

شکافت هیدرولیکی و کاربردهای آن

رسول شیخملی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران
حسین معاریان، استاد دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران
محمدعلی عقیقی، دکتری مهندسی نفت

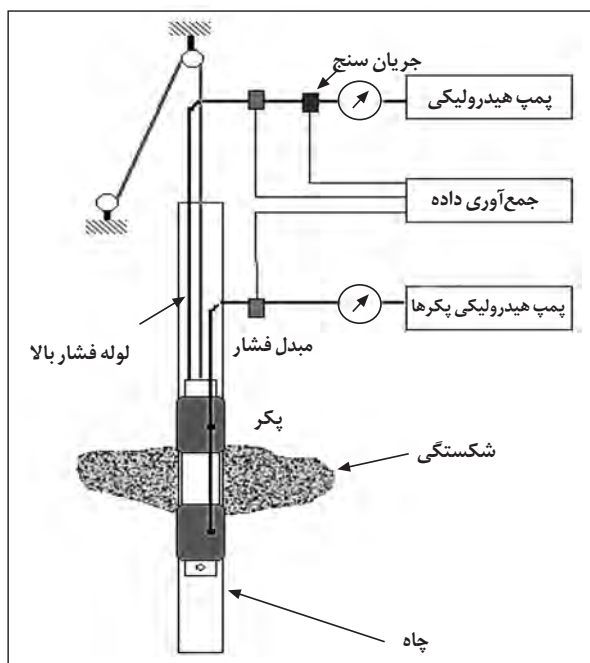
چکیده

شکافت هیدرولیکی یا آبشکافت روش اجرایی است که در آن با تزریق یک سیال پرفشار به زیر زمین شکستگی‌هایی در سنگ، ایجاد می‌شود. شکافت هیدرولیکی اولین بار در صنعت نفت و گاز اجرا شده و گسترش یافته است؛ ولی از دیگر کاربردهای آن می‌توان به اجرای آن در تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجای زمین، معدنکاری تخریب بزرگ، تولید انرژی زمین‌گرمایی و تزریق مجدد خرده‌های حفاری اشاره کرد. هدف این مقاله معرفی و بررسی کاربردهای شکافت هیدرولیکی در صنایع مختلف و مقایسه عملیاتی آنها از لحاظ میزان حجم سیال تزریق شده، نیاز به مواد افزودنی و فشار متداول برای غلبه بر محیط است. همچنین روابط مربوط به شروع شکست در یک محیط الاستیک و متخلخل آورده شده است. نگرانی‌های زیست محیطی و اقتصادی مرتبط با عملیات شکافت هیدرولیکی، طراحی دقیق این عملیات را می‌طلبد. اگرچه مدل‌های پیش‌بینی هندسه شکستگی به مرور بهبود یافته؛ ولی به دلیل اینکه این عملیات از جنبه فیزیکی پیچیده است، هنوز هم جای کار زیادی باقی است. واژه‌های کلیدی: شکافت هیدرولیکی، آبشکافت، هندسه شکستگی، فشار شروع شکست، حجم سیال تزریق شده

۱- مقدمه

شکافت هیدرولیکی^(۱)، شکست هیدرولیکی و یا آبشکافت، عبارتست از شروع و گسترش یک شکستگی از چاه به درون سازند، با استفاده از فشار سیال به عنوان منبع انرژی به این منظور بخش موردنظر از چاه، با نصب مسدودکننده‌هایی از دیگر بخش‌ها جدا شده (در یک چاه باز^(۲)) و سپس با افزایش تدریجی فشار سیال شکستگی شروع می‌شود (شکل ۱). همچنین این روش می‌تواند در یک چاه دارای پوشش جداری^(۳) اجرا شود که در این صورت سیال شکافت، سازند را از طریق فضاهای مشبک‌کاری^(۴) تحت فشار قرار خواهد داد[۱].

اولین عملیات شکافت هیدرولیکی بدون دخالت اسید، سال ۱۹۴۷ در صنعت نفت و گاز آمریکا و برای افزایش تولید یک چاه گازی، انجام شد[۲]. در سال‌های اخیر، این



شکل ۱- تجهیزات عملیات شکافت هیدرولیکی برای تعیین تنش سنگ [۴].

1-Hydraulic fracturing

2-Open hole

3-Cased hole

4-Perforations

روش، به دلیل ترکیب با فناوری های حفاری افقی و مشبک کاری جهت دار^(۱)، تولید نفت و گاز از مخازن نامتعارف^(۲)، مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۳].

روش شکافت هیدرولیکی در عمل باعث افزایش محدوده جریانی^(۳) می شود. محدوده جریانی نقاط تماس مخزن و چاه هستند که هیدروکربورها از طریق آنها به چاه جریان می یابند. مسئله محدوده جریانی یا مناطق تماس با مخزن، دلیل اساسی تبدیل شدن عملیات شکافت به تنها روش تکمیل قابل دوام در بسیاری از مخازن است. مناطق جریانی نسبی حاصل از پیکربندی های متداول چاه، در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول می توان مشاهده کرد، حتی برخی از پیکربندی های پیچیده چاه هنوز هم تنها کسری از منطقه جریانی یک شکستگی هیدرولیکی بسیار کوچک را دارند [۵].

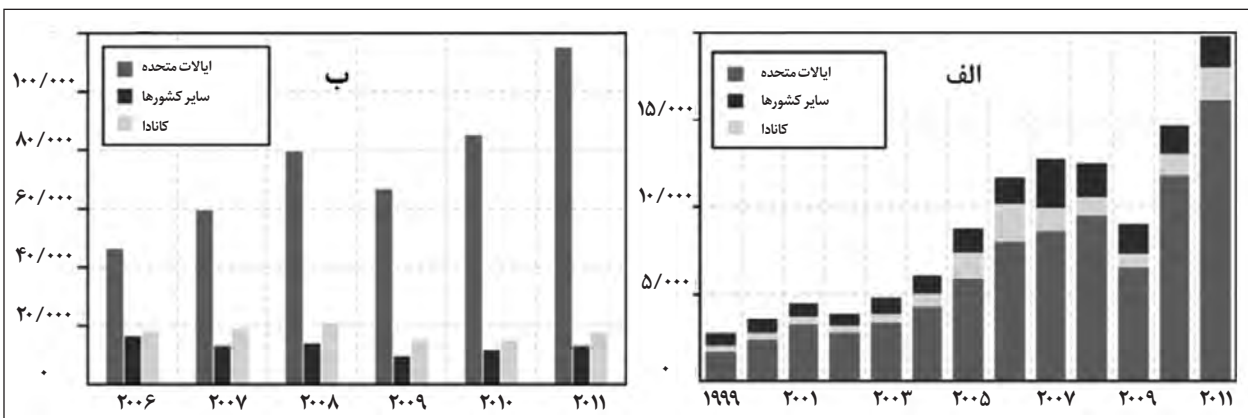
یکی از دلایل اصلی حرکت صنعت نفت از مخازن متعارف به نامتعارف، به ویژه مخازن شیلی، امکان اجرای عملیات شکافت بزرگ تر و پیچیده تر است. رشد عظیم در صنعت شکافت هیدرولیکی، به ویژه در ایالات متحده آمریکا و کانادا، در شکل ۲، نشان داده شده است. خلاصه اینکه، با شکافت هیدرولیکی ذخایر موجود سریع تر استخراج می شوند [۵].

عملیات شکافت هیدرولیکی عمدتاً تجربی و با استفاده از روش های سعی و خطا، توسعه یافته و پیشرفت کرده است. اگرچه به دلایلی که در ادامه آورده شده، ابزارهای تحلیلی و عددی چند فیزیکی نیز برای بهینه سازی این عملیات، ارائه شده اند [۳، ۶ و ۷]:

موانعی چون کسب اطلاعات از عملیات شکافت و عدم تعمیم داده ها از یک عملیات موفق شکافت به عملیات دیگر، به دلیل

جدول ۱- مقایسه منطقه تولیدی برای پیکربندی های مختلف چاه [۵]

| میزان منطقه جریانی (ft ²) | پیکربندی چاه |
|--|--|
| ۱۱۱ | قائم، جداره دار، قطر ۸/۵ اینچی، مشبک شده با تمرکز ۲ شلیک در هر فوت ^(۴) ، اینچ نفوذ، ۱۰۰ فوت در لایه تولیدی (ارتفاع خالص) ^(۵) |
| ۲۲۳ | قائم، بی جداره، قطر ۸/۵ اینچی، ۱۰۰ فوت در لایه تولیدی |
| ۴۴۵۰ | ۲۰۰۰ فوت چاه افقی بی جداره، قطر ۸/۵ اینچی |
| ۴۹۰۹ | ۶ چاه چندجانبه بی جداره یا طول ۵۰۰ فوت، قطر ۶/۲۵ اینچی |
| ۱۵۷۰۸ | نصف طول از یک شکستگی هیدرولیکی شعاعی ۵۰ فوتی |



شکل ۲- شکافت هیدرولیکی در جهان. الف- هزینه عملیات شکافت هیدرولیکی از بازار جهانی در صنعت نفت (میلیون دلار)، ب- تعداد سالانه عملیات شکافت [۵]

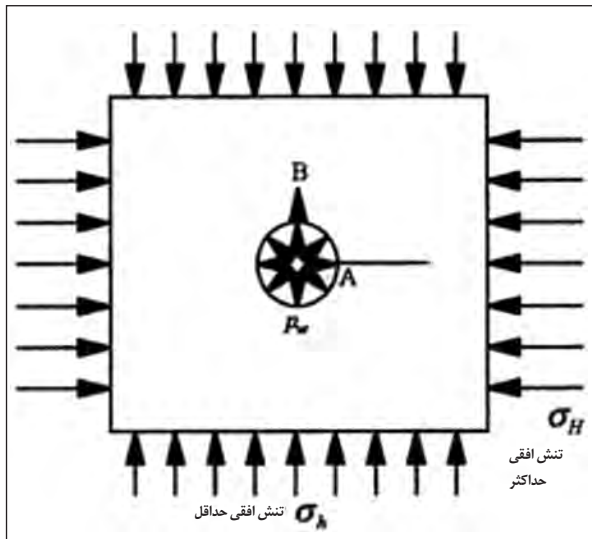
1-Oriented perforation

2-Unconventional

3-Inflow area

4-Shut per foot

5-Net height



شکل ۳- نحوه شروع شکستگی هیدرولیکی [۱].

اگر فشار چاه افزایش یابد تنش محیطی در نقطه A، $\sigma_{\theta\theta}^{\theta=0}$ در نهایت کششی می شود و شکستگی هیدرولیکی در جهت تنش حداکثر شروع می شود [۱]. در واقع، شکافت هیدرولیکی نوعی از گسیختگی کششی است و زمانی اتفاق می افتد که فشار سیال از تنش اصلی حداقل محلی $(P_w)^{(۲)}$ فراتر رود [۸]. اگر فرض کنیم T مقاومت کششی سنگ را نشان می دهد، فشار شروع شکست $(P_b)^{(۳)}$ را می توان به صورت معادله (۴) نشان داد [۱]:

$$(۴)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{\theta=0} = -\sigma_H + 3\sigma_h - P_w = -T \rightarrow P_b = T - \sigma_H + 3\sigma_h$$

۲-۲- شروع شکستگی در محیط متخلخل

بیشتر محیطها در زیرزمین متخلخل هستند و سیال به دلیل اختلاف فشار چاه و سیال منفذی محیط اطراف، می تواند از چاه به محیط اطراف نفوذ کند. پس برای پیش بینی فشار شکست در این محیطها باید اثر وجود سیال در محیط و همچنین نفوذ سیال تزریقی به محیط متخلخل در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر باید اثرات پوروالاستیک نیز در نظر گرفته شود. به دلیل وابسته بودن رفتار محیط متخلخل داری سیال منفذی به زمان اعمال بار، در راه حل های ارائه شده باید اثر زمان نیز لحاظ شود [۱]. فیلیپ چارلز (۴) روابطی را برای فشار شروع شکست در عملیات شکافت هیدرولیکی در مدت زمان کم (زهکش

ویژگی های متفاوت سازندها،

- اقتصادی کردن و سرعت بخشیدن به توسعه بیشتر این عملیات؛
- پرداختن به برخی از نگرانی های مطرح شده در مورد تاثیر بالقوه این عملیات به محیط زیست؛
- کاربردهای فراوان شکافت هیدرولیکی که باعث انگیزش صنعت شده است.

● شبیه سازی شکافت هیدرولیکی یک مسئله چند فیزیکی است که مکانیک سیالات را با مکانیک جامدات و مکانیک شکست، همبسته می کند؛ و برای مثال نمی توان همه این شرایط را در آزمایشگاه ایجاد کرد.

هدف این مقاله معرفی کاربردهای متعدد شکافت هیدرولیکی و مقایسه آنها از لحاظ مقیاس عملیات (حجم سیال تزریق شده و فشار شروع شکست)، مواد افزودنی مورد نیاز و غیره است. همچنین روابط متداول موجود برای شروع شکست در محیط الاستیک و متخلخل آورده شده است.

۲- شروع شکستگی هیدرولیکی

در این بخش به معرفی نظریه هایی که برای فشار شروع شکست هیدرولیکی ارائه شده اند خواهیم پرداخت.

۲-۱- شروع شکستگی در محیط خشک

فشار شروع یک شکستگی هیدرولیکی را به سادگی می توان با استفاده از نظریه الاستیسیته خطی به دست آورد. در دیواره چاه، تنش محیطی (1) برابر است با:

$$\sigma_{\theta\theta} = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w \quad (1)$$

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، این تنش محیطی از مقدار حداقل در نقطه A (جهت تنش بر جای حداکثر) به مقدار حداکثر در نقطه B (جهت تنش بر جای حداقل) تغییر می کند:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\theta=0} = -\sigma_H + 3\sigma_h - P_w \quad (۲)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{\theta=\frac{\pi}{2}} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w$$

نشده) ^(۱) و طولانی (زهکش شده) ^(۲) ارائه کرده است [۱]:
راه حل برای عملیات در مدت زمان کم:
(۵)

$$P_b = \frac{T - \sigma_H + 3\sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \left(\frac{1 - \nu_h}{1 - \nu} \right) - 2G\alpha P}{2(1 - G\alpha)}$$

راه حل برای عملیات در مدت زمان طولانی:
(۶)

$$P_b = \frac{T - \sigma_H + 3\sigma_h - 2G\alpha P}{2(1 - G\alpha)}$$

که ν_H نسبت پواسون زهکش نشده، ν نسبت پواسون زهکش شده، G مدول برشی، P فشار منفذی محیط و α ضریب بایوت هستند.

۳- کاربردهای شکافت هیدرولیکی

امروزه روش شکافت هیدرولیکی علاوه بر افزایش تولید در صنعت نفت و گاز، به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف دیگری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد که عمدتاً عبارتند از [۳ و ۹]:

- افزایش تولید از چاه‌های آب،
- معدنکاری تخریب بزرگ (پیش آماده‌سازی هیدرولیکی) ^(۳)،
- تعیین تنش سنگ، برای طراحی‌های ژئوتکنیکی،
- تولید نفت و گاز از مخازن
- تولید انرژی زمین‌گرمایی ^(۴)،
- ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید ^(۵)،
- توسعه متان از لایه‌های زغال سنگی ^(۶)،
- زهکشی متان از معادن زغال سنگ ^(۷)،
- کاستن خطر انفجار سنگ ^(۸)،
- تحلیل یکپارچگی چاه در عملیات حفاری،
- تزریق مجدد خرده‌های حفاری (IRC) ^(۹).

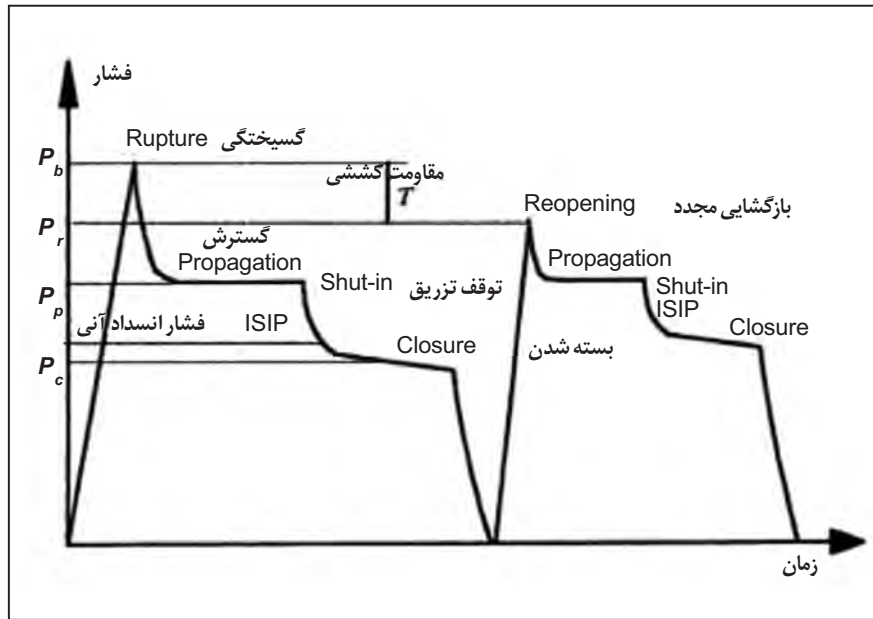
در ادامه برخی از کاربردها که به صورت گسترده در صنایع مختلف اجرا می‌شوند به تفصیل و برخی نیز به دلیل جنبه

تحقیقاتی و یا اجرای کم و نبود مطالب و نتایج مناسب به صورت مختصر آورده شده است.

۳-۱- تعیین مقدار و جهت تنش‌های زمین

عملیات شکافت هیدرولیکی برای تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجا، کاربرد دارد. این عملیات، مینی فرک ^(۱۰) یا میکروفِرک ^(۱۱) نیز نامیده می‌شوند. در اینجا بخشی از گمانه که بین دو پیکر قابل تورم است، جدا و با پمپاژ سیال با یک نرخ کنترل شده به داخل آن، فشار به تدریج بالا برده می‌شود تا زمانی که یک شکستگی در دیواره گمانه رخ دهد (شکل ۱ و شکل ۳) [۴]. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در اولین چرخه شکستگی با فشار P_b شروع شده، سپس با یک مقدار کمتری P_p گسترش می‌یابد. پس از تزریق حجم معینی از سیال شکافت، پمپاژ، متوقف شده ^(۱۲) و شکستگی شروع به بسته شدن می‌کند. در طی بسته شدن دو مرحله مشاهده می‌شود: ۱- بلافاصله پس از توقف پمپاژ، یک افت ناگهانی در نمودار فشار-زمان اتفاق می‌افتد؛ ۲- پس در نقطه‌ای که فشار انسداد آنی (ISIP) ^(۱۳) نامیده می‌شود، نمودار فشار-زمان با شیب کمتری کاهش می‌یابد که بستگی به نفوذپذیری سنگ دارد. زمانی که فشار به σ_H رسید، شکستگی کاملاً بسته می‌شود و سیال تنها می‌تواند از دیواره چاه به مخزن نفوذ کند که سطح کوچک تری نسبت به شکستگی دارد. این نقطه که فشار بسته شدن (P_c) نامیده می‌شود از نظر تئوری برابر با σ_H است [۱]. فرایند تحت فشار قرار دادن سنگ و برداشتن ^(۱۴) فشار، چندین بار و با حفظ همان میزان جریان، تکرار می‌شود. سپس، مقدار تنش‌های اصلی ^(۱۵) از قرائت‌های مختلف فشار، محاسبه می‌شود (شکل ۳) [۴]. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود تفاوت اصلی بین چرخه اول و دوم این است که فشار مورد نیاز برای بازگشایی مجدد شکستگی (P_r) به اندازه مقاومت کششی سنگ، کمتر از فشار گسیختگی است [۱]. شکستگی همیشه در جهتی که نیاز به کم‌ترین انرژی دارد باز می‌شود؛ که این جهت تنش بر جای حداقل است. شکستگی عمود بر راستای باز شدن خود گسترش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان جهت تنش‌های برجا را به دست آورد.

| | | | |
|--|-------------------------|--|------------------------------------|
| 1-Undrained | 2-Drained | 3-Block cave mining (hydraulic pre-conditioning) | |
| 4-Geothermal energy (hot dry rock, or enhanced geothermal) | | 5-CO ₂ sequestration | 6-Coal bed methane development |
| 7-Coal mine methane drainage | 8-Rock burst mitigation | 9-Cutting reinjection | 10-Minifraccking |
| 11-Microfracking | 12-Shut-in | 13-Instantaneous shut-in in pressure | 14-Pressurization/depressurization |
| | | | 15-Principal stress |



شکل ۴- نمودار فشار-زمان برای تعیین مقدار تنش بر جای حداقل [۱].

۳-۲- تولید نفت و گاز از مخازن

شکافت هیدرولیکی از سال‌ها پیش در صنعت نفت و گاز برای تحریک مخازن متعارف مواد هیدروکربوری، استفاده شده است. تاکنون حدود ۲/۵ میلیون عملیات شکافت هیدرولیکی در سراسر جهان انجام شده است. برخی معتقدند که حدود ۶۰٪ از تمام چاه‌های حفر شده امروزی شکسته می‌شوند. پس واضح است که شکافت هیدرولیکی ابزار مهمی است که در صنعت نفت و گاز دنیا و نه فقط در زمینه‌های نوین مخازن نامتعارف، استفاده می‌شود. تحریک^(۱) شکافت در این صنعت به‌طور معمول با استفاده از سیال اختصاصی و حاوی مواد افزودنی، انجام می‌شود. مهم‌ترین نقش این مواد افزودنی، افزایش ظرفیت حمل پروپانت^(۲) (پروپانت‌ها به مواد جامد، معمولاً ماسه و یا دست‌ساز) اطلاق می‌شود که برای باز نگه داشتن شکستگی تحریک شده در حین و بعد از عملیات شکافت هیدرولیکی استفاده می‌شود (توسط سیال است). پس از ایجاد شکستگی با هندسه دلخواه، برای باز نگه داشتن شکستگی‌ها ماسه (پروپانت) تزریق می‌شود. نوع، اندازه و مقدار ماسه، بر اساس تنش بسته شدن^(۳) و قابلیت هدایت^(۴) شکستگی برای دستیابی به اثرگذاری مورد نظر عملیات تحریک، تعیین می‌شود. چون سازندگی که

$$P_b = -\sigma_H + 3\sigma_h + T \quad (7)$$

$$P_r = -\sigma_H + 3\sigma_h \quad (8)$$

$$P_p = \sigma_h + \Delta P_K + \Delta P_P \quad (9)$$

$$ISIP = \sigma_h + \delta P \quad (10)$$

$$P_c = \sigma_h \quad (11)$$

که ΔP_K مقاومت چسبندگی ماده، ΔP_P افت فشار درون شکستگی و δP فشار اضافی مورد نیاز برای باز نگه داشتن شکستگی پس از توقف عملیات تزریق هستند.

در این عملیات، به‌طور معمول فقط آب استفاده می‌شود و فشار حداکثر ۴۰ مگاپاسگال است، اما می‌تواند تا مقدار ۱۰۰ مگاپاسگال بالا رود. نرخ جریان در حدود ۱ لیتر در هر دقیقه و حجم کل پمپاژ در هر شکستگی به‌طور معمول کمتر از ۱۰۰ لیتر است. آزمایش اندازه‌گیری تنش، در چاه‌های نفت و گاز نیز انجام می‌شود. در این حالت نرخ و حجم سیال تزریق شده بسیار بزرگ‌تر است. به عنوان مثال، تجهیزات موجود سرچاهی، دارای حداقل نرخ جریان ۴۰ تا ۱۶۰ لیتر در دقیقه هستند [۳].

1-Stimulation

2-Proppant

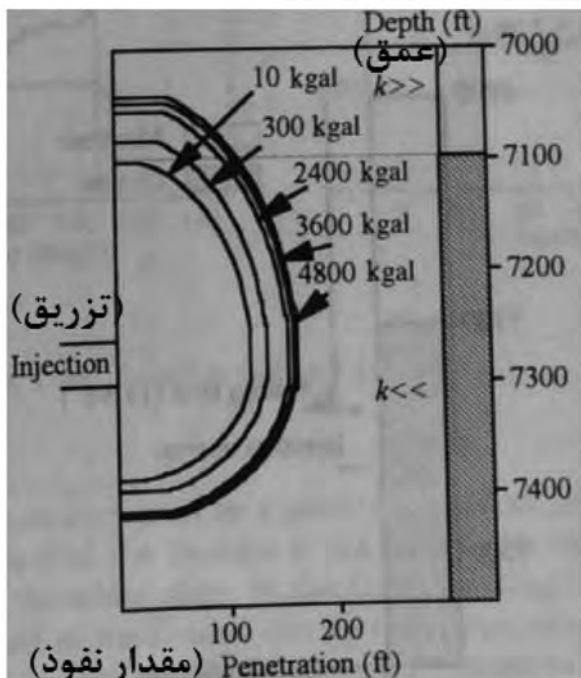
3-Closure

4-Conductivity

شکستگی حاصل از این مشبککاری‌ها به تنش‌های برجای زمین و فشار تزریقی بستگی دارد، بنابراین بایستی جهت حفر چاه و مشبککاری‌ها به صورت بهینه طراحی شوند؛ زیرا در غیر این صورت، ایجاد هندسه پیچیده شکستگی در نزدیکی چاه می‌تواند موجب شکست عملیات شود.

۳-۳- تزریق مجدد خرده‌های حفاری (CRI)^(۲)

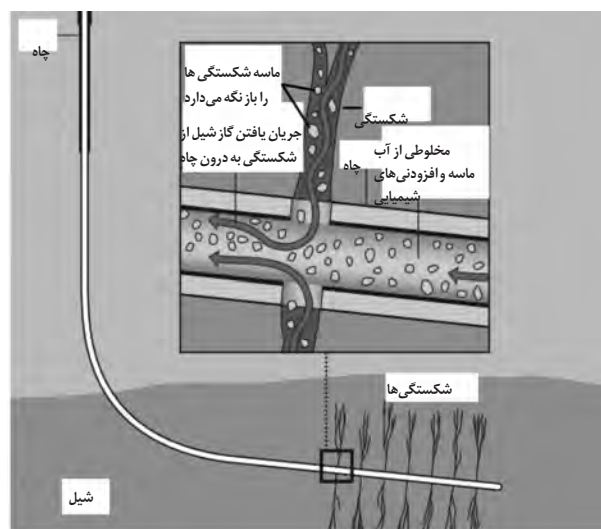
در برخی کشورها قوانین بسیار سختی برای نحوه دفع خرده‌های حفاری دارای گل حفاری بر پایه نفت در درون دریا اتخاذ شده است؛ زیرا که در برخی مواقع (مخصوصاً وقتی چاه از شیل‌ها عبور می‌کند) استفاده از گل حفاری بر پایه آب امکان‌پذیر نیست. چندین راه‌حل برای برطرف کردن این مسئله زیست‌محیطی ارائه شده است. اولین راه‌حل، حمل و انجام عملیات سطحی برای دفع این مواد در زمین است. همچنین استفاده از گل مناسب برای محیط زیست (برای مثال گل بر پایه استر) بررسی شده است اما هزینه بسیار بالایی دارد. راه جایگزین ارائه شده در اینجا، تزریق مجدد این خرده‌ها از طریق عملیات شکافت هیدرولیکی به سازندهای زیرزمینی است. با توجه به حجم



شکل ۶- گسترش شکستگی هیدرولیکی از لایه نفوذناپذیر به یک لایه نفوذپذیر [۱]

قرار است عملیات شکافت هیدرولیکی در آن انجام شود نفوذپذیر است، به منظور توسعه فشار در منطقه عملیات، نرخ جریان تزریق بسیار بالایی، لازم است. مادامی‌که مقاومت در برابر جریان در سازند افزایش می‌یابد، فشار در چاه به مقداری بیش از فشار شکست سازند، افزایش می‌یابد که موجب باز شدن چاه می‌شود. هنگامی‌که سازند گسیخته شود، شکستگی ایجاد می‌شود و سیال شروع به حرکت در شکستگی می‌کند. فشار تزریق به طور معمول در محدوده ۴۰ مگاپاسگال است، اما می‌تواند تا مقدار ۱۴۰ مگاپاسگال نیز بالا رود. معمولاً حجم کل سیال تزریق شده بیشتر از یک میلیون لیتر (۱۰۶ لیتر) است [۳].

در طول سه دهه گذشته، استخراج هیدروکربورها از مخازن نامتعارف^(۱) شیل‌گازی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این ذخایر که میلیون‌ها سال پیش تشکیل شده‌اند، به عنوان سنگ منشأ مواد هیدروکربوری شناخته می‌شوند [۶]. به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین این ذخایر برای تولید اقتصادی از آنها، باید از عملیات شکافت هیدرولیکی به همراه حفاری افقی استفاده کرد (شکل ۵). در نتیجه، مکانیزم‌های طبیعی نمی‌تواند پاسخگوی تولید اقتصادی از این ذخایر باشد. پس از حفر چاه به صورت افقی در سازند شیلی و نصب لوله جداری، عملیات مشبککاری برای ارتباط چاه با سازند اجرا می‌شود [۷]. با فرض همگن بودن مخزن، هندسه



شکل ۵- شکافت هیدرولیکی در مخازن شیل‌گازی توسط حفر چاه‌های افقی [۱۰]

بالای تزریق (چند هزار مترمکعب)، کنترل گسترش شکستگی هم از لحاظ حفظ یکپارچگی مخزن و هم از لحاظ زیست محیطی ضرورت دارد.

به طور کلی عملیات شکافت هیدرولیکی (برای تحریک مخزن) در سنگ های نفوذپذیر اجرا می شود و شکستگی به لطف اختلاف تنش مناسب بین مخزن و لایه های دربرگیرنده، درون لایه هدف گسترش می یابد. در مقابل، تزریق مجدد خرده های حفاری هم شامل گسترش شکستگی هیدرولیکی در یک سازند نفوذناپذیر و هم شامل گسترش شکستگی در لایه های دربرگیرنده نفوذپذیر (اغلب ماسه سنگ) است. در اینجا به دلیل اختلاف تنش نه چندان زیاد بین سازندهای نفوذناپذیر و نفوذپذیر، شکستگی می تواند به درون سازند نفوذپذیر گسترش یابد.

مثالی از یک عملیات تزریق خرده های حفاری به یک سازند نفوذناپذیر در شکل مشاهده می شود. عملیات تزریق در عمق ۷۳۰۰ فوتی انجام می شود و شکستگی عمدتاً به سمت بالا گسترش می یابد (به دلیل اینکه گرادیان تنش تقریباً ثابت است). به دلیل نفوذپذیری کم ناحیه تزریق شکستگی به سرعت به فصل مشترک می رسد (برای حجم تزریق تقریبی ۱۰۰۰۰ گالن) و به داخل سازند نفوذپذیر گسترش می یابد. اما با وجود حجم زیاد تزریق (چند میلیون گالن)، شکستگی به شکل عمیق در این لایه گسترش نمی یابد. در واقع، ۹۹ درصد از ۴۸۰۰ کیلو گالن تزریق شده، به صورت رطوبت از راه بخشی از شکستگی که در سازند نفوذپذیر قرار دارد، تراوش می کند. در نتیجه، گسترش قائم شکستگی سازند نفوذپذیر با نشست سیال کنترل می شود نه به وسیله اختلاف تنش های بین لایه ها [۱].

۳-۴- تولید انرژی زمین گرمایی

تولید انرژی زمین گرمایی پیشرفته (EGS) (۱) مستلزم تزریق آب در چاه، گرم شدن آب در زیر سطح زمین و استخراج همان آب به شکل بخار یا آب گرم، از چاه دوم است. شکافت هیدرولیکی برای ایجاد یک مسیر جریان بین چاه های تزریقی، استفاده می شود. مقدار عملیات شکافت در EGS، به فواصل چاه مورد نیاز برای رسیدن به انتقال حرارت مؤثر برای هر پروژه خاص

بستگی دارد. به طور معمول چاه های EGS، با تزریق در فشارهای پایین یا تنها بیش از مقدار تنش اصلی حداقل، تحریک می شوند. این امر باعث افزایش فشار در مخزن و ایجاد لغزش برشی در شکستگی های طبیعی موجود می شود [۳].

۳-۵- ذخیره سازی دی اکسید کربن

تزریق CO₂ به سازندهای زمین شناسی، به طور فزاینده ای در حال تبدیل شدن به یک روش عملی برای کاهش نرخ انتشار گازهای گلخانه ای (۲) است. از جمله سازندهای زمین شناسی مناسب در این مورد، مخازن نفت و گاز تخلیه شده (۳) و سفره های آب شور هستند. مطالعات زیادی برای توسعه این روش در کشورهای مختلف، در جریان است ولی هنوز هیچ عملیات اجرایی بزرگ مقیاس انجام نشده است. گفتنی است که نواحی هدف پیش گفته شده، مخازن نفوذپذیری بالایی دارند. پیش بینی می شود شکافت هیدرولیکی بتواند نقش درخوری در این صنعت ایفا کند. فرض بر این است که دامنه شکافت هیدرولیکی در اینجا، شبیه به مقیاس کار در مخازن نفت و گاز متعارف خواهد بود [۳].

۳-۶- توسعه متان از لایه های زغال سنگ

شکافت هیدرولیکی برای استخراج متان از لایه های زغال سنگ (CBM) (۴)، به روشی کم و بیش مشابه با آنچه در چاه های نفت و گاز متعارف انجام می شود، صورت می گیرد. تفاوت عمده شامل موارد زیر است: مقیاس عملیات در مخازن CBM کوچک تر است حجم سیال شکافت و مقدار مواد افزودنی به سیال شکافت کمتر است. محل عملیات به طور معمول نزدیک تر به سطح زمین است و در نتیجه نیاز به فشارهای کمتری دارد، در اینجا، فشار شکستگی تا ۳۵ پاسگال بالا می رود و حجم کل سیال تزریق شده در هر شکستگی تا ۵۰۰ هزار لیتر است [۳].

۳-۷- زهکشی متان از معادن زغال سنگ

هدف از زهکشی متان از معادن زغال سنگ (CMM) (۵)، کاهش محتوای متان زغال سنگ قبل از معدنکاری است. این عمل به دلیل ایمنی بیشتر و همچنین مسائل زیست محیطی و نیز با

1-Enhanced geothermal energy production

2-Greenhouse gas

3-Depleted

4-Coal bed methane

5-Coal Mine methane

هدف کسب در آمد اضافی، انجام می‌شود. شکافت هیدرولیکی برای افزایش تولید گاز متان از زغال سنگ، همراه و بدون پروپانت، صورت می‌گیرد. این عملیات هم از گمانه‌های قائم و هم افقی، توسط گمانه‌های حفر شده در رگه، انجام می‌شود. مقیاس عملیات در اینجا دامنه گسترده‌ای دارد، اما به طور معمول کوچک‌تر از عملیات تحریریک CBM است، به خصوص اگر از زیرزمین انجام شده باشد [۳].

۳-۸- کاستن خطر انفجار سنگ

جلوگیری از انفجار سنگ، حوزه به نسبت جدیدی از کاربردهای شکافت هیدرولیکی است. این روش در مرحله ارزیابی اولیه بوده و تاکنون هیچ کاربرد بزرگ مقیاسی نداشته است. در اینجا، شکافت هیدرولیکی به عنوان وسیله‌ای است که تعداد و شدت حوادث انفجار سنگ را با کاهش تنش برجای سنگ، کاهش می‌دهد. به طور معمول چنین کاری در گمانه‌هایی با قطر کوچک و دارای فشار بالا، اما با نرخ‌های کم جریان، انجام می‌شود. این حالت شبیه به مواردی است که در عملیات اندازه‌گیری تنش پیش می‌آید، با این تفاوت که در اینجا تلاش بیشتری برای گسترش شکستگی می‌شود [۳].

۳-۹- افزایش تولید از چاه‌های آب

شکافت هیدرولیکی به مدت طولانی به عنوان روشی برای بهبود عملکرد چاه‌ها، در سفره‌های آب واقع در سنگ‌های شکسته، استفاده می‌شده است. این روش به طور گسترده‌ای در بسیاری از مناطق ایالات متحده آمریکا و کشورهای دیگری مثل هند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکافت هیدرولیکی چاه‌های آب که اغلب به عنوان هیدروفراک (۱) نیز نامیده می‌شود، یک بخشی از چاه با استفاده از پکرها (۲) جدا و آب برای تولید فشار تا حدود ۲۰ مگاپاسگال جهت شستن شکستگی‌های موجود و گسترش آنها، و برقراری ارتباط با دیگر شکستگی‌های درون سفره، تزریق می‌شود. از آنجا که فشار اعمال شده در این موارد محدود است، جای تردید است که این عملیات بتواند شکستگی جدیدی را در سنگ تولید کند؛ هر چند ممکن است در برخی شرایط این امر اتفاق بیفتد. حجم آب

تزریق شده به هر شکستگی به طور معمول کمتر از ۱۰۰۰ لیتر است. در این عملیات، به طور معمول از هیچ ماده افزودنی در آب تزریق شده، استفاده نمی‌شود [۳].

۳-۱۰- معدنکاری تخریب بزرگ

تخریب بزرگ یک روش استخراج زیرزمینی است که در آن استخراج سنگ معدن تا حد زیادی بستگی به عملکرد گرانشی دارد. به این منظور چاه‌های قائم (۳) و گالری‌های افقی (۴) تا زیر ماده معدنی حفر می‌شوند و یک لایه تقریباً نازک افقی از سنگ‌های نگه‌دارنده (۵) (باربر) فوقانی، با استفاده از روش استخراج استاندارد، برداشته می‌شود. برداشتن این لایه نگه‌دارنده اجازه می‌دهد تا سنگ معدن، به سبب وزن خود و نیروی گرانش، به داخل گالری تخریب شود. در این روش، در صورتی که با یک توده بزرگ از ماده معدنی بدون شکستگی روبه‌رو باشیم، نیاز به نوعی پیش آماده‌سازی، برای کوچک کردن قطعات تخریب شده، داریم. یکی از روش‌های رایج در این مورد، پیش آماده‌سازی هیدرولیکی، یا انجام شکافت هیدرولیکی در گمانه‌های حفر شده در ماده معدنی است. در اینجا فشار شکست می‌تواند تا ۱۰ هزار Psi باشد و حجم آب پمپاژ شده به طور معمول حدود ۴ تا ۵ هزار لیتر برای هر شکستگی است. این مقدار می‌تواند، بسته به اندازه پمپ و پاسخ فشار، بسیار بزرگ‌تر نیز باشد [۳].

۳-۱۱- تحلیل یکپارچگی چاه

تحلیل یکپارچگی چاه در عملیات حفاری، یکی دیگر از کاربردهای آبشکافت است و برای جلوگیری از گسترش شکستگی‌های نزدیک چاه که می‌تواند منجر به فرار سیال حفاری به سازند، استفاده می‌شود. در جدول ۲ کاربردهای مختلف شکافت هیدرولیکی از نظر مقیاس؛ یعنی میزان حجم سیال تزریق شده، وجود مواد افزودنی و پروپانت، مقدار فشارهای متداول شکست و غیره؛ با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۲- مقایسه کاربردهای مختلف شکافت هیدرولیکی [۳]

| کاربردها | حجم تزریق (لیتر) | مواد افزودنی | پروپانته | فشار (MPa) | پدیده گسترش شکستگی | شکست واقعی |
|-------------------------------|--------------------|--------------|-----------|------------|--------------------|------------|
| نفت و گاز متراکم | ۱۰ ^۶ | دارد | دارد | تا ۱۰۰ | دارد | دارد |
| چاه‌های آب | < ۱۰ ^۳ | ندارد | در مواردی | < ۲۰ | دارد | کم |
| معدنکاری تخریبی | ۱۰ ^۴ | ندارد | در مواردی | < ۷۰ | < ۱۰۰ | دارد |
| تعیین تنش سنگ | < ۱۰ ^۳ | ندارد | ندارد | < ۱۰۰ | تا حدودی | دارد |
| مخازن نفت و گاز متعارف | ۱۰ ^۶ | دارد | دارد | تا ۱۰۰ | دارد | دارد |
| انرژی زمین گرمایی | ۱۰ ^۷ | دارد | دارد | تا ۱۰۰ | دارد | دارد |
| محبوس کردن CO ₂ | ۱۰ ^۶ | دارد | دارد | تا ۷۰ | دارد | دارد |
| توسعه متان لایه‌های زغال سنگی | < ۵۱۰ ^۵ | در مواردی | دارد | < ۳۵ | دارد | دارد |
| زهکشی متان معادن زغال سنگ | ۱۰ ^۴ | در مواردی | در مواردی | < ۳۵ | دارد | دارد |
| جلوگیری از انفجار سنگ | < ۱۰ ^۳ | ندارد | ندارد | < ۱۰۰ | تا حدودی | دارد |

۴- شبیه سازی شکافت هیدرولیکی

با وجود مزایایی که شکافت هیدرولیکی دارد، در زمان انجام عملیات ممکن است حوادث ناخواسته‌ای پیش بیاید. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی، به دلیل گسترش بیش از مقدار پیش بینی شده شکستگی‌ها؛ لغزش گسل‌ها و رخ دادن زمین لرزه‌ها، به دلیل تزریق حجم زیادی از سیال پرفشار در زمان اجرای عملیات؛ یا مشکلات دیگری که به دلیل تعیین نادرست پارامترهای ورودی برای طراحی رخ می‌دهد. برای مثال در عملیات شکافت هیدرولیکی در یک چاه جداره دار به منظور تحریک تولید از مخزن، اگر به طور صحیح جهت تنش‌های برجا تعیین نشوند، ممکن است سوراخ کردن و مشبک‌کاری لوله جداره که برای ورود مواد نفتی به چاه ایجاد می‌شود، در جهت نامناسب صورت گیرد. این امر باعث بالا رفتن فشار شروع، گسترش شکست، چرخیدن^(۱) شکستگی‌ها و همچنین توقف زودرس و ناخواسته عملیات می‌شود [۱۱ و ۱۲].

با توجه به این نکات، قبل از عملیات شکافت هیدرولیکی باید برآورد صحیحی از مواردی چون حجم و قدرت پمپ مورد نیاز

برای ایجاد شکستگی‌هایی با هندسه دلخواه؛ میزان و نوع مواد افزودنی به سیال برای باز نگه داشتن شکستگی‌ها پس از متوقف کردن عملیات؛ جهت صحیح مشبک‌کاری‌ها برای به حداقل رساندن فشار شروع و گسترش شکست و همچنین کاهش انحنای شکستگی‌ها، انجام شود. این موارد، با انجام آزمایش‌های تجربی، تحلیل‌های ریاضی و روش‌های عددی، قبل از انجام شدن عملیات واقعی، امکان پذیر است. توسعه اولیه عملیات شکافت هیدرولیکی مدیون مطالعات تجربی، از جمله تجربیات آزمایشگاهی و به‌کارگیری روش‌های سعی و خطا در عملیات آبشکافت، بوده است. البته به دلیل مسائل اقتصادی و زیست محیطی و پیچیدگی زیاد این عملیات، ابزارهای تجربی به تنهایی اقل‌کننده نیستند.

برای رفع این مشکل از مدل‌های تحلیلی دوبعدی یا پیشرفته استفاده می‌شود. اغلب مدل‌های تحلیلی دوبعدی، شکستگی‌های ناشی از شکافت هیدرولیکی را قائم در نظر گرفته‌اند. این مدل‌ها پایه بیشتر مدل‌های تحلیلی و عددی هستند که بعدها توسعه یافته‌اند. در مدل سازی عملیات شکافت

1-Tortuosity

هیدرولیکی، تعامل بین چهار پدیده مختلف: تغییر شکل محیط متخلخل^(۱)، جریان سیال از منافذ^(۲)، جریان سیال از شکستگی‌ها^(۳)، نحوه شروع و گسترش شکستگی^(۴)، مورد توجه قرار می‌گیرد [۷].

۵- نتیجه‌گیری

عملیات شکافت هیدرولیکی عملیاتی است که از زمان اولین اجرای آن تا زمان حال، به دلیل اهمیت و کاربردهای متنوع در صنایع مختلف، همواره مورد توجه محققان بوده است و پیشرفت‌های زیادی داشته است. کاربردهای متعدد این عملیات

از لحاظ مقیاس کار و سایر مشخصات و تجهیزات مورد نیاز ممکن است در سطح و زیرزمین با یکدیگر تفاوت داشته باشند. به دلایل متعددی قبل از عملیات باید یک پیش‌بینی از نحوه شروع و گسترش شکستگی هیدرولیکی داشته باشیم. این پیش‌بینی می‌تواند از آزمایش‌های تجربی، مدل‌های تحلیلی و عددی حاصل شود. از زمان ارائه اولین مدل‌های تحلیلی برای هندسه شکست هیدرولیکی در اواسط قرن بیستم، مدل‌های تحلیلی و عددی بسیاری با وارد کردن شرایط مختلف به مسئله، برای نزدیک شدن به فیزیک واقعی آن، ارائه شده‌اند.

منابع

- [۱] Charlez, P. A. (1997). Rock mechanics: petroleum applications, Editions Technip.
- [۲] Adachi, J., Siebrits, E., Peirce, A., and Desroches, J. (2007). Computer Simulation of Hydraulic Fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 44, No. 5, PP. 739-57.
- [۳] Adams, J. and Rowe, C. (2013). Differentiating Applications of Hydraulic Fracturing, (eds), ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing.
- [۴] Haimson, B. C. and Lee, M. Y. (1984). Development of a Wireline Hydrofracturing Technique and its Use at a Site of Induced Seismicity, The 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, New York, NY, PP. 194-203.
- [۵] Economides, M. J. (2011). Hydraulic Fracturing: The State of the Art, <http://www.energytribune.com/8672/hydraulic-fracturing-the-state-of-the-art-2#sthash.MoYiPsBI.BbXUZ9rF.dpbs>.
- [۶] Grujicic, M., Yavari, R., Ramaswami, S., Snipes, J. S., and Galgalikar, R. (2014). Computational Engineering Analysis of the Hydraulic-Fracturing Process, Advances in Energy Engineering (AEE), Vol. 2, PP. 37-51.
- [۷] Haddad, M. and Sepehri, K. (2014). Cohesive Fracture Analysis to Model Multiple-Stage Fracturing in Quasibrittle Shale Formations, (eds), 2014 SIMULIA Community Conference, Providence, Rhode Island, USA, PP. 506-520.
- [۸] Zoback, M. D. (2007). Reservoir geomechanics, Cambridge University Press.
- [۹] Zielonka, M. G., Searles, K. H., Ning, J., and Buechler, S. R. (2014). Development and Validation of Fully-Coupled Hydraulic Fracturing Simulation Capabilities, (eds), SIMULIA Community Conference, SCC2014, Providence, Rhode Island.
- [۱۰] Mair, R., Bickle, M., Goodman, D., Koppelman, B., Roberts, J., Selley, R., et al. (2012). Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing.
- [۱۱] Zoback, M. D. and Arent, D. J. (2014) Shale Gas Development: Opportunities and Challenges. *The Bridge*. 16-23.
- [۱۲] Sepehri, J. (2014). Application of Extended Finite Element Method (XFEM) to simulate hydraulic fracture propagation from oriented perforations, Texas Tech University.