

## مقدمه‌ای بر شکافت سازند با گاز (High Energy Gas Fracturing)

◀ مهدی علیپور\*

### چکیده:

روش‌های مختلف انگیزش چاه (Well Stimulation) شامل تزریق اسید و انواع حلال‌ها، شکافت هیدرولیکی و انفجار در ته چاه و ... با اهدافی نظیر برطرف نمودن ضایعات ناشی از حفاری به اطراف چاه و افزایش تراوایی در سازندهای کم تراوا و ... در صنعت نفت به کار می‌روند.

بسته به شرایط جغرافیایی، مخزنی و اقتصادی یکی از این روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنیک شکافت با گاز به دلیل ارزانی، عملیات ساده، خسارت اندک به ته چاه و امکان اجرای آن در نقاط دوردست اکتشافی، قریب به ۵۰ سال پیش در آمریکا و شوروی سابق آغاز شده و تاکنون به دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. شاید یکی از جذاب‌ترین مزایای این تکنیک، استفاده از آن در مخازن شکافدار باشد. در این مقاله مکانیزم تکنیک شکافت با گاز و کاربرد آن در صنعت نفت مورد بررسی قرار گرفته است.

### کلمات کلیدی:

انگیزش چاه، شکافت با گاز، شکافت با پالس متناسب، شکافت هیدرولیکی، پروپیلانت.

### مقدمه

روش‌های مختلف انگیزش چاه (Well Stimulation) شامل تزریق اسید و انواع حلال‌ها، شکافت هیدرولیکی و انفجار در ته چاه با اهدافی نظیر برطرف نمودن ضایعات ناشی از حفاری به اطراف چاه و افزایش تراوایی در سازندهای کم تراوا و ... در صنعت نفت به کار می‌روند. اگر چه این تکنیک‌ها همه روزه به طور وسیعی در دنیا به کار می‌روند اما در اجرا، محدودیت‌هایی نیز دارند که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

### • تزریق اسید:

ممکن است باعث بسته شدن خلل و فرج، بخصوص در سازندهای ماسه‌ای شود. شکافت با اسید نیز ممکن است باعث توسعه شکاف به زون‌های بالاتری و پائینی (آبی) شده و مشکلاتی را ایجاد نماید.

### • روش انفجار:

شکافت‌های چند شاخه‌ای شعاعی ایجاد می‌کند اما محدود به چاه‌های بدون لوله جدار می‌باشد و چون معمولاً فشار ایجاد شده از نقطه تسلیم سنگ بیشتر است خسارت‌هایی به حفره چاه

و احتمالاً تراوایی اطراف آن وارد می‌کند.

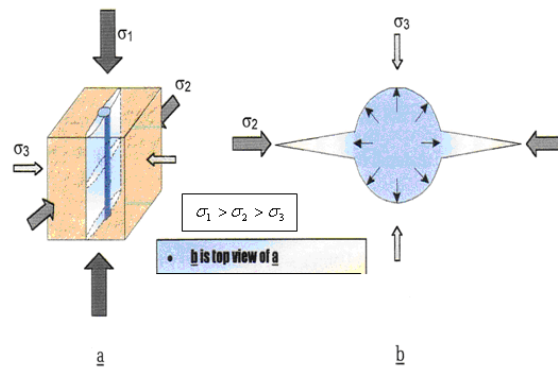
### • شکافت هیدرولیکی:

معمولاً گران هستند و برای چاه‌های با دبی بالا کاربرد بیشتری دارند. در این روش شکافت‌های ایجاد شده دارای یک جهت هستند که توسط استرس منطقه کنترل می‌شوند. (شکل-۱) تکنیک شکافت با گاز به دلیل ارزانی، عملیات ساده، خسارت اندک به ته چاه و امکان اجرای آن در نقاط دور دست اکتشافی، از سال ۱۹۵۶ در آمریکا و شوروی سابق آغاز شده و تاکنون به دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. در چین تاکنون بیش از سه هزار عملیات شکافت با گاز انجام شده که حدود ۹۸٪ آنها در اجرا و ۸۵ تا ۷۰ درصد در افزایش ضریب بهره‌دهی چاه‌ها موفقیت‌آمیز بوده است. (شکل-۲)

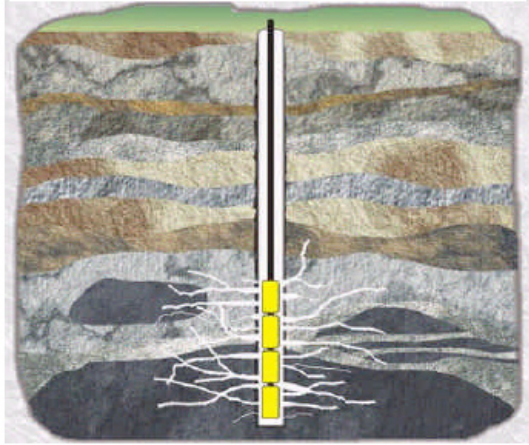
### کاربرد تکنیک

شکافت با گاز در صنعت به نام‌های «شکافت با پالس کنترل شده» (Controlled Puls Fracturing)، «شکافت با پالس متناسب» (Tailored Pulse Fracturing) و یا «شکافت با گاز پر انرژی» (High Energy Gas Fracturing) شناخته شده است.

شکل-۱: شماتیک وضعیت استرس زمین و هندسه شکاف



شکل-۲: شماتیک ایجاد شکاف شعاعی با گاز



به طور کلی کاربرد شکافت با گاز در بخش‌های مختلف مخزن به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

- ۱- چاه‌های اکتشافی؛
- ۲- بر طرف نمودن ضایعات اطراف چاه تولیدی؛
- ۳- بهبود تزریق پذیری چاه‌ها؛
- ۴- به عنوان عملیات آماده‌سازی انگیزش (Stimulation) به روش شکافت هیدرولیکی و اسیدکاری؛
- ۵- انگیزش بخش‌های خاصی از مخزن (Selective Stimulation)؛
- ۶- انگیزش سازندهایی که شکاف‌های طبیعی در آن توسعه یافته است؛
- ۷- کاربرد در سازندهایی که به آب یا اسید حساس می‌باشند؛
- ۸- امکان‌پذیری در هر نوع منطقه جغرافیایی، صحرایی، دریایی و ...

در سازندهای لایه‌ای با ضخامت اندک کنترل رشد شکاف اهمیت به سزائی دارد. به خصوص وقتی صحبت از هجوم آب و یا عبور از پوش سنگ مطرح باشد. این مسئله باعث شده تا تکنیک شکافت با گاز در افزایش تزریق پذیری چاه‌ها در مخازن ذخیره‌سازی گاز مورد توجه ویژه قرار گیرد. شاید یکی از جذاب‌ترین مزایای این تکنیک، استفاده از آن در مخازن شکافدار باشد.

علاوه بر مشکلاتی که جهت انجام عملیات موفق شکافت هیدرولیکی در مخازن شکافدار وجود دارد، در این روش معمولاً دو شکاف (که توسط تنش برجا در زمین کنترل می‌گردد، شکل-۱) ایجاد می‌شود که ممکن است با سیستم شکاف‌های موجود در مخزن موازی بوده و عملاً تغییر زیادی در بهره‌دهی چاه‌ها مشاهده نگردد.

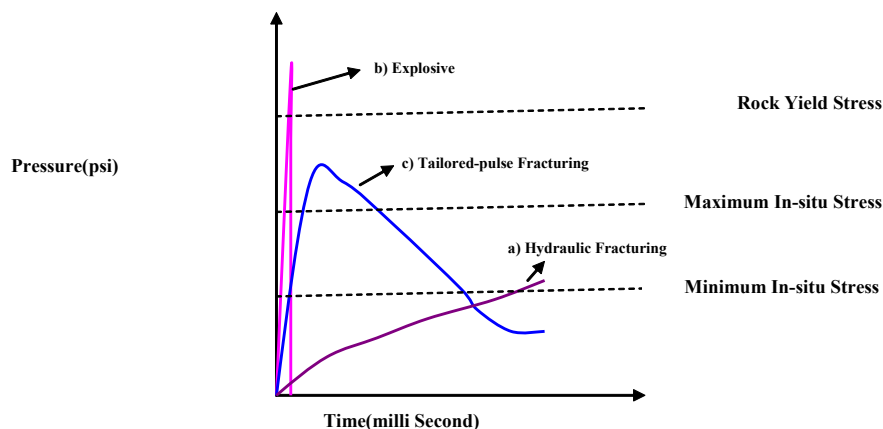
این پروسه در سه فاز قابل بررسی است:

- ۱- افزایش فشار در ته چاه؛
- ۲- شکست نقاط ضعیف؛
- ۳- گسترش شکاف.

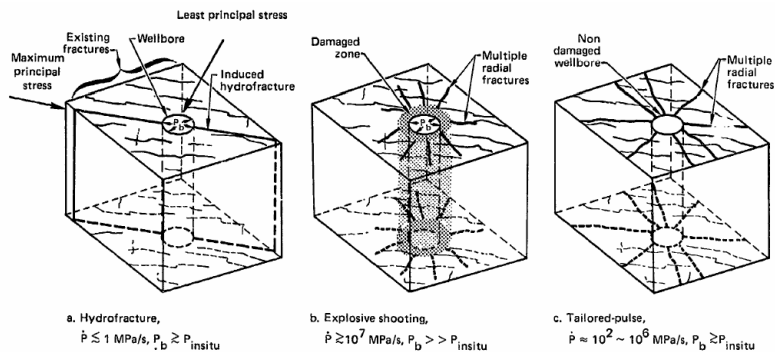
#### فاز اول: افزایش فشار در ته چاه

در اثر سوختن بسیار سریع (Detonation) ماده سوختنی حجم متنابهی از گاز و حرارت ایجاد می‌شود. با توجه به بسته بودن درون چاه، گاز حاصله فشار زیادی در زمانی بسیار کوتاه ایجاد می‌کند. (شکل-۳) در این مرحله نفوذ فشار (Pressure Diffusion) و تغییر شکل سازند اتفاق می‌افتد و ممکن است با ایجاد شکاف‌های مویی نیز همراه باشد.

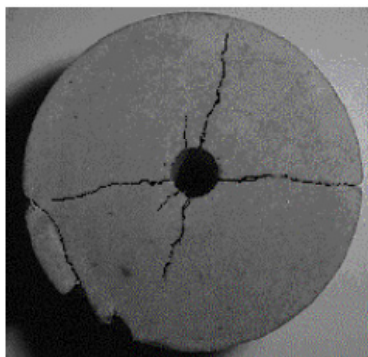
شکل-۳: شماتیک نرخ افزایش فشار در روش‌های مختلف انگیزش چاه



شکل-۴: شماتیک انگیزش چاه در مخازن شکافدار



شکل-۵: شکاف شعاعی در یک نمونه آزمایشگاهی



### فاز دوم: شکست نقاط ضعیف

چنانچه ماکزیمم فشار ایجاد شده بیشتر از فشار شکست سنگ باشد، پروسه شکافت سنگ آغاز می‌شود. شکاف‌های ایجاد شده کوتاه بوده و معمولاً به طور مستقل گسترش می‌یابد.

### فاز سوم: گسترش شکاف

این مرحله با گسترش شکاف به درون سازند همراه است. با گسترش شکاف، سطوح جدیدی برای نفوذ گاز تولید شده ایجاد می‌شود و در نتیجه فشار گاز و به تبع آن رشد شکاف (Fracture Growth) در اطراف چاه متوقف می‌گردد.

شکافت با گاز همانند شکافت هیدرولیکی ضریب بهره دهی چاه را افزایش می‌دهد به علاوه حرارت زیادی در حین عملیات تولید می‌شود که باعث ذوب شدن آسفالت، پارافین و سایر مواد جامد و در نتیجه باز شدن خلل و فرج و بهبود تراوانی اطراف چاه را در پی خواهد داشت.

در این تکنیک هدف ایجاد شکاف‌های شعاعی در اطراف چاه با استفاده از فشار حاصل از سوختن گاز در ته چاه می‌باشد. شکاف‌های شعاعی در چندین جهت و در اندازه‌های متفاوت تشکیل می‌شود؛ تعداد شکاف‌ها معمولاً ۶-۴ و به طول ۵-۳ متر برآورد می‌شود.

برخلاف شکافت هیدرولیکی، نیازی به تزریق ماسه (Propant) برای باز نگاه داشتن شکاف‌های حاصله نمی‌باشد. تجربه آزمایشگاهی و عملی نشان می‌دهد که خرده سنگ‌های ریزی که در طی فرآیند ایجاد می‌شوند از بسته شدن شکاف‌ها جلوگیری می‌کنند.

در دنیا چندین اختراع ثبت شده (Patent) از این نوع تکنیک وجود دارد که مکانیزم عمل در همه یکسان بوده و تفاوت عمده آنها در نوع دستگاه (Tool) و خواص ماده سوختنی به کار گرفته می‌باشد.

فاکتور کلیدی در این تکنیک کنترل نرخ فشار ایجاد شده (Pressure Rising Rate) و حداکثر فشار حاصله (Peak Pressure) می‌باشد. حداکثر فشار ایجاد شده در روش انفجار در دامنه ۳۰۰ هزار تا ۳ میلیون پام قرار دارد که بسته به نوع مواد منفجره، نرخ افزایش فشار تا ۱۰۰ هزار پام در میکرو ثانیه بالغ می‌شود. سوختن پروپیلانت فشاری به نرخ ۵ تا ۱۰۰ پام در میکرو ثانیه و ماکزیمم ۴۰ هزار پام ایجاد می‌کند. (شکل-۲)

آزمایش‌های متعددی با هدف اولیه درک ارتباط بین الگوی شکاف شعاعی و افزایش بار (فشار) در این زمینه انجام شده است. اگر چه رابطه مشخصی بین الگوی شکاف با افزایش فشار وارده به دست نیامده، اما تقریباً در تمام آزمایشات شکاف‌های چند شاخه‌ای شعاعی ایجاد شده است. (شکل-۵)

یکی از نکاتی که در به‌کارگیری این روش باید مورد توجه قرار گیرد، امکان خسارت به لوله جداري چاه می‌باشد. جهت بررسی این امر چندین آزمایش ته‌چاهی صورت گرفته است. لاگ قطر چاه (Caliper) و اکوستیک قبل و بعد از شکافت با گاز نشان می‌دهد چنانچه پالس‌های فشار به دقت کنترل شود، خسارت قابل توجهی به لوله جداري و سیمان پشت لوله وارد نمی‌شود.

به طور کلی استفاده از این روش در سازندهای سخت نشده و با تراوایی بسیار بالا توصیه نمی‌شود.

### نتیجه‌گیری

اگرچه اسید کاری و احتمالاً شکافت هیدرولیکی سنگ در صنعت نفت کاربرد زیادی دارد اما تکنیک شکافت با گاز در شرایط خاص به مراتب نتایج بهتر و اقتصادی‌تر را پیش رو قرار می‌دهد. • تکنیک شکافت با گاز ارزان، با عملیات ساده، در نقاط دور دست اکتشافی و انواع چاه‌های تولیدی/ تزریقی، حفرة باز و با لوله جداري قابل اجرا بوده، خسارت اندک به ته چاه وارد می‌نماید. • امکان موفقیت اجرای این تکنیک در مخازن شکافدار نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است.

### مراجع:

1. A.O.Banahene: "Stimulating Oil and gas Wells With PGDBK Gas Generator", SPE# 71075.
2. David w.Yang: "Experimental Study on Fracture initiation by Pressure Pulses", 2000.
3. D.G. Krugman, "A Brittle Fracture Theory for understanding High Energy Gas Fracturing" SPE# 15680.
4. J.F.Schatz: "Laboratory, Computer Modeling and Field Studies of the Pulse Fracturing Process" SPE# 18866.
5. J.F. Cuderman: "A Propellant-Based Technology for Multiple Fracturing Wellbores To Enhance Gas Recovery: Application and Results in Devonian Shale". SPE# 12838.
6. Jerry F. Cuderman : "Multiple Fracturing Experiments-Propellant and Borehole Consideration" SPE# 10845.
7. R.P Swift : "Multiple Fracturing Of Boreholes Using Tailored-Pulse Loading" SPE# 9892.
8. Richard A. Schmidt, Norman R. Warpinski, "In situ Evaluation of Several Tailord-Pulse Well-Shooting Concepts", SPE# 8934, 1980
9. US Department of Energy, "New and Novel Fracture Stimulation Technologies for the Revitalization of Existing Gas Storage Wells", 1999.
10. Welyu Yang, «High Energy Gas Fracturing (HEGF) Technology: Research and Application», SPE# 24990.
11. Wenkui Li : « A Review of Gas Fractuing Technology» SPE # 58980.