



آزمایش نشت در حفاری چاه‌های نفت و گاز ایران

منصور زوید اوایان پور^۱ شرکت نفت و گاز اروندان | دکتر سید رضا شادی زاده^۲ دانشگاه صنعت نفت | ابوالفضل هاشمی^۳ شرکت نفت و گاز اروندان

چکیده

آزمایش نشت که آزمایش فشاری یکپارچگی نیز نامیده می‌شود، یک روش تشخیصی برای برآورد فشار شکاف در حفره‌های باز می‌باشد. این آزمایش مهم، بعد از سیمان کاری هر لوله جداری، برای حفاری ایمن حفره بعد و اطمینان از تحمل فشار وارده گل توسط کفشک انجام می‌گردد. آزمایش یاد شده، در تمامی مراحل عمر یک مخزن برای حفاری، بهره‌برداری، ازدیاد برداشت و حتی متروک شدن و تبدیل به مخازن ذخیره گاز، اطلاعات مفید و مؤثری ارائه می‌کند. هدف اصلی این مقاله، آشنایی با اهمیت انجام این آزمایش در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز در ایران است. در این مقاله بعد از معرفی انواع آزمایش‌های فشاری و یکپارچگی سازند، دستورالعمل انجام میدانی و جانمایی تجهیزات سطح‌الارضی ارائه خواهد شد. با توجه به پیشینه و کاربرد این آزمایش در صنعت بالادستی نفت، اهمیت این آزمایش و هم‌چنین دلایل اصلی عدم انجام آن، بحث و تشریح می‌شود. ضرورت آگاهی کلی صنعت حفاری و دیگر بخش‌های بالادستی نفت ایران با علم ژئومکانیک، از نتایج مهم این مقاله است.

واژه‌های کلیدی | آزمایش نشت، آزمایش یکپارچگی سازند، تنش کمینه افقی، آزمایش نشت تمديد یافته

◆ مقدمه

یکپارچگی چاه که یکی از آن‌ها آزمایش نشت است، پرداخته شده است. هم‌چنین با توجه به اهمیت وجود داده‌های تست نشت برای تصحیح مقادیر تنش کمینه افقی، متأسفانه در پروژه پژوهشی منبع ۴، مشکل نبود چنین داده‌هایی برای تصحیح مدل‌های ریاضی به کاررفته، موجود بوده است و در نتیجه می‌توان عدم قطعیت در مقادیر تنش کمینه افقی محاسبه شده را انتظار داشت.

در این مقاله ابتدا آزمایش نشت معرفی گردیده و مراحل مختلف آن طبق نمودار توضیح داده خواهد شد. هم‌چنین یک جانمایی از تجهیزات سطح‌الارضی برای این آزمایش نشان داده می‌شود. تشریح عوامل مؤثر بر فشار نشت نیز در مقاله آمده است. به دلیل بروز اشتباه بین آزمایش نشت

نتایج یک بررسی از چاه‌های حفاری شده در خلیج مکزیک نشان‌دهنده این است که ۲۷-۲۴ درصد از کل هزینه‌های حفاری، از وقایع زمان‌های غیرمولد ناشی می‌شود. بررسی موارد مربوط به زمان غیرمولد، نشان‌دهنده این است که تقریباً ۴۰ درصد از این هزینه‌ها مربوط به موارد ژئومکانیک است (مانند هرزروی^۵، ناپایداری چاه^۶، و غیره...)^[۱]. شناخت تنش‌های زمین^۷ که از بررسی‌های ژئومکانیکی حاصل می‌گردد، باعث تأثیر شگرفی در تصمیم‌های گرفته شده در تمامی مراحل توسعه مخزن، از طراحی چاه تا مرحله آخر ازدیاد برداشت^۸ می‌گردد. داشتن اطلاعات صحیح از این تنش‌ها، به‌ویژه تنش کمینه افقی^۹، برای پیش‌بینی و جلوگیری از مشکلات حفاری و به‌کارگیری روش‌های مناسب کنترل فوران، تکمیل چاه، بهره‌برداری بهینه، تزریق و غیره... لازم و ضروری است. روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری تنش کمینه افقی وجود دارد که عبارتند از: آزمایش‌های Mini Frac، حسگرهای فشاری درون چاهی^{۱۰}، آزمایش نشت^{۱۱} یا آزمایش‌های یکپارچگی فشاری کفشک جداری^{۱۲}. آزمایش‌های یکپارچگی فشاری برای تمامی کفشک‌های جداری لازم است. متأسفانه در ایران آزمایش نشت به‌ندرت انجام می‌شود، در نتیجه فرصت دست‌یابی به مقادیر تنش کمینه افقی، در همان ابتدای توسعه میدان از دست می‌رود. در منبع ۲ این مقاله به مشکلات عدم انجام آزمایش‌های

¹ Mansoor353@Yahoo.com

² Shadizadeh@Put.ac.ir

³ Abolfazl_Hashemi@Yahoo.com

⁴ Non-Productive Times

⁵ Lost circulation

⁶ Well bore instability

⁷ Earth stresses

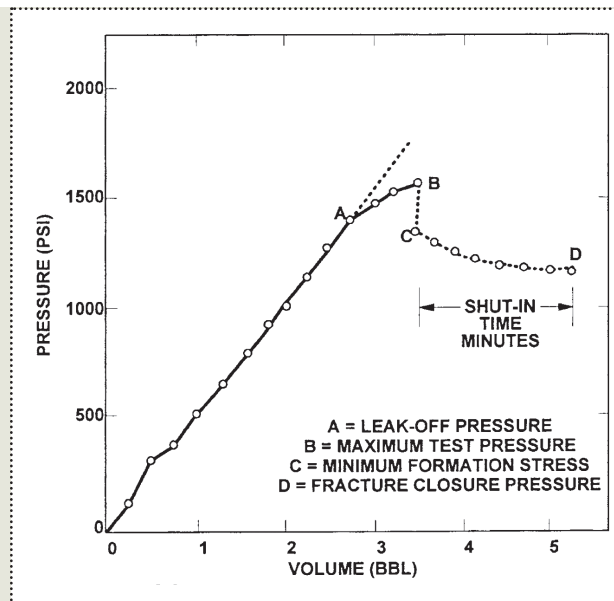
⁸ Tertiary recovery

⁹ Minimum horizontal stress (Sh)

¹⁰ Downhole pressure sensors

¹¹ Leak-off Test

¹² Casing shoe pressure integrity



۱ | یک نمودار از آزمایش فشار یکپارچه [۳]

تثبیت شده‌ای در سازند به وجود آمده است. در زمان باز شدن شکاف، گل وارد شکاف شده و قسمت جامد^{۱۳} آن در سطوح نفوذپذیر شکاف نفوذ می‌کند. این هرزروی با پمپ بیش تر سیال، فشار را به میزان کمی افزایش خواهد داد و به نوبه خود باعث تغییر زاویه نمودار می‌شود. شکل ۱، نشان دهنده افزایش فشار تثبیت شده پمپ بین نقاط A و B است. این افزایش فشار که در اغلب آزمایش‌های نشست معمول می‌باشد، نشان دهنده رشد ثابت شکاف است. این رشد ثابت به دلیل هرزروی فشار و سیال در امتداد طول شکاف در حال رشد می‌باشد. به رغم افزایش فشار در سطح، فشار در نوک^{۱۴} شکاف، مساوی فشار کمینه انتشار شکاف^{۱۵} خواهد بود. برای آغاز رشد غیر ثابت شکاف یا بروز شکست^{۱۶}، افزایش فشار در نوک شکاف لازم است. به منظور تحقق این امر، پمپ مقدار کافی سیال برای غلبه بر هرزروی و انتقال بیش تر فشار به نوک شکاف، (وقتی که کم بودن فشار و هرزروی سیال)، ضروری است.

- ¹³ Extended leak-off test
- ¹⁴ Kick pressure
- ¹⁵ Stress modeling
- ¹⁶ Borehole integrity evaluation
- ¹⁷ Formation integrity test (FIT)
- ¹⁸ Fracture gradient
- ¹⁹ Correlate
- ²⁰ Effective stress concept
- ²¹ Filtrate
- ²² Tip
- ²³ Minimum fracture propagation pressure
- ²⁴ Breakdown

و آزمایش یکپارچگی سازند، این اختلاف در طراحی و عملیات این دو آزمایش شرح داده خواهد شد. آزمایش نشست تمديد یافته^{۱۳} به عنوان یک آزمایش نشست ارتقاء یافته و مؤثر در یافتن تنش کمینه افقی محسوب می‌شود که در این رابطه نیز به تفصیل توضیح داده خواهد شد. روش‌های تفسیر، اهمیت به کارگیری مدل مکانیکی زمین، بحث و تشریح مطالب و نتیجه‌گیری نیز در انتهای مقاله ارایه شده است.

۱- آزمایش نشست

معمولاً آزمایش نشست بعد از نصب و سیمان کاری لوله جداری انجام می‌گردد. دلیل اصلی انجام این آزمایش، بررسی مقاومت سازند در ناحیه کفشک جداری است. با به دست آوردن این اطلاعات، مقدار مجاز بیشینه فشار ضربه^{۱۴} که باعث شکاف سازند نخواهد شد، تعیین می‌گردد. هم چنین عامل اصلی در مدل نمودن تنش^{۱۵} و ارزیابی یکپارچگی حفرة^{۱۶}، مقدار عددی تنش کمینه افقی است. در بعضی مواقع آزمایش تا لحظه نشست ادامه نمی‌یابد؛ در این حالت سازند تا مقدار از پیش تعیین شده متحمل فشار خواهد شد. به این آزمایش، آزمایش یکپارچگی سازند^{۱۷} اطلاق می‌گردد. البته در این مقاله، تفاوت آزمایش اخیر با آزمایش نشست شرح داده خواهد شد.

فشاری که در آن شکاف آغاز می‌گردد، فشار نشست نام دارد و وقتی که به عمق معینی ارجاع داده شود، شیب شکاف^{۱۸} نامیده می‌شود. به دلیل این که غالباً جداری‌ها در سازندهای مقاوم نصب می‌شوند و از طرف دیگر، اغلب هرزروی‌ها در سازندهای نفوذپذیر مانند ماسه سنگ رخ می‌دهد، ارزیابی داده‌های آزمایش نشست برای تعیین شیب شکاف باید در دو گروه مجزا انجام پذیرد. یکی از این دو گروه سازندهایی هستند که شیب شکاف بالایی دارند و دیگری سازندهای با شیب شکاف کم تر می‌باشند. در برخی مواقع، تفسیر داده‌های آزمایش نشست گسترش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. معمولاً در ابتدا مقادیر آزمایش نشست بر حسب عمق رسم می‌گردد و احتمال ربط^{۱۹} آن‌ها بررسی می‌شود. اگر گسترش داده‌های آزمایش نشست برای به دست آوردن یک خط ربط خیلی زیاد بود، مفهوم تنش مؤثر^{۲۰} کاربرد خواهد داشت.

در شکل ۱، نمونه‌ای از نمودار آزمایش نشست نشان داده شده است. قسمت خطی نمودار نشان دهنده تراکم سیال حفاری و انقباض الاستیک دهانه چاه می‌باشد. احجام یکسان پمپ شده باعث افزایش تثبیت فشار می‌شود. در این زمان، امکان نفوذ مقادیر نسبتاً کمی از گل وجود دارد؛ ولی این مقدار خیلی کم بوده و تقریباً با روند ثابتی انجام می‌پذیرد، بنابراین تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خطی بودن نمودار ندارند.

نقطه نشست یا حد آزمایش فشاری یکپارچگی که با A نشان داده شده است، جایی است که اطلاعات از روند خط راست انحراف یافته و به سمت راست خمیده می‌شود. در این نقطه، شکاف کوچک و



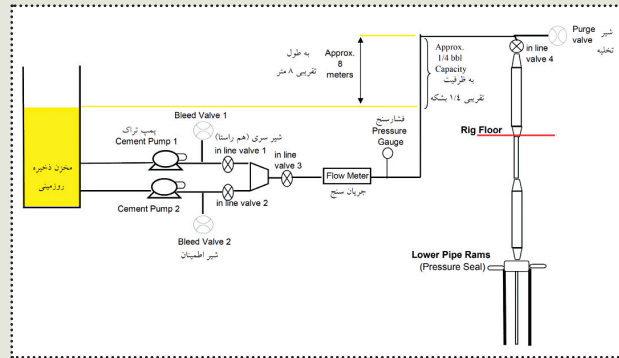
کم پمپ تعیین می شود. این نرخ، کم ترین نرخ است که باعث غلبه بر هرزروی قسمت جامد گل می گردد. به همین دلیل و برای دستیابی به نرخ های دقیق تزریق بهتر است از پمپ تراک استفاده شود. در ایران نیز برای آزمایش های یکپارچگی سازند از پمپ تراک استفاده می گردد.

۲- عوامل مؤثر بر فشار نشت

متأسفانه اغلب آزمایش های نشت، شبیه به حالت کلاسیک نیست. فشار نشت ممکن است بالاتر یا پایین تر از حالت پیش بینی شده باشد. عدم ظهور یا محو فشار ایستایی، ظهور شیب های متعدد یا رفتار غیر خطی و غیره از جمله موارد معمول در آزمایش نشت می باشند. در نمودارهای غیر کلاسیک آزمایش نشت، نقطه نشت به طور دقیق مشخص نیست و به نظر می رسد که شکاف بسته نشده است. بنابراین تفسیر چنین آزمایشی مشکل خواهد بود. آشنایی با عواملی که بر فشار نشت و نمودار نشت تأثیر می گذارند، در تفسیر این آزمایش ها کمک شایانی می نمایند. رفتار کشسان سنگ، تأثیر دیواره چاه، گرانروی سیال، نفوذ سیال و نفوذ پذیری، شکاف های موجود قبلی، نرخ پمپ، فشار ایستایی و تأثیرات شیارهای سیمانی، از جمله عوامل مهم و تأثیر گذار بر فشار نشت می باشند. به دلیل گستردگی این فاکتورها، بررسی تمامی آنها از حیطه این مقاله خارج است و به شرح مختصری در رابطه با رفتار کشسان سنگ بسنده می شود. بیش تر سنگ ها قبل از نقطه شکست، رفتار کشسان یا الاستیک از خود نشان می دهند. این امر نشان دهنده رفتار خطی تنش و تنجش^{۲۵} است. کشسانی و فشردگی سیال نشان دهنده خطی بودن مرحله ساخت فشار (قبل از نشت) در آزمایش یکپارچگی فشار است. به هر حال، بعضی سازندها مانند سنگ های نمکی و رس های سست^{۲۶}، دارای رفتار خمیرسان^{۲۷} هستند که بدون از دست دادن مقاومت خود، تغییر دایم دارند. در آزمایش های یکپارچگی فشار انجام شده در این سازندها، مرحله ساخت فشار، رفتار غیر خطی از خود نشان می دهد.

۳- تفاوت آزمایش نشت و آزمایش فشار یکپارچگی سازند

در آزمایش نشت، فشار تا زمانی افزایش می یابد که یک افت فشاری دیده شود. در این هنگام، سازند شکاف یافته و این فشار به عنوان فشار شکاف سازند شناخته می شود. برای آزمایش بسته شدن شکاف سازند، آزمایش نشت توسعه یافته انجام می شود. در این حالت روند پمپ سیال



۲ | جانمایی تجهیزات سطح الارضی برای آزمایش نشت

در نقطه B و کمی بعد از نشت، پمپ متوقف شده و برای بررسی هر گونه نشت، فشار ایستایی^{۲۵} کنترل می گردد. به دلیل هرزروی سیال به درون شکاف های باز و از دست دادن فشار اصطکاکی ایجاد شده توسط پمپ، در وهله اول فشار ایستایی به سرعت کاهش می یابد. بسته شدن شکاف ها زمانی روی می دهد که فشار به اندازه کافی افت نماید. اتمام آزمایش زمانی است که کاهش فشار ایستایی، یک عدد تقریباً ثابتی را نشان دهد. اگر فشار نشت کافی بود و شیار سیمانی^{۲۶} توسط نمودار آشکار نگردید، عملیات حفاری شروع خواهد شد.

برنامه ریزی مناسب برای بهره گیری از آزمایش نشت باعث تفسیر ساده آزمایش و اطمینان از نتایج کمی کار می گردد. روش های ثبت اطلاعات شامل ثبت دستی در سطح و ثبت رقومی در درون چاه است. صحت روش ثبت دستی به مقیاس فشارسنج، فواصل زمانی ثبت و هماهنگی با اپراتور پمپ برای تنظیم حجم سیال وابسته است. برای تعیین صحیح فشار ناپایدار شکاف^{۲۷} و تنش کمینه افقی در زمان استفاده از فشارسنج های سطحی، اطلاع از دانسیته ستون سیال لازم است. برای تعیین فشار هیدرستاتیکی، گردش ستون گل قبل از زمان آزمایش تا رسیدن به دانسیته گل معادل^{۲۸} (0.1 ppg) لازم است. از مزیت های فشارسنج های درون چاهی، عدم نیاز به تخمین دانسیته ستون سیال برای تفسیر داده های سطحی است. شکل ۲ شماتیک تجهیزات سطح الارضی برای انجام آزمایش نشت را نشان می دهد.

برای انجام این آزمایش، نرخ پمپ آرام و تثبیت شده از اهمیت خاصی برخوردار است. نرخ بالای پمپ باعث پوشش یا ملاحظه نکردن نقطه نشت و رسیدن به فشار شکست می گردد. نرخ های پمپ متغیر می تواند باعث مشوش شدن نتایج تفسیر آزمایش گردد؛ به طوری که باعث تغییر شیب نمودار قبل از نشت می شود. برای سازندهای غیر قابل نفوذ، نرخ ۱/۴ بشکه در دقیقه باید استفاده گردد، اما این مقدار برای سازندهای نفوذ پذیر می تواند ۱/۲ تا ۱ بشکه برای غلبه بر هرزروی قسمت جامد گل باشد. نرخ بیش از ۱ بشکه در دقیقه می تواند نشان دهنده نشت تجهیزات یا یک شیار سیمانی باشد. فشار باز شدن شکاف ارتباط مستقیمی با میزان فشرده کنندگی دارد. فشار نشت واقعی، فشاری است که در نرخ خیلی

²⁵ Static pressure

²⁶ Cement channel

²⁷ Unstable fracture pressure

²⁸ Equivalent mud density

²⁹ Strain

³⁰ Unconsolidated

³¹ Plastic

۲، روش محاسبه آزمایش یکپارچگی سازند را مشخص می کند:
(۲)

$$FIT \text{ (psi)} = (MW_{FIT} - MW_{Current}) \times 0.052 \times TVD_{Casing \text{ shoe}}$$

در فرمول ۲ نیز وزن گل بر حسب پاوند بر گالن و عمق بر حسب فوت می باشد.

مثال: وزن گل مورد نظر برای انجام آزمایش یکپارچگی سازند، ۱۴/۵ پاوند بر گالن می باشد. وزن فعلی گل نیز ۹/۲ پاوند بر گالن است. عمق عمودی واقعی کفشک نیز ۴۰۰۰ فوت می باشد. فشار لازم برای انجام آزمایش یکپارچگی سازند بر اساس این داده ها، ۱۱۰۲/۴ پام خواهد بود.

دستورالعمل کلی انجام آزمایش یکپارچگی سازند بر این اساس است:
۱- سازند جدید به اندازه چندفوت (حدود ۱۰ فوت) حفاری می گردد و چرخه گل انجام می شود تا برای اطمینان از حفاری سازند جدید، نمونه هایی از ته چاه به دست آید. سپس لوله بالا تا بالای کفشک انجام می شود.

۲- ضامن حلقوی یا پایپ رمز بسته شده و پمپ (معمولاً پمپ سیمان کاری) در مسیر قرار می گیرد و چرخش سیال حفاری از خط لوله کاهنده تا زمان اطمینان از پر شدن کامل خط روسطحی ادامه می یابد.

۳- مقدار کمی سیال حفاری معمولاً با ضربه پمپ ثابت به درون چاه پمپ می شود. تعداد ضربات پمپ، فشار رشته حفاری و جداری ثبت می گردد. پمپ سیال حفاری تا زمان رسیدن به فشار مورد نظر آزمایش یکپارچگی ادامه می یابد. فشار تا چند دقیقه ثابت نگه داشته شده تا تثبیت فشار تأیید گردد.

۴- فشار از چاه برداشته شده و عملیات حفاری آغاز می شود.

۴- آزمایش نشت تمدید یافته^{۳۲}

همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود، آزمایش نشت تمدید یافته شامل دو چرخه است: چرخه اول شامل ۵ بخش قابل تشخیص می باشد که به ترتیب شامل موارد ذیل است:

- ۱- فشردگی کشسان^{۳۳}: در فشردگی کشسان، رفتار برگشت پذیر (الاستیک) سنگ دیده می شود. قسمت اول منحنی به صورت خط مستقیم بوده و معرف محدوده تغییر شکل الاستیک جسم است. شیب این بخش از منحنی به ضریب یانگ^{۳۴} (E) یا ضریب کشسانی^{۳۵} موسوم است.

ادامه می یابد و فشار نشت جدید بعد از شکاف مجدد سازند مشخص می گردد. آزمایش فشار یکپارچگی سازند آزمایشی است که در آن مقاومت سازند تا نقطه فشاری طراحی شده مورد آزمایش قرار می گیرد و قبل از شکست سازند، فشار از آن برداشته می شود. در اکثر مواقع برای اطمینان از سازند زیر کفشک در زمان حفر حفره، بعد با فشار درون چاهی بالاتری انجام می گردد. معمولاً این آزمایش برای جلوگیری از آسیب سازند یا کفشک، به جای آزمایش نشت انجام می شود. آزمایش نشت زمانی انجام می شود که اهمیت شناخت فشاری که سازند می تواند تحمل کند، فوق العاده زیاد باشد. دستورالعمل کلی انجام آزمایش نشت بر این اساس است:

۱- سازند جدید به اندازه چندفوت (حدود ۱۰ فوت) حفاری می گردد و چرخه گل انجام می شود و برای اطمینان از حفاری سازند جدید، نمونه های ته چاه به دست می آید. سپس لوله بالا تا بالای کفشک انجام می شود.

۲- ضامن حلقوی^{۳۶} یا پایپ رمز^{۳۷} روی لوله های حفاری بسته شده و پمپ (معمولاً پمپ سیمان کاری) در مسیر قرار گرفته و از طریق خطوط لوله کاهنده^{۳۸}، چرخش سیال حفاری تا زمان اطمینان از پر شدن کامل خط روسطحی ادامه می یابد.

۳- مقدار کمی سیال حفاری معمولاً با ضربه پمپ ثابت، به درون چاه پمپ می شود. تعداد ضربات پمپ، فشار رشته حفاری و لوله جداری ثبت می گردد. فشار رشته حفاری و لوله جداری به صورت مداوم با پمپ نمودن سیال حفاری افزایش می یابد. وقتی که در حالت عدم شکست سازند، نمودار ضربات پمپ بر حسب فشار رسم گردد، یک رابطه خطی دیده خواهد شد. در زمان غلبه فشار بر مقاومت سازند، سازند شکسته شده و سیال حفاری به درون آن نفوذ خواهد کرد؛ بنابراین روند خطی فشار رشته حفاری و لوله جداری از حالت خطی خارج می گردد. این امر نشان دهنده شکست سازند و نفوذ گل حفاری به درون آن است. به نقطه ای که در آن فشار از حالت خطی خارج می گردد، فشار نشت گفته می شود. فشار آزمایش نشت بر حسب وزن معادل گل^{۳۹} بر حسب ppg، بر اساس رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$LOT \text{ (ppg)} = (LOT \text{ (psi)} \div 0.052 \div TVD_{Casing \text{ shoe}}) + MW_{Current}$$

در رابطه ۱، وزن گل بر حسب پاوند بر گالن و عمق بر حسب فوت می باشد.

مثال: فشار آزمایش نشت ۱۹۰۰ پام می باشد. وزن فعلی گل نیز ۹/۷ پاوند بر گالن است. عمق عمودی واقعی کفشک نیز ۴۶۰۰ فوت می باشد. وزن معادل گل حفاری برای انجام آزمایش نشت بر اساس این داده ها، ۱۷/۶۵ پاوند بر گالن است. شیب عمودی فشار نیز ۰/۴۱ پام/فوت خواهد بود.

۴- فشار از چاه برداشته شده و عملیات حفاری آغاز می گردد.

قبل از انجام آزمایش فشار یکپارچگی سازند، فشار لازم برای این آزمایش باید توسط مهندس ناظر عملیات حفاری مشخص گردد. رابطه

³² Annular preventor

³³ Pipe rams

³⁴ Chock lines

³⁵ Equivalent mud weight

³⁶ Extended leak-off test

³⁷ Elastic compression

³⁸ Young's modulus

³⁹ Modulus of elasticity



انواع نمودارهای مورد استفاده در ارزیابی ها

توضیحات	مقیاس ها	کمیت	مقدار	هدف
فشار و حجم به عنوان تابعی از زمان نمایش داده می شوند	خطی-خطی	فشار و حجم بر حسب زمان	نمایش کلی	دید کلی و کیفی
توسعه شکاف در ابعاد طولانی وقتی که فشار در حال کاهش است در حالی که پمپاژ ادامه دارد	خطی-خطی	فشار بر حسب حجم	پمپاژ	شروع ایجاد شکاف
این نمودار فرض می کند که نرخ پمپ ثابت است	خطی-خطی	فشار بر حسب حجم	پمپاژ	شروع ایجاد شکاف
برگشت سیال غالباً لازم است تا از بسته شدن شکاف اطمینان حاصل شود	خطی-خطی	فشار بر حسب حجم	برگشت سیال	بسته شدن شکاف در زون های غیر قابل نفوذ
تغییر شیب در زمان بستن شکاف متوقع است	خطی-خطی	فشار بر حسب مجذور زمان	انسداد سیستم	بسته شدن شکاف در زون های نفوذپذیر
جهت زمان های طولانی پمپاژ مناسب است	خطی-خطی	فشار بر حسب تابع G	انسداد سیستم	بسته شدن شکاف در زون های غیر قابل نفوذ
	لگاریتمی-لگاریتمی	فشار بر حسب زمان	انسداد سیستم	بسته شدن شکاف در زون های غیر قابل نفوذ

آزمایش های ساخت فشار و شکافت هیدرولیکی صدها تا هزاران فوت در سازند را بررسی می نمایند. مقدار حجمی سیالات مورد استفاده در آزمایش های نشت فشار صدها بار کم تر از شکافت هیدرولیکی است و معمولاً هم به صورت افقی و هم عمودی به شعاع کوچکی از دهانه چاه محدود می شود. در آزمایش نشت، مقدار کمی سیال تزریق می شود، بنابراین هیچ شکافی به صورت عمیق به درون سازند توسعه نمی یابد. به صورت کلی، عملیات پمپ نمودن سیال باید بعد از تغییر اولیه شیب خط (FIP) ادامه یابد تا بالاترین حد فشار (UFP) در دهانه چاه ثبت گردد و وجود و گسترش شکاف به اندازه کافی درون سازند محرز شود. خطا در مدنظر قراردادن این مورد در ارزیابی ها، باعث بروز جواب های

⁴⁰ Limit pressure

⁴¹ Fracture initiation pressure

⁴² Stable fracture growth

⁴³ Stop pump pressure

⁴⁴ Unstable fracture pressure

⁴⁵ Unstable fracture growth

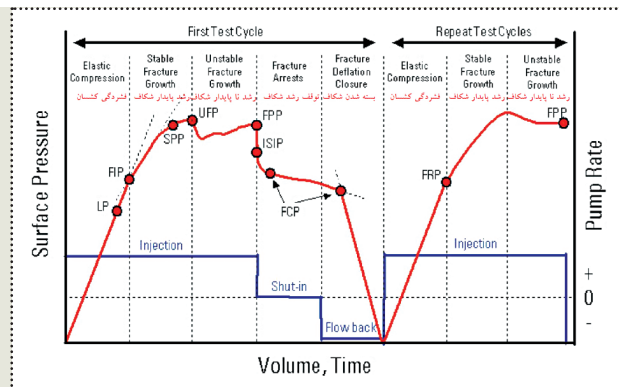
⁴⁶ Fracture arrest

⁴⁷ Instantaneous shut-in pressure

⁴⁸ Fracture deflation closure

⁴⁹ Build up test

⁵⁰ Fall-off test



شکل ۳ | نمودار فشار-زمان-حجم یک آزمایش نشت [۳]

در بخش اول (فشرده گی کشسان)، دو نقطه حدفشاری^{۴۰} و فشار آغازین ایجاد شکاف^{۴۱} دیده می شود. مرحله تنجش الاستیک سنگ تا تنش معینی به نام حدالاستیک یا نقطه تسلیم ادامه دارد. حدفشاری در شکل ۳ معادل حد الاستیک یا نقطه تسلیم است. در نقطه فشار آغازین ایجاد شکاف، با فشار تزریق ثابت، رابطه خطی بین زمان و فشار سطحی دیده نمی شود و با افزایش زمان، به دلیل نشت مقداری سیال به سازند و غلبه بر نقطه تسلیم، شکاف شروع به ایجاد شدن می نماید.

۲- رشد پایدار شکاف^{۴۲}: در رشد پایدار شکاف، بعد از فشار رشد شکاف، شیب خط کم تر شده و تا نقطه توقف فشار پمپ^{۴۳} و نقطه فشار ناپایدار شکاف^{۴۴} ادامه می یابد. بعد از نقطه قطع فشار پمپ، افزایش فشاری در سیستم رخ نداده و رشد پایدار شکاف در این مرحله وجود نخواهد داشت.

۳- رشد ناپایدار شکاف^{۴۵}: در این مرحله به دلیل عدم توانایی فشار تزریق برای غلبه بر مقاومت سنگ، رشد شکاف متوقف می شود.

۴- توقف شکاف: بعد از توقف تزریق، نقاط توقف رشد شکاف^{۴۶}، فشار بسته لحظه ای^{۴۷} و فشار بسته شدن شکاف در شکل ۳ دیده می شوند. در حقیقت داده فشار بسته شدن شکاف بهترین داده ای است که می توان فشار کمینه افقی به دست آمده از معادلات ریاضی را تصحیح نمود.

۵- بسته شدن شکاف: در این مرحله شکاف به وجود آمده بسته می شود. آخرین نقطه ای که طی آن در مرحله برگشت جریان، خط از شیب ملایم خارج می شود، آخرین نقطه فشار بسته شدن شکاف خواهد بود. در چرخه دوم، مراحل موجود در چرخه اول تا مرحله رشد ناپایدار شکاف تکرار می گردد.

۵- روش های تفسیر

تفسیر نمودارهای فشار بر حسب زمان برای ویژگی های مخزن و تنش، از دهه ۱۹۵۰ در حال استفاده است. روش های تعیین حد و مرز مخزن با استفاده از آزمایش های ساخت فشار^{۴۹} و انحراف^{۵۰} به سرعت برای بررسی فشار در عملیات شکافت هیدرولیکی توسعه داده شد. تفسیر آزمایش های نشت برای تعیین تنش کمینه افقی از این ابزار سرمشق گرفته است.

غیر صحیح برای تنش کمینه افقی می‌گردد.

هر چند که روش‌های تشخیص ایجاد شکاف به روشنی وجود دارند، ولی تعیین بسته شدن شکاف در زمان عدم تزریق یا انسداد سیستم^{۵۱}، مشکل به نظر می‌رسد. اگر سازند نفوذپذیری نسبتاً بالایی به سیال حفاری داشته باشد، هم چنین اگر فشار در مدت زمان طولانی کنترل و نظارت گردد، سرانجام شکاف بسته خواهد شد. در بعضی حالات، این وقایع به وسیله تغییر در شیب داده‌های فشاری بر حسب توابع مختلف زمانی (مانند مجذور زمان) رسم می‌شوند. تکرار چرخه تزریق و تزریق مجدد، باعث تأیید بخش‌های مختلف آزمایش نشت می‌شود. در جدول ۱، نمودارهای مورد استفاده در ارزیابی آزمایش نشت آمده است [۳].

صرف نظر از انواع آزمایش نشت، انواع نمودار آن نشان‌دهنده تغییر در مطلوبیت سیستم در باز یا بسته شدن شکاف است که با تغییر شیب داده‌های فشاری بر حسب زمان یا حجم مشخص می‌گردد. بعضی از تغییرات شیب داده‌ها به آسانی قابل تشخیص هستند، ولی به هر حال این امر به فرد تفسیرکننده تغییر شیب داده‌ها وابسته است. یکی از روش‌هایی که باعث افزایش صحت داده‌های به دست آمده می‌شود، استفاده از نتایج انواع نمودارهای آزمایش نشت است.

۶- مدل مکانیکی زمین، یک مثال مهم کاربردی

در بعضی مواقع تفسیر نمودارهای فشار-زمان-حجم دارای ابهاماتی است، به ویژه اگر با زمینه زمین‌شناسی مناسب تفسیر نشده باشد. خوشبختانه روش ساده شناخت مفاهیم زمین‌شناسی و تنش با استفاده از مدل مکانیکی زمین^{۵۲} امکان‌پذیر است. مدل مکانیکی زمین یا MEM، توصیف زمین‌شناسی، ویژگی‌های مکانیکی، تنش‌ها و فشارها از طریق مقاطع چینه‌شناسی که حفاری شده‌اند، می‌باشد. استفاده از این مدل از دو جهت به تفسیر کمک شایانی می‌نماید. در ابتدا، تخمین قبل از آزمایش امکان‌پذیر خواهد بود. مانند حدس فشارهای احتمالی نشت، شکست و بسته شدن شکاف. آشنایی با مقدار فشار مواجه شده، راهنمای خوبی برای طراحی آزمایش خواهد بود. برای مثال، در حالتی که فشار مورد انتظار بالاتر از فشار ترکیدگی جداری باشد، انتخاب ضعیفی برای انجام آزمایش کامل نشت است. اگر دانسته گردشی معادل^{۵۳} برنامه شده برای حفره بعدی نزدیک به تنش کمینه افقی باشد، ایجاد شکاف با آزمایش نشت با کاهش وزن گل قبل از بروز هرزروی امکان‌پذیر خواهد بود. این امر نشان‌دهنده این نیست که تنش کمینه افقی در این حالت قابل اندازه‌گیری نیست، ولی داشتن یک مدل باعث تعیین حدود آزمایش خواهد شد. هم چنین یک مدل باعث وضوح بهتر تفسیر در هنگام بروز یک رویداد دور از انتظار خواهد شد.

آزمایش یکپارچگی فشاری، برای اندازه‌گیری مقاومت سازند از اهمیت بالقوه‌ای برخوردار است. این مقاومت سازندی به وسیله تنش‌های فشاری طبیعی اعمال شده بر سنگ‌های زیرزمینی کنترل می‌گردد. تنش عمودی سنگ تابعی از طبقات بالایی یا وزن بالایی زمین است. تنش‌های

افقی تحت تأثیر خواص سنگ و تنش عمودی می‌باشند. بر اثر تأثیر تنش عمودی، سنگ به انقباض^{۵۴} عمودی و انبساط^{۵۵} در محور افقی تمایل دارد. این پهن‌شدگی در محور افقی توسط مقاومت سنگ‌های اطراف ممانعت می‌گردد که به نوبه خود تنش افقی را به وجود می‌آورد.

۷- بحث و تشریح مطالب

اطلاع از فشار یکپارچه سازندها برای برنامه‌ریزی و حفاری چاه لازم و ضروری است. در فرآیند برنامه‌ریزی حفاری چاه، شیب شکست سازند^{۵۶} با استفاده از اطلاعات فشاری یکپارچه چاه‌های مجاور محاسبه می‌گردد. بر اساس این داده‌ها، تصمیم‌های بحرانی حفاری مانند تعیین عمق کفشک جداری، وزن گل و انتخاب روش کنترل چاه امکان‌پذیر است. انجام آزمایش نشت شامل اهداف ذیل می‌باشد:

۱- حصول اطمینان از مقاومت سیمان اطراف کفشک جداری و این که در بالای کفشک جداری یا به سمت دالیز قبلی، هیچ گونه مسیر جریانی باز به سمت سازند وجود ندارد. اگر چنین مسیر جریانی وجود داشته باشد، ترمیم کفشک به وسیله تزریق سیمان لازم و ضروری خواهد بود.

۲- بررسی توانایی دیواره چاه در تحمل فشار اضافی در زیر کفشک برای ارزیابی قدرت چاه در فایق آمدن بر نفوذ^{۵۷} گاز یا سیال سازندی توسط آزمایش نشت صورت می‌گیرد و یکی از داده‌های مهم محاسبه مقدار بیشینه مجاز فشار سطحی دالیز برای مقاصد کنترل فوران چاه و طراحی مناسب چاه با در نظر گرفتن حفاری ایمن حفره بعدی می‌باشد.

۳- برای جمع‌آوری داده‌هایی از قبیل مقاومت سازند و تنش‌های درجا که برای پیش‌بینی مواردی مانند پایداری چاه^{۵۸} و هرزروی^{۵۹} مهم می‌باشند. هر کدام از موارد یاد شده در اهداف انجام آزمایش نشت، نه تنها دارای اهمیت زیادی در عملیات حفاری، مانند تعیین وزن مناسب گل حفاری می‌باشند، بلکه در سایر حوزه‌های مهندسی نفت مانند متروک نمودن چاه یا استفاده از آن به عنوان مخازن ذخیره گاز طبیعی یا دی‌اکسید کربن نیز دارای نقش مهمی هستند.

تفسیر نامناسب اطلاعات حاصل شده از این آزمایش باعث تحمیل هزینه‌های غیر ضروری یا بروز مشکلاتی می‌گردد. به عنوان مثال، اگر مقدار کم نشت، به عنوان یک شیار سیمان تفسیر گردد، عملیات تزریق سیمان^{۶۰} به عنوان راه کاری برای افزایش فشار نشت در دستور کار قرار خواهد گرفت. اگر پایین بودن نشت از کم بودن شیب شکاف مورد انتظار ناشی شده باشد،

51 Shut-in

52 Mechanical earth model

53 Equivalent circulating density

54 Shrink

55 Expand

56 Formation fracture gradients

57 Influx

58 Wellbore stability

59 Lost circulation

60 Squeeze job



به مشکلات عدم انجام آزمایش های یکپارچگی چاه، که یکی از آن ها آزمایش نشت است، پرداخته شده است. یکی از عواملی که باعث عدم انجام آزمایش نشت می شود، عدم آگاهی کافی افراد از علم ژئومکانیک است. به طوری که اغلب پنداشته می شود که نباید سازند و/یا سیمان کفشک شکسته شود. هم چنین ادعا می شود که برای حفاری، اطلاعات وزن مناسب گل حفاری در مقاطع مختلف طبق تجارب چاه های قبلی موجود است و نیازی به انجام این آزمایش در تمامی چاه ها و جداری ها نمی باشد. نکته قابل اهمیت در رابطه با آزمایش نشت، کاربرد فوق العاده زیاد آن در دیگر بخش های مهندسی نفت از قبیل مهندسی مخزن و بهره برداری است. اعمال مقاصد از قبیل تولید سیانته، کنترل تولید ماسه، به کارگیری روش های ازدیاد برداشت، حفظ و صیانت از محیط زیست و موارد متعدد دیگر، اهمیت و ضرورت انجام تست نشتی را در تمامی چاه ها و کفشک های جداری یادآور می شود.

◆ نتیجه گیری

- 1- داشتن داده و اطلاعات صحیح از تنش کمینه افقی نه تنها برای پیش بینی و جلوگیری از مشکلات حفاری و به کارگیری روش های مناسب کنترل فوران لازم و ضروری است، بلکه برای تکمیل چاه، بهره برداری بهینه، تزریق، کنترل ماسه، و غیره، لازم و ضروری است.
- 2- روش میدانی و جانمایی سطح الارضی ارایه شده در این مقاله، در عملیات حفاری در چاه های اکتشافی، ارزیابی و حتی توسعه ای قابلیت کاربرد دارد.
- 3- با توجه به ضرورت به کارگیری این آزمایش در عملیات حفاری، ضرورت تجدیدنظر در انجام آن ضروری به نظر می رسد.
- 4- عدم آشنایی با فواید و اطلاعات حاصل آن و کاربرد آن ها در تمامی شاخه های مهندسی نفت، از دلایل مهم عدم انجام آزمایش نشت است.

◆ منابع

- [1] J. Dodson, T. Dodson, V. Schmidt. Gulf of Mexico 'trouble time' creates major drilling expenses. Offshore. World Oil Article. January 2004: 46-48.
 - [2] S.R. Shadizadeh, M. Zoveidavianpoor, Study reviews Iran, world well cementing practices, Oil & Gas Journal, Vol. 108, Issue 22, 2010.
 - [3] D. Lee, R. Birchwood, T. Bratton. Leak-Off Test Interpretation and Modeling with Application to Geomechanics, Houston, Texas, June, 2004. ARMA/NARMS 04-547.
- [4] سید رضا شادی زاده (مجری پروژه)، بررسی و انتخاب چاه های نفتی مناسب لایه شکافی در مخازن بنگستان میدان اهواز، آب تیمور و منصوری. دانشگاه صنعت نفت و شرکت مناطق نفت خیز جنوب.

هزینه و زمان توسط مجری تلف شده است. از طرف دیگر اگر آزمایش نشت به نشانه یک شیب شکاف کم تفسیر گردد، زمانی که باعث ایجاد یک شیار سیمان شود، استفاده از وزن خیلی کم گل به عنوان محدوده بالای وزن گل در دستور کار مجری قرار خواهد گرفت. این کار باعث نصب زودرس و نابهنگام لوله جداری بعدی یا انتخاب های غیر صحیح وزن گل در موقعیت های کنترل چاه می گردد. اگر آزمایش نشت در تفسیر، فشار بالای نشت را به جای مقادیر کم تر نشان دهد، وزن گل بالاتر برای حفره مورد نظر انتخاب شده و این مشکل باعث ایجاد هرزروی خواهد شد. در شکل ۱، یک آزمایش نشت تقریباً آیده آل دیده می شود که تغییرات فشار نسبت به حجم تزریق شده را نشان می دهد. هم چنین روش های مختلف تفسیر در جدول ۱، انواع نمودارهای قابل استفاده در تفسیر آزمایش نشت را معرفی می کند.

برای انجام آزمایش نشت، دستورالعمل واحدی مورد استفاده قرار می گیرد. بدین صورت که شیرهای فوران گیر^{۶۱} بسته شده و سیال به آرامی به درون چاه پمپ می گردد. در فشار مشخص، پمپ متوقف می گردد. فشار ایستایی^{۶۲} برای مدت زمان کمی برای بررسی عدم نشت کنترل می گردد و پمپ کردن دوباره شروع می شود. اطلاعات سپس به صورت یک نمودار تبدیل شده و برای تعیین فشار یکپارچه تفسیر می شوند. همان طور که در دستورالعمل انجام آزمایش نشت و آزمایش یکپارچگی سازند دیده می شود، تنها اختلاف آن ها عدم شکست سازند در آزمایش یکپارچگی سازند است. آزمایش یکپارچگی سازند در چاه های ارزیابی، توسعه ای و حتی اکتشافی انجام می شود؛ در حالی که انجام آزمایش نشت در چاه های اکتشافی و ارزیابی الزامی است.

به دلیل این که اغلب هرزروی ها در سازندهای نفوذپذیر (مانند ماسه سنگ) یا شکاف دار رخ می دهد، ارزیابی داده های آزمایش نشت برای تعیین شیب شکاف باید در دو گروه مجزا انجام پذیرد: یکی برای سازندهایی که شیب شکاف بالایی دارند و دیگری برای سازندهای با شیب شکاف کم تر. در مواقعی نیز در تفسیر داده های آزمایش نشت، گسترش قابل ملاحظه ای مشاهده می گردد. مقدار حجمی سیالات مورد استفاده در آزمایش های نشت فشار صدها بار کم تر از شکافت هیدرلیکی است و معمولاً هم به صورت افقی و هم عمودی به شعاع کوچکی از دهانه چاه محدود می شود. در آزمایش نشت مقدار کمی سیال تزریق می شود، بنابراین هیچ شکاف عمیقی به درون سازند توسعه نمی یابد. آزمایش یکپارچگی فشاری برای اندازه گیری مقاومت سازند از اهمیت بالقوه ای برخوردار است. این مقاومت سازندی به وسیله تنش های فشاری طبیعی اعمال شده بر سنگ های زیرزمینی کنترل می گردد. تنش عمودی سنگ تابعی از طبقات بالایی یا وزن بالایی زمین می باشد. تنش های افقی تحت تأثیر خواص سنگ و تنش عمودی می باشند. بر اثر تأثیر تنش عمودی، سنگ تمایل به انقباض به صورت عمودی و انبساط در محور افقی دارد. این پهن شدگی در محور افقی توسط مقاومت سنگ های اطراف ممانعت می گردد که به نوبه خود تنش افقی را به وجود می آورد. در منبع ۱۲ این مقاله

⁶¹ BOP

⁶² Shut-in pressure