ترک در صفحه ترک ولی عمود بر جبهه ترک است. در حالت سوم، مود III موسوم به مود پارگی تعریف می‌شود که در این مود جابه‌جایی وجوه ترک در صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است. شکل ۴ این سه مود بارگذاری و تغییر شکل ترک را نشان می‌دهد. یک ترک می‌تواند تحت یکی از مودهای I، II، و III یا ترکیبی از آن‌ها (معمولاً ترکیبی از کشش یعنی مود I و برش یعنی مود II) قرار گیرد [۱۴].



شکل ۴: مودهای اصلی شکست [۱۵]

متناظر با این سه مود بازشدگی نوک ترک، ضریب شدت تنش مود I (K_I)، ضریب شدت تنش مود I (K_I) و ضریب شدت تنش مود I (K_I) تعریف می‌شود. مطابق با آنچه ویلیامز^{۱۰} [۱۶] ارائه کرده است، تنش‌های الاستیک اطراف نوک ترک به صورت عبارتهای یک سری نامتناهی بیان می‌شود. ترم اول این بسط سری، سینگولار (تکین) است و به صورت معادلات ۲ تا ۴ نوشته می‌شود.

$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-2 \sin \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	(۲)
---	-----

پژوهش از روش عددی و به طور خاص از تحلیل اجزاء محدود برای تعیین ضرایب شدت تنش در جداره یک چاه ترک‌دار در حین عملیات شکست هیدرولیکی، استفاده شده است.

۴- مدل‌سازی عددی عملیات شکست هیدرولیکی

مدل‌سازی المان محدود عملیات شکست هیدرولیکی توسط نرم افزار ABAQUS انجام گردید. از قابلیت‌های ویژه این نرم‌افزار مدل‌سازی ساده تر ترک نیم‌دایره‌ای شکل است. این نرم‌افزار ضریب شدت تنش را به‌طور مستقیم محاسبه می‌کند. در شکل ۶ مدل هندسی و بارگذاری شده چاه به همراه ترک ایجاد شده در جداره آن نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای مدل‌سازی چاه حفر شده در زمین، یک بلوک به-عنوان ساختار زمین و استوانه‌ای توخالی به عنوان چاه در داخل بلوک در نظر گرفته شده است. ابعاد بلوک $2m \times 2m \times 2m$ و قطر چاه نیز $20cm$ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی تنش‌های ساختاری اعمالی، بلوک از سه راستای عمود بر هم، تحت بارگذاری σ_1 ، σ_2 و σ_3 قرار داده می‌شود. ترک اولیه همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نیم دایره‌ای به شعاع $4cm$ می‌باشد. با توجه به تقارن موجود در مدل و به ایت دلیل که زاویه قرارگیری ترک اولیه نسبت به جداره چاه عمود در نظر گرفته شده است، وجوه ترک تنها در معرض بازشدگی قرار گرفته است و فقط بارگذاری مود I را تجربه می‌کند؛ لذا در این مقاله تنها به محاسبه ضریب شدت تنش مود I (K_I) در چاه مورد بررسی پرداخته می‌شود. در صورت تغییر شرایط بارگذاری و تغییر زاویه ترک نسبت به راستای جداره چاه، علاوه بر مود I سایر مدهای شکست نیز در تغییر فرم لبه‌های ترک مشارکت خواهند داشت که البته بررسی این موضوع خارج از چارچوب این مقاله است. همچنین به دلیل وجود تقارن هندسی و بارگذاری، برای سهولت مدل‌سازی و کاهش زمان تحلیل، تنها نصف مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحلیل مدل‌ها، خواص مادی در نظر گرفته شده برای توده های سنگی واقع در اعماق زمین، به شرح زیر است (این مقادیر توسط اینگرافیا^{۱۴} و همکارانش [۲۵] برای یک مخزن با سنگ‌های زغالی ارائه شده است):

$$E = 10GPa, \nu = 0.25, K_{IC} = 5MPa\sqrt{m}, P_f = 60MPa$$

که در آن E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، P_f فشار تزریق سیال و K_{IC} چقرمگی شکست است.

است. بنابراین ضریب شدت تنش برای شکست شعاعی سه بعدی در نوک آن به وسیله معادله ۷ محاسبه می‌شود.

$$K_I = \frac{2}{\pi} (P_f - \sigma_3) \sqrt{\pi R_f} \quad (7)$$

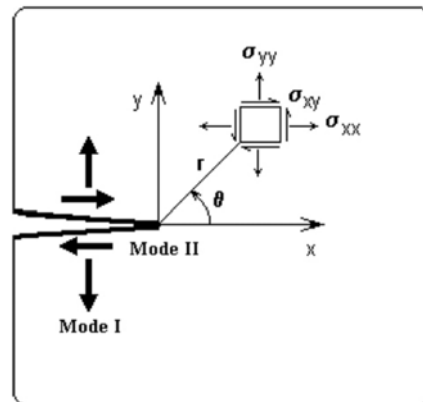
که شعاع شکست است.

تادا^{۱۳} [۱۹]، بیان کرد که چنین تحلیلی برای ضریب شدت تنش مود I، در چاهی که دارای شکاف است به صورت معادله ۸ ارائه می‌شود.

$$K_I = \frac{2(P_f - \sigma_3)}{\sqrt{\pi R_f}} \sqrt{R_f^2 - r_w^2} \quad (8)$$

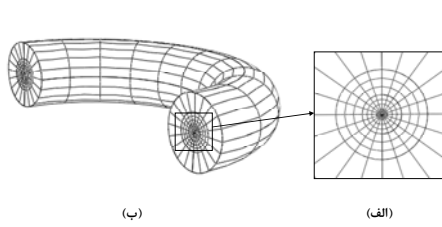
که r_w شعاع دهانه چاه است [۲۰].

سه شیوه متداول برای تعیین ضرایب شدت تنش وجود دارد: ۱- روش‌های تحلیلی ۲- روش‌های تجربی ۳- روش‌های عددی.

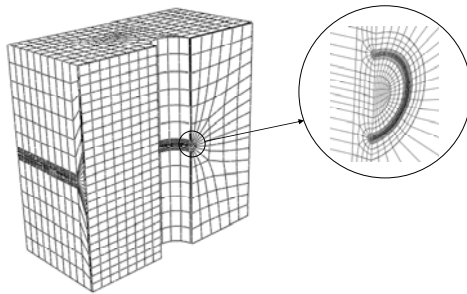


شکل ۵: تنش الاستیک اطراف نوک ترک در سیستم مختصات کارتزین

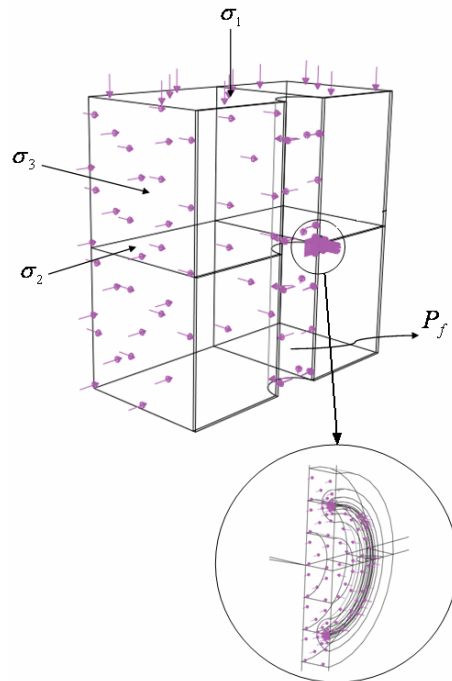
روش‌های عددی متعددی برای به دست آوردن ضرایب شدت تنش وجود دارد. دو روش عددی که به طور گسترده در به-دست آوردن ضرایب شدت تنش استفاده می‌شوند، روش المان مرزی (BEM) و روش المان محدود (FEM) می‌باشند [۲۱-۲۲]. برای هندسه و بارگذاری های پیچیده، مانند مدل‌سازی فرآیند شکست هیدرولیکی، روش المان محدود، روش قابل-اعتماد و مناسبی برای تعیین K_I است. به عنوان مثال، آیت الهی و همکاران [۲۳-۲۴] ضرایب شدت تنش مجموعه متنوعی از قطعات ترک‌دار دوبعدی و سه‌بعدی را با استفاده از روش المان محدود با دقت بسیار مناسبی محاسبه نموده‌اند. در این



شکل ۷: المان‌های تکین: الف) دوبعدی مولد، ب) سه بعدی



شکل ۸: مدل کامل المان‌بندی شده چاه ترک‌دار و ساختار اطراف آن



شکل ۶: بارگذاری مدل چاه، ساختار اطراف آن و ترکاویه

نرم‌افزار ABAQUS برای به دست آوردن ضرایب شدت تنش از روش انتگرال J استفاده می‌کند. این پارامتر معمولاً در مسائل شبه الاستاتیک و مستقل از نرخ استفاده می‌شود و نشان‌دهنده انرژی آزاد شده در اثر رشد ترک است.

$$J = -\frac{\partial U}{\partial a^*} \quad (9)$$

که در آن U انرژی آزاد شده و a^* طول ترک است. به منظور جامع‌تر شدن مطالعات انجام‌شده، لازم است که پارامترهای مورد بررسی بی‌بعد شوند. برای بی‌بعد کردن اثرات اندازه ترک اولیه، نسبت a/R تعریف می‌شود، که a شعاع ترک اولیه و R شعاع چاه است؛ در این پژوهش شعاع چاه ثابت و برابر با 0.1 متر می‌باشد.

اما همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، مقادیر تنش افقی مینیمم و تنش افقی ماکزیمم، وابسته به مقدار تنش عمودی است. بنابراین برای بی‌بعد کردن اثرات تنش‌های ساختاری، این پارامترها، به وسیله تنش عمودی $\sigma_{1,t}$ (که در حالت بررسی-شده توسط اینگرافیا و همکارانش [۲۵] مقدار 80 MPa در نظر گرفته شده است)، بی‌بعد شده‌اند. پارامترهای بی‌بعد σ_1^* ، σ_2^* و σ_3^* به صورت روابط ۱۰ تعریف می‌شوند.

اینگرافیا و همکارانش سنگ چاه را به صورت همگن با خواص ایزوتروپیک و رفتار ماده را به صورت الاستیک در نظر گرفته‌اند و به نتایج قابل قبولی در مقایسه با شرایط آزمایشی دست یافته‌اند. در این مقاله نیز با تکیه بر نتایج به دست آمده توسط اینگرافیا و همکارانش، شرایط به همان صورت در نظر گرفته شده است.

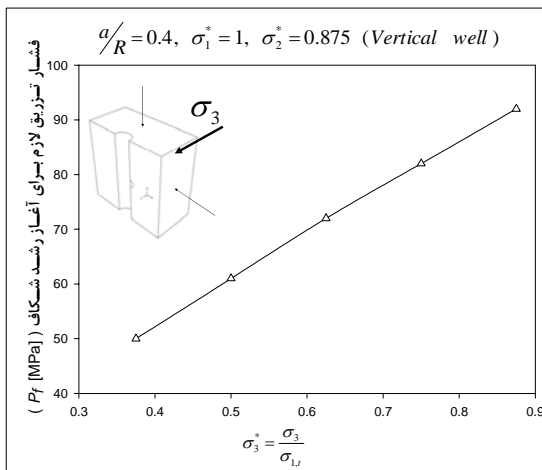
در واقع حالت بحرانی ضریب شدت تنش است که به عنوان خاصیت هر ماده ترک‌دار شناخته می‌شود. به منظور مدل‌سازی تکینگی موجود در مؤلفه‌های تنش و کرنش، از المان‌های ویژه‌ای به نام المان‌های سینگولار، برای جبهه ترک استفاده می‌شود.

المان‌های موجود در مدل همگی از نوع مکعبی 20×15 گرهی بوده و تعداد آن‌ها نیز حدود ۱۱۰۰۰ المان است که به دلیل اهمیت بررسی شرایط تنش در اطراف ترک، در این قسمت از المان‌های ریزتری استفاده شده است (شکل ۷). با توجه به الاستاتیکی بودن حل مسئله، استفاده از این تعداد المان، علاوه بر زمان‌بری کم، دقت بالایی را برای نتایج به دست آمده به همراه دارد. شکل ۸ نمایی از مدل المان‌بندی شده چاه به همراه ترک موجود در جداره آن را نشان می‌دهد.

بر فشار شکست سیال دارد.

در نمودار شکل ۱۳ تأثیر زاویه قرارگیری چاه نسبت به راستای قائم بر مقدار فشار تزریق لازم برای آغاز رشد شکاف، مورد بررسی قرار گرفته است. از این شکل ملاحظه می‌شود که از زاویه صفر درجه تا زاویه ۴۵ درجه، با افزایش زاویه چاه مقدار فشار لازم برای آغاز رشد ترک افزایش می‌یابد. با ادامه این روند از زاویه ۴۵ درجه تا زاویه ۹۰ درجه با افزایش زاویه چاه، فشار لازم برای آغاز رشد ترک با کاهش روبه‌رو می‌شود. این شرایط از تغییر توزیع تنش در اطراف ترک، به دلیل تغییر زاویه چاه ناشی می‌شود.

مقایسه چاه‌های عمودی (با زاویه $\alpha = 0^\circ$) نسبت به حالت قائم) و چاه‌های افقی (با زاویه $\alpha = 90^\circ$)، بیانگر این مطلب است که چاه‌های افقی به فشار تزریق کمتری برای آغاز و رشد ترک نیاز دارند. در تحقیقات انجام‌شده توسط سایر محققین نیز این نتیجه حاصل شده است که چاه‌های افقی از نظر سهولت انجام عملیات شکست هیدرولیکی و افزایش میزان استحصال نفت و گاز، مناسبتر از چاه‌های عمودی می‌باشند [۲۶].



شکل ۹: نمودار حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، بر حسب تنش افقی مینیمم بی‌بعد شده

$$\sigma_1^* = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1f}}, \quad \sigma_2^* = \frac{\sigma_2}{\sigma_{1f}}, \quad \sigma_3^* = \frac{\sigma_3}{\sigma_{1f}} \quad (10)$$

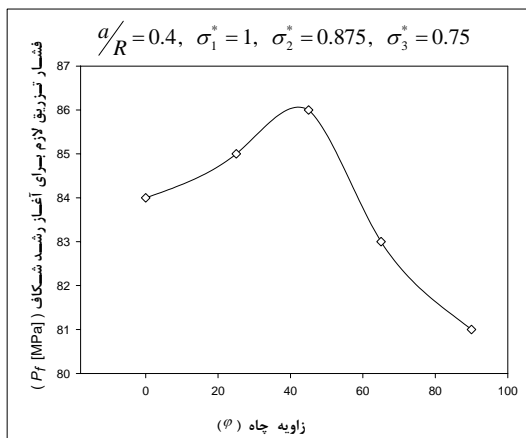
۵- مدل‌سازی چگونگی آغاز رشد شکاف

همان‌طور که ذکر شد، یکی از مهمترین پارامترهایی که در بررسی عملیات شکست هیدرولیکی مورد توجه قرار می‌گیرد، فشار سیال برای آغاز شکست ترک است. برای به‌دست آوردن این فشار، در نرم افزار ABAQUS، برای شرایط مختلف، به تدریج فشار سیال تغییر داده شد تا مقدار K_{Ic} به مرز K_{Ic} (برابر با $5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ در مخازن زغالی [۲۵]) برسد. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل‌های المان محدود حاصل و تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب شدت تنش در قالب نمودارهایی ارائه شده‌اند و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

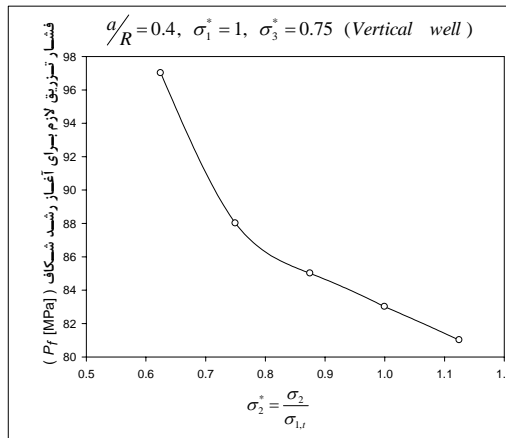
نمودارهای مربوط به فشار تزریق لازم برای آغاز شکست، نسبت به تغییرات تنش‌های ساختاری بی‌بعد شده، در شکل‌های ۹ تا ۱۳ نشان داده شده است. در تمام بررسی‌های انجام شده، این نتیجه حاصل شد که عمیق‌ترین نقطه واقع بر جبهه ترک، بحرانی‌ترین نقطه است. لذا رشد ترک از این نقطه آغاز می‌شود. از این رو نتایج برای این نقطه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش افقی مینیمم، فشار لازم برای آغاز رشد شکاف نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر فشار آغاز شکست نسبت مستقیمی با تنش افقی مینیمم دارد. چرا که تنش افقی مینیمم عمود بر وجوه ترک بوده و از بازشدگی وجوه ترک جلوگیری می‌کند. بنابراین با افزایش تنش افقی مینیمم، باید فشار شکست افزایش یابد.

اما از آنجایی‌که تنش افقی ماکزیمم و تنش عمودی، تمایل وجوه ترک به بازشدگی را افزایش می‌دهند، اگر این تنش‌ها افزایش یابد، فشار شکست کمتری برای آغاز رشد شکاف لازم است. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ این مطلب را تأیید می‌کند. در این شکل‌ها دیده می‌شود که با افزایش تنش افقی ماکزیمم و نیز تنش عمودی، مقدار فشار لازم برای آغاز شکست کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۲ دیده می‌شود، با افزایش عمق نسبی ترک، فشار لازم برای آغاز شکست کاهش می‌یابد. این کاهش فشار نرخ کند شونده‌ای دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش عمق نسبی ترک در شرایط بررسی‌شده در این تحقیق، در نسبت‌های a/R بیشتر از $1/6$ ، تغییرات این نسبت تأثیر کمی



شکل ۱۳: نمودار حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، بر حسب زاویه چاه

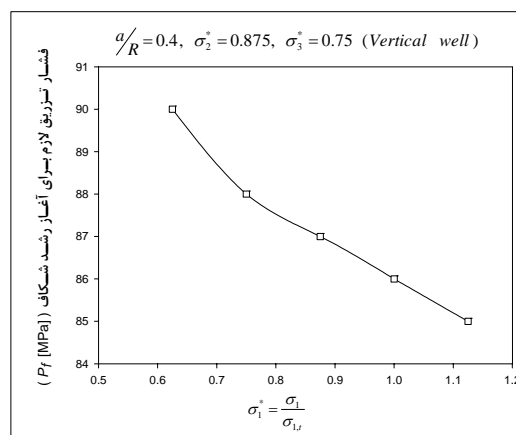


شکل ۱۰: نمودار حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، بر حسب تنش افقی ماکزیمم بی‌بعدشده

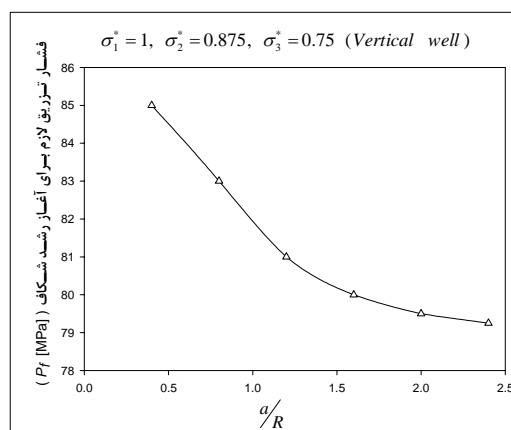
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله حداقل فشار تزریق لازم برای آغاز رشد شکاف در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که ذکر شد، این بررسی از این جهت اهمیت دارد که شرکت‌های مجری عملیات شکست هیدرولیکی همواره سعی بر این دارند که هزینه اقتصادی ناشی از خرید پمپ را کاهش دهند. از این رو بررسی حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، می‌تواند در انتخاب علمی یک پمپ مناسب، مفید واقع شود. با توجه به تحلیل‌های انجام شده نتایج زیر از این پژوهش حاصل شد.

- با افزایش تنش افقی مینیمم، فشار لازم برای آغاز رشد شکاف نیز افزایش می‌یابد.
- با افزایش تنش افقی ماکزیمم و نیز تنش عمودی، مقدار فشار لازم برای آغاز شکست هیدرولیکی در دیواره چاه، کاهش می‌یابد. اما اثر تنش افقی ماکزیمم در مقایسه با تنش عمودی بارزتر است.
- با افزایش عمق نسبی ترک، فشار لازم برای آغاز شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این کاهش فشار نرخ‌کند-شونده‌ای دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش عمق نسبی ترک، تغییرات این نسبت تأثیر بسیار کمی بر فشار شکست سیال دارد. این امر از ناپایداری مسیر اولیه رشد ترک ناشی می‌شود.
- تغییر توزیع تنش در اطراف ساختار اعماق زمین، اثرات قابل توجهی بر فشار لازم برای آغاز رشد ترک دارد و زاویه چاه (که تغییر توزیع تنش را موجب می‌شود)، عامل افزایش یا کاهش مقدار فشار تزریق لازم برای آغاز رشد



شکل ۱۱: نمودار حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، بر حسب تنش عمودی بی‌بعدشده



شکل ۱۲: نمودار حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، بر حسب عمق نسبی ترک

[12] Hussain M.A., Pu S.L., Underwood, J.; 1974; "Strain energy release rate for a crack under combined mode I and Mode II", ASTM STP 560, Philadelphia, pp. 2-28.

[13] Sih G.C.; 1974; "Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems", *International Journal of Fracture*, Vol. 10, pp. 305-321.

[14] Queipo V., Verde J., Canelo J., Pintos S.; 2002; "Efficient global optimization for hydraulic fracturing treatment design", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 45, pp. 1-2.

[15] Thompson P.M., Chandler N.A.; 2004; "In situ rock stress determinations in deep boreholes at the Underground Research Laboratory", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 1-5.

[16] Williams M. L.; 1957; "On the stress distribution at the base of a stationary crack", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 109-114.

[17] Irwin G.R.; 1957; "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364.

[18] Sneddon I.N.; 1946; "The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid", *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 229-260.

[19] Tada H; 1954; "Handbook of Stress Analysis of Cracks", Paris Productions and Del Research, Saint Louis, pp. 50-64.

[20] Rahman M.M., Hossain M.M., Crosby D.G., Rahman M.K.; 2002; "Analytical, numerical and experimental investigations of transverse fracture propagation from horizontal wells", *School of Petroleum Engineering, The University of New South Wales, Australia*, pp. 1-14.

[21] FatehiMarji M., Hosseini H., Kohsary A.H.; 2007; "A new cubic element formulation of the displacement discontinuity method using three special crack tip elements for crack analysis", *JPJ Solids Struct*, Vol. 1, pp. 61-9.

[22] FatehiMarji M., Hosseini H.; 2009; "Numerical modeling of the mechanism of crack propagation in rocks under TBM disc cutters", *JMM Struct*, Vol 4, pp. 605-627.

[23] Ayatollahi M.R., Aliha M.R.M.; 2007; "Wide Range Data for Crack Tip Parameters in Two Disc-Type Specimens under Mixed Mode Loading", *Computational Materials Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 660-670.

ترک است. بدین ترتیب ایجاد شکست هیدرولیکی در چاه‌های افقی با فشار تزریق بسیار کمتری نسبت به چاه‌های عمودی امکان پذیر است.

منابع

[1] Wilkinson J.R., Teletzke G.F., King K.C.; 2006; "Opportunities and Challenges for Enhanced Recovery in Middle East", *SPE Monograph*, Vol. 22, pp. 15-20.

[2] Bareer R.D., Fisher M.K., Woodroof R.A.; 2002; "A practical guide to hydraulic fracturing diagnostic technologies", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas*, pp. 10-15.

[3] Economides M.; 2004; "Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs", *Department of Energy*, pp. 2-24.

[4] Cornet F.H., Doan M.L., Fontbonne F.; 2003; "Electrical imaging and hydraulic testing for a complete stress determination", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 40, pp. 2-6.

[5] Ito T.; 2007; "Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media", *Institute of Fluid Science, Tohoku University*, pp. 1-4.

[6] Hallek P.M., Behrmann R.J.; 1988; "Reduction of jet perforator penetration in rock under stress", *63rd SPE Annual Technical conference and Exhibition, Houston, USA*, pp. 12-13.

[7] Erdogan F., Sih G. C.; 1963; "On the crack extension in Constraint Effects in Fracture", *ASME*, Vol. 85, pp. 525-527.

[8] Ritchie R.O., Knott J.F., Rice J.R.; 1973; "On the relationship between critical stress and fracture toughness in mild steel", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 21, pp 395-410.

[9] Sneddon I.N.; 1946; "The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid", *Proceedings of the Royal Society of London*, pp 229-260.

[10] Paulino H., Kim J.H.; 2003; "A new approach to compute T -stress in functionally graded materials by means of the interaction integral method Glauccio", *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana, USA*, pp. 3-4.

[11] Erdogan F., Sih G.C.; 1963; "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", *ASME*, Vol. 85, pp. 519-525.

[26] Joshi S.D.; 2003; “Benefits of horizontal wells”, SPE 83621, California, USA, pp. 19-24.

[24] Ayatollahi M.R., Bagherifard S.; 2010; “Numerical analysis of an improved DCDC specimen for investigating mixed”, *Computational Materials Science*, Vol. 46, No. 1, pp. 180-185.

[25] Ingraffea A.R., Saouma V.; 1985; “Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete”, Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands, pp. 171-225.

پی‌نوشت

-
- ¹ Formations
 - ² Hydraulic Fracturing
 - ³ Area of drainage
 - ⁴ Perforation
 - ⁵ MTS; Maximum Tangential Stress Criterion
 - ⁶ Erdogan
 - ⁷ Ritchie
 - ⁸ Overburden
 - ⁹ Christopher
 - ¹⁰ Williams
 - ¹¹ Irwin
 - ¹² Sneddon
 - ¹³ Tada
 - ¹⁴ Ingraffea
 - ¹⁵ Brick Elements