

توصیف شکاف‌های طبیعی به کمک داده‌های هرزروی گل؛ مروری بر مدل‌های موجود، پیشرفت‌ها و چالش‌ها

مجتبی قائدی^{۱*}، علی سوفالی، محمدرضا مساح^۲ بخش مهندسی نفت دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز دانشگاه شیراز

چکیده

از جمله چالش‌های مهم صنعت نفت، مطالعه و توسعه مخازن شکافدار طبیعی است. در این نوع مخازن رفتار سیال در محیط متخلخل، به دلیل حضور شکاف‌هایی با تراوایی بالا در کنار ماتریکس با تراوایی بسیار کم پیچیدگی بالایی دارد که در نتیجه آن هزینه‌های مطالعه و توسعه به شدت افزایش می‌یابند. به دلیل وجود شکاف‌ها در مخازن شکافدار طبیعی به هنگام حفاری این مخازن، هرزروی گل حفاری رخ می‌دهد. این هرزروی اغلب اوقات بسیار هزینه‌بر بوده و گاهی سبب بروز مشکلات فنی و خطرات بعد از آن می‌شود. در طول چندین سال اخیر تلاش‌های متعددی جهت توصیف کیفی و کمی فرآیند نفوذ گل حفاری به درون شکاف انجام شده است. با استفاده از این مدل‌ها و با داشتن داده‌ی مناسب، یافتن مکان شکاف‌ها و ویژگی‌های آنها امکان‌پذیر می‌شود. پس از یافتن مکان و ویژگی‌های شکاف‌ها مدل‌سازی رفتار مخزنی این مخازن واقع‌گرایانه‌تر و دقیق‌تر می‌شود و همچنین می‌توان برای جلوگیری از نفوذ گل به سازند راه‌حلی اندیشید. در این مقاله پس از بررسی مدل‌های مهم ارائه شده در کارهای گذشته برای ارزیابی شکاف‌های طبیعی با استفاده از داده‌های هرزروی گل، نقاط قوت و ضعف هر کدام از این مدل‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت. در نهایت، کارهایی که می‌تواند در آینده در این حوزه مورد بحث و بررسی قرار گیرد، معرفی خواهد شد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۱۰/۱۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۱۲/۱۴

واژگان کلیدی:

هرزروی گل، مخازن شکافدار طبیعی، تراوایی شکاف.

مقدمه

موضوع استفاده از داده‌های مرتبط با گل حفاری برای تشخیص ویژگی‌های مخازن شکافدار طبیعی موضوع تازه‌ای نیست. این موضوع اولین بار توسط Drummond در سال ۱۹۶۴ مطرح شد. [۱] با این حال تا قبل از سال ۱۹۹۷ اکثر مدل‌های ارائه شده جنبه کیفی داشتند و چندان به ارائه روابط کمی پرداخته نشد تا این که در سال ۱۹۹۷، Sanfillippo و همکارانش [۳] موفق به ارائه روابط کمی شدند. البته مدل Sanfillippo دارای فرضیات ساده‌ساز بسیار زیادی بود و تا مدل‌سازی شرایط واقعی بسیار فاصله داشت.

Dyke و همکارانش در سال ۱۹۹۶ [۲] و با همکاری شرکت BP با انجام تحقیقات روی چندین چاه از این شرکت به ارائه توصیفی کیفی از فرآیند هرزروی گل در مخازن شکافدار طبیعی و کاربرد آن در تشخیص ویژگی‌های این مخازن پرداختند. این محققان همچنین روش‌هایی برای اندازه‌گیری دقیق‌تر میزان گل هدر رفته ارائه دادند. Sanfillippo و همکارانش در سال ۱۹۹۷ [۳] با بررسی چندین چاه از شرکت Agip توانستند یک مدل کمی برای توصیف فرآیند نفوذ گل حفاری به شکاف‌های طبیعی پیدا کنند. سیال حفاری بررسی شده در این مدل نیوتنی بود و شکاف، تغییر شکل ناپذیر با دیواره‌های ناتراوا و طول دهانه ثابت در نظر گرفته شد. در این مدل رسوب ذرات

جامد در شکاف به‌عنوان عامل بسته‌شدگی شکاف مطرح شد. Lietaud و همکارانش در سال‌های ۱۹۹۹ [۴-۵] مدلی کمی برای توصیف فرآیند نفوذ گل حفاری به درون شکاف‌های طبیعی ارائه کردند. این محققان مدل را برای هر دو نوع سیال نیوتنی و غیرنیوتنی توسعه دادند که سیال غیرنیوتنی از نوع بینگهام پلاستیک بود. جریان سیال در محیط متخلخل، آرام فرض شد و شکاف هم تغییر شکل ناپذیر با طول دهانه ثابت و دیواره‌های ناتراوا در نظر گرفته شد. بر اساس این مدل علت بسته شدن شکاف و پایان یافتن فرآیند هرزروی گل علاوه بر رسوب ذرات جامد موجود در گل، نقطه واروی گل عنوان شد. ماحصل این مدل نمودارهای مرجع (Type Curves) بود که به کمک آنها می‌توان طول دهانه شکاف را به دست آورد.

Lavrov و Tronvoll در سال ۲۰۰۴ [۶] مدلی کمی برای توصیف نفوذ گل حفاری به درون شکاف‌های طبیعی ارائه کردند. این محققان مدل را بر اساس فرض سیال نیوتنی توسعه دادند. شکاف فرض شده در این مدل تغییر شکل پذیر با دیواره‌های تراوا و طول دهانه غیرثابت بود. آنها در سال ۲۰۰۴ اثر سیال غیرنیوتنی (از نوع Power-law) و در سال ۲۰۰۶ اثر سیال سازند را وارد مدل خود کردند و مدل جامع‌تری ارائه کردند. [۷-۸]

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (m.ghaedi@shirazu.ac.ir)

۱- برای شکاف‌هایی با عرض صفر تا ۲۵۰-۱۵۰ میکرومتر گل حفاری شکاف را در ناحیه بسیار نزدیک به چاه می‌بندد. در این حالت هرزروی گل قابل تشخیص نیست.

۲- برای شکاف‌هایی با عرض ۲۵۰-۱۵۰ تا ۷۵۰-۵۰۰ میکرومتر گل حفاری شکاف را در فاصله‌ای نسبتاً دور از چاه می‌بندد. در این حالت هرزروی گل قابل تشخیص است.

۳- برای شکاف‌هایی با عرض بزرگتر از ۷۵۰-۵۰۰ میکرومتر گل حفاری به‌تنهایی توانایی بستن شکاف را ندارد. در این حالت برای جلوگیری از هرزروی گل حفاری باید از مواد کنترل‌کننده هرزروی (LCM) استفاده شود.

۲- مدل Sanfillippo و همکاران

مدل Sanfillippo و همکاران [۳] بر اساس معادله انتشار (نفوذ) برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ گل حفاری نیوتنی به درون شکاف‌های افقی، تغییر شکل ناپذیر و با دیواره‌های ناتراوا توسعه داده شد. اختلاف فشار ثابت به‌عنوان شرایط مرزی، صرف‌نظر از تراوایی ماتریکس در مقابل شکاف و توزیع متقارن سیال در شکاف، از فرضیات این مدل هستند. همچنین شکاف‌های جهت‌دار (غیر عمود بر چاه) به کمک روابطی به شکاف‌هایی افقی معادل‌سازی شدند. براساس داده‌های موجود، معادله‌ی زیر حجم کل گل هدر رفته با زمان را توصیف می‌کند:

$$V_{cum}(t) = V_0 + C\sqrt{t} \quad (1)$$

در این رابطه t نشان‌دهنده‌ی زمان، V_{cum} حجم کل گل هدر رفته با زمان، V_0 حجم گل هدر رفته تا قبل از زمان t و C ضریب تناسب معادله است.

پس از بی‌بعدسازی پارامترهای زمان و حجم گل و استفاده از معادله پویزله برای تبدیل تراوایی به عرض شکاف و حل معادله دیفرانسیل حاصل، معادله‌ی ۲ به‌دست می‌آید. مقدار ضریب C پس از برازش منحنی با داده‌های واقعی ۲,۰۱ به‌دست آمد.

$$V_D = c \frac{t_D}{\ln(t_D)} \quad (2)$$

$$t_D = \frac{12\phi C_t \mu r_{eq}^2}{w^2} \quad (3)$$

$$c\alpha \frac{w^2}{\ln(\alpha w^2)} - \frac{\beta}{h} = 0 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{V_{cum}}{12\phi C_t \mu r_{eq}^2} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{V_{cum}}{2\pi\phi C_t r_{eq}^2 \Delta P} \quad (6)$$

در این رابطه t_D نشان‌دهنده‌ی زمان بدون بعد، V_D حجم گل هدر

Huang و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۹] مدلی کمی برای توصیف نفوذ گل حفاری به درون شکاف‌های طبیعی ارائه کردند. این مدل برای سیالات غیرنیوتنی و بر اساس مدل Lietaud توسعه داده شد. در این مدل شکاف‌ها به‌صورت تغییر شکل ناپذیر با طول دهانه ثابت و دیواره‌های ناتراوا در نظر گرفته شدند. نتیجه این مدل یک معادله است که به راحتی و با داشتن چند پارامتر مقدار طول دهانه شکاف قابل محاسبه است. در ادامه مدل‌های مهم ارائه شده در کارهای گذشته جهت توصیف شکاف‌های طبیعی به کمک داده‌های هرزروی گل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

معرفی مدل‌های موجود

۱- مدل Dyke و همکاران

در حفاری سازندهای شکافدار برای تشخیص کیفی و کمی مکان و ویژگی‌های شکاف‌ها نیاز به داده‌های حجم (و یا دبی) گل حفاری وجود دارد. روش‌های اندازه‌گیری مرسوم دقت کافی را ندارند به همین علت Dyke و همکاران در سال ۱۹۹۵ [۲] چندین راه برای افزایش دقت اندازه‌گیری حجم گل پیشنهاد دادند. استفاده از دبی‌سنج‌های مغناطیسی، بازتاب‌دهنده‌های التراسونیک و یا دستگاه‌های معلق روی سطح گل می‌تواند در حفاری‌هایی که در خشکی انجام می‌شوند دقت اندازه‌گیری حجم گل حفاری را تا ۰,۵ بشکله افزایش می‌دهند. البته در حفاری در دریاها به دلیل موج بودن دریاها و تکان خوردن دکل این دقت تا ۲ بشکله کاهش می‌یابد.

بر اساس تحقیقات Dyke و همکاران با بررسی نمودارهای حجم گل هدر رفته‌ی زمان این نتیجه به‌دست می‌آید که در ابتدا سرعت نفوذ گل به سازند بالاست اما به‌تدریج با ادامه فرآیند نفوذ و افت فشار گل در شکاف سرعت نفوذ کاهش یافته و در نهایت متوقف می‌شود. همچنین بر اساس این نمودارها نوع فضای خالی (شکاف طبیعی، شکاف مصنوعی یا ماتریکس سنگ) قابل تشخیص است.

نفوذ گل حفاری به درون ماتریکس سنگ حجم گل را به‌صورت پیوسته کاهش می‌دهد چرا که با ادامه فرآیند حفاری، سطح بیشتری در اختیار گل برای نفوذ به سازند قرار می‌گیرد. نفوذ گل حفاری به درون شکاف طبیعی در ابتدا پرسرعت بوده، به‌تدریج کند شده و نهایتاً متوقف می‌شود. این نوع نفوذ به فشار وابسته نیست. نفوذ گل حفاری در شکاف‌های مصنوعی به‌شدت وابسته به فشار است و در صورت ایجاد شوک فشاری (همانند خاموش و روشن شدن پمپ‌ها) حجم گل کم و زیاد می‌شود.

نتایج تحقیقات Dyke و همکاران به‌طور خلاصه این به‌شرح است:

رفته بدون بعد، ϕ تخلخل، μ گرانیوی گل، r_{eq} شعاع معادل، w میزان بازشدگی شکاف، ΔP اختلاف فشار و C_1 برابر با تراکم‌پذیری کلی است. نتایج این کار نشان داد که استفاده از جریان‌سنج‌های با دقت بسیار بالا و همچنین روابط توسعه داده شده در مشخصه‌سازی شکاف‌ها تاثیر قابل توجهی دارد. مدل توسعه داده شده در این کار جهت تشخیص میزان هرزروی سریع و البته با دقت بالا قابل استفاده است. همچنین می‌توان از نتایج این کار جهت بررسی مکانیزم‌های بسته شدن شکاف‌ها و تفسیر آنها کمک گرفت.

۳- مدل Lietard و همکاران

بر اساس مدل Lietard و همکاران [۴-۵]، در بین ابزارهای شناسایی شکاف‌ها در مخازن شکافدار، مغزه‌گیری و نمودارگیری توانایی تشخیص و تفکیک انواع شکاف در مقیاس مخزنی را ندارند. به همین منظور استفاده از داده‌های هرزروی گل و تطبیق آن با مدلی مطلوب پیشنهاد می‌شود.

مدل Lietard و همکاران براساس معادله‌ی انتشار (نفوذ)، برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی و برای شکاف‌های تغییر شکل‌ناپذیر با دیواره‌های ناتراوا توسعه داده شد. پس از بی‌بعدسازی پارامترهای زمان و شعاع نفوذ معادله‌ی دیفرانسیل به‌دست می‌آید:

$$r_D = \frac{r_i}{r_w} \quad (7)$$

$$t_D = \beta t \quad (8)$$

$$\beta = \left(\frac{w}{r_w}\right)^2 \times \left(\frac{\Delta P_D}{3\mu_p}\right) \quad (9)$$

$$\frac{dt_D}{dr_D} = \frac{4r_D \ln(r_D)}{1 - \alpha(r_D - 1)} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{3r_w \tau_y}{w \Delta P_D} \quad (11)$$

در این روابط، r_i شعاع نفوذ گل حفاری، r_w شعاع چاه، r_D شعاع بدون بعد، ΔP_D فشار ثابت مازاد حین حفاری، T_y نقطه واروی گل حفاری و μ_p گرانیوی پلاستیک سیال بینگهام است.

برای سیالات نیوتنی نقطه واروی و در نتیجه مقدار α برابر با صفر است. بنابراین معادله‌ی دیفرانسیل به‌صورت تحلیلی حل شده که جواب آن معادله‌ی زیر است. بر اساس این معادله برای سیالات نیوتنی تنها علت بسته شدن شکاف، رسوب خرده‌های حفاری است:

$$t_D = r_D^2 * (\ln(r_D^2) - 1) + 1 \quad (12)$$

برای سیالات غیرنیوتنی معادله‌ی دیفرانسیل به‌صورت تحلیلی حل نمی‌شود. حل عددی این معادله، معادله‌ی زیر است:

$$t_{(n+1)D} = \frac{t_{(n)D} + 4r_{(n+1)D} \ln(r_{(n+1)D}) \Delta r_D}{1 - \alpha(r_{(n+1)D} - 1)} \quad (13)$$

غالباً استفاده از نمودارهای مرجع (Type Curves) بسیار ساده‌تر از حل معادلات است. بنابراین در مدل Lietard و همکاران نمودارهای

مرجعی (Type Curves) توسعه داده شدند. نتایج استفاده از این روابط و نمودارهای مرجع نشان داد که میزان بازشدگی شکاف‌های طبیعی با استفاده از تاریخچه داده‌های حفاری قابل محاسبه است و می‌تواند اطلاعات بسیار بااهمیتی را برای شناسایی میزان تاثیر شکاف‌های طبیعی در تولید از مخزن و میزان تراوایی ناشی از شکاف ارائه کند. همچنین انتخاب مواد کنترل‌کننده هرزروی گل می‌تواند بر اساس نتایج میزان بازشدگی شکاف‌ها و آنالیز بهنگام داده‌های هرزروی گل اتفاق بیفتد. مواد کنترل‌کننده هرزروی باید به اندازه‌ی کافی دانه ریز باشد تا به درون شکاف‌ها نفوذ کند.

۴- مدل Sawaryn

مدل Lietard و همکاران [۴-۵] که برای سیال نیوتنی ارائه شد یک مدل عددی بود و نیاز به سعی و خطا داشت. برای حل این مشکل Sawaryn در سال ۲۰۰۱ [۱۰] یک مدل تحلیلی بر اساس همین مدل ارائه کردند که فرم نهایی آن به شرح زیر است:

$$t_D = \frac{4r_{DMax} \ln(r_{DMax})}{\alpha} \left(\ln\left(\frac{r_{DMax} - 1}{r_{DMax} - r_D}\right) + \frac{r_D - 1}{r_{DMax}} \right) + \frac{4r_{DMax}}{\alpha} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{1}{r_{DMax}}\right)^n \left[\left(\ln(r_{DMax}) + \frac{1}{n}\right) - r_D^n \left(\ln\left(\frac{r_{DMax}}{r_D}\right) + \frac{1}{n}\right) \right] \quad (14)$$

در این رابطه r_D MAX بیشینه شعاع نفوذ گل بدون بعد است.

۵- مدل Civan and Rasmussen

مدل Civan and Rasmussen در سال ۲۰۰۲ [۱۱] بر اساس مدل Lietard و همکاران ارائه شد. حل معادله‌ی این مدل از معادله‌ی مدل Sawaryn بسیار ساده‌تر بود:

$$t_D = 4r_{DMax} (r_{DMax} - 1) \left(-\ln(r_D) \left(\frac{r_D}{r_{DMax}} + \ln\left(1 - \frac{r_D}{r_{DMax}}\right) \right) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\left(\frac{1}{r_{DMax}}\right)^n - \left(\frac{r_D}{r_{DMax}}\right)^n \right) \right) \quad (15)$$

۶- مدل Lavrov and Tronvoll

غالباً در سازندهای شکافدار، حفاری‌های فراتعادلی (Overbalance Drilling) سبب تشدید هرزروی گل حفاری می‌شود. در این نوع حفاری در صورت خاموش کردن سیستم گردش گل، بخشی از گل هدر رفته به چاه بازمی‌گردد که به اشتباه ضربه (Kick) تلقی می‌شود. در مدل Lavrov and Tronvoll [۶-۸] فرآیند نفوذ گل حفاری غیرنیوتنی (Power-law) به درون شکاف با در نظر گرفتن ناتراوایی دیواره‌های شکاف بررسی شد. در این مدل برخلاف مدل‌های قبلی تغییر شکل‌پذیری شکاف‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

در این معادله حداکثر گل هدر رفته (V_{mMax}) پارامترهای ورودی معادله است. البته ضریب عبارت درجه ۲ در این معادله به دلیل بسیار کوچک بودن قابل صرف نظر کردن است که در نتیجه‌ی آن معادله به شکل ساده زیر در می‌آید:

$$w = \left(\frac{9 V_{mMax} / \pi}{(\Delta P / \tau_y)^2} \right)^{1/3} \quad (19)$$

با وجود فرض‌هایی که در توسعه این مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توان گفت که نتایج این مدل می‌تواند با دقت خوبی بدون نیاز به استفاده از نمودارهای مرجع در پیش‌بینی میزان بازشدگی شکاف‌ها کمک کند. معادله‌ی درجه ۳ پیش‌بینی شده در این کار می‌تواند با سرعت و همچنین دقت مناسبی میزان بازشدگی شکاف‌های طبیعی را پیش‌بینی کند.

۸- مدل Razavi و همکاران

Razavi و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ [۱۴-۱۲] برای توصیف رفتار نفوذ گل حفاری بینگهام پلاستیک به شکاف مدلی ارائه کردند. در این مدل اثر نفوذ گل از دیواره‌های شکاف به درون سازند با اعمال معادله‌ی Carter و همکارانش در معادله‌ی اصلی در نظر گرفته شد. به منظور اطمینان از صحت و دقت این مدل مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی قبلی و همچنین دیتای واقعی صورت گرفت و بنا به ادعای این محققین در نظر گرفتن اثر نفوذ گل به درون سازند از دیواره‌های شکاف (Fluid Leak off) اثری مهم در افزایش دقت نتایج حاصل از این مدل داشته است. این افزایش دقت از این بابت حائز اهمیت است که مدل به دست آمده در تخمین سائیز شکاف (عرض شکاف) و بنابراین تخمین نوع مواد کنترل‌کننده هرزروی گل و همچنین در شبیه‌سازی‌های مخزنی و طراحی چاه تاثیر بسزایی دارد. همچنین این مدل‌ها اطلاعات مهمی را در اختیار ما قرار می‌دهند که در فرآیند شکاف‌زنی هیدرولیکی بسیار اهمیت دارند.

مدل به دست آمده بر پایه معادله‌ی Lietard و همکارانش در سال ۱۹۹۹ و به شکل یک معادله دیفرانسیل است. این محققین این معادله را برای هر دو حالت جریان خطی و جریان شعاعی به دست آورده‌اند. معادله‌ی زیر برای حالتی است که جریان شعاعی در سیستم برقرار باشد:

$$\frac{dr_f}{dt} = \frac{w^2}{12\mu_p r_f \ln\left(\frac{r_w}{r_{in}}\right)} \left[\Delta p - \frac{3\tau_y}{w} (r_f - r_w) - \frac{24C_L \mu_p}{w^3} \int_{r_w}^{r_f} \frac{1}{r} \int_r^{r_f} \frac{r^*}{\sqrt{t - \tau(r^*)}} dr^* dr \right] \quad (20)$$

در این مدل فرض شد عرض شکاف در یک نقطه با فشار در همان نقطه رابطه‌ای خطی دارد. معادله‌ی زیر نشانگر این رابطه‌ی خطی است. همچنین در این مدل سطح اولیه‌ی شکاف صاف و یکنواخت در نظر گرفته شد:

$$w = w_0 + \frac{P}{K_n} \xrightarrow{\text{yields}} \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{K_n} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (16)$$

در این معادله P فشار در نقطه مورد نظر از شکاف، K_n ضریب سختی نرمال شکاف، w_0 طول دهانه شکاف در فشار صفر و w هم طول دهانه شکاف نقطه مورد نظر از شکاف است. معادله‌ی زیر، معادله‌ی اصلی مدل Lavrov and Tronvoll است. این معادله دبی هرزروی گل را به سایر پارامترهای آن (نظیر تغییر فشار مقطعی گل و خواص رئولوژی آن) مرتبط می‌کند:

$$q = - \frac{2\pi r_w n w^{(2n+1)/n} \frac{\partial P}{\partial r} \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right|^{(1-n)/n}}{(2n+1) 2^{(n+1)/n} K_{ci}^{1/n}} \quad (17)$$

در این رابطه q نرخ نفوذ گل حفاری و K_{ci} ضریب توصیف‌کننده حرکت‌پذیری گل حفاری (Mobility) است. بر اساس این مدل رئولوژی گل، طول شکاف، فشار سازند، فشار ته‌چاهی و عرض اولیه دهانه شکاف پارامترهای موثر بر هرزروی گل می‌باشند. میزان هرزروی گل با افزایش طول شکاف، افزایش عرض شکاف و افزایش اختلاف فشار (اختلاف بین فشار گل حفاری و فشار سیال سازند) افزایش می‌یابد.

رئولوژی گل، خود وابسته به دو پارامتر ضریب K_{ci} و نقطه واروی گل (Yield Point) است. ضریب K_{ci} توصیف‌کننده حرکت‌پذیری گل حفاری (Mobility) و نقطه واروی گل توصیف‌کننده پایان فرآیند نفوذ گل حفاری است. زمان هرزروی گل با کاهش ضریب K_{ci} و کاهش نقطه واروی گل افزایش می‌یابد.

۹- مدل Huang و همکاران

در مهندسی حفاری برای تصمیم‌گیری سریع و درست احتیاج به روش‌هایی سریع و در عین حال دقیق است. نمودارهای مرجع (Type Curves) دقت و سرعت کافی را ندارند. بدین منظور Huang و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۹] بر پایه مدل Lietard و همکاران و با تحلیلی تقریباً مشابه آنها فرآیند نفوذ گل حفاری غیرنیوتنی به شکاف افقی را بررسی کردند. این مدل به شکل یک معادله‌ی درجه ۳ است و ۳ ریشه دارد. از ۳ ریشه‌ی این معادله قطعا ۱ ریشه مثبت و حقیقی است. این ریشه جواب مسئله و طول دهانه شکاف مورد نظر است:

$$\left(\frac{\Delta P}{\tau_y} \right)^2 w^3 + 6r_w \left(\frac{\Delta P}{\tau_y} \right) w^2 - \left(\frac{9}{\pi} \right) V_{mMax} = 0 \quad (18)$$

و معادله‌ی زیر برای حالتی است که جریان خطی در سیستم برقرار باشد:

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{w^2}{12\mu_p x_f} \left[\Delta p - \frac{3\tau_y}{w} x_f - \frac{24C_L \mu_p}{w^3} \int_0^{x_f} \int_x^{x_f} \frac{r^*}{\sqrt{t - \tau(x^*)}} dx^* dx \right] \quad (21)$$

در این روابط τ_f شعاع نفوذ گل حفاری به درون شکاف، C_L ضریب نفوذ گل به درون سازند و x_f طول نفوذ گل حفاری به درون شکاف است.

بنا به نتایج به‌دست آمده، مدل جریان خطی مقدار گل حفاری هدر رفته را کمتر از مقدار واقعی و مدل جریان شعاعی این مقدار را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. در انتهای فرآیند نفوذ گل حفاری (زمانی که زمان به سمت بی‌نهایت میل کند و شعاع نفوذ گل به مقدار

حدی خود برسد) در صورت در نظر نگرفتن نفوذ گل به سازند (از دیواره‌های شکاف) مقدار گل حفاری نفوذ یافته (برای هر دو مدل) از مقدار واقعی بیشتر است. نتایج حاصل از استفاده این مدل با داده‌های واقعی میدان مقایسه و تطابق خوبی با داده‌های میدانی به‌دست آمد. دلیل این تطابق خوب به‌دلیل در نظر گرفتن نفوذ گل از دیواره شکاف به درون سازند در این مدل است.

۹- مدل Bychina و همکاران

Bychina و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۱۶] بر مبنای تحقیقات Lavrov and Tronvoll برای توصیف فرآیند نفوذ گل حفاری به درون سازند معادله‌ای

مقایسه نقاط قوت و ضعف مدل‌های مهم ارائه شده در کارهای گذشته برای ارزیابی شکاف‌های طبیعی با استفاده از داده‌های هرزروی گل

نام مدل	نوع بررسی	وضعیت شکاف‌ها	نوع سیال	وضعیت چاه	نوآوری	چالش‌ها
Dyke و همکاران	کیفی	عمودی	۱. ارائه روشی برای افزایش دقت اندازه‌گیری حجم گل هدر رفته ۲. دسته‌بندی انواع شکاف طبیعی مخزن و ارائه روش مناسب برای کنترل هریک از آنها ۳. توصیف کیفی فرآیند نفوذ گل به شکاف‌ها	در حالت حفاری غیرخشکی به‌دلیل امواج دریا و تکان خوردن دکل دقت اندازه‌گیری به‌شدت پایین آمد (تا دقت ۲ بشکوه).
Sanfillippo و همکاران	کمی		نیوتنی	عمودی	ارائه مدل کمی برای اولین بار در این حوضه	در نظر نگرفتن مواردی چون: تغییر شکل‌پذیری شکاف‌ها و نفوذپذیری شکاف‌ها
Lietard و همکاران	کمی	تغییر شکل ناپذیر با عرض ثابت، نفوذ ناپذیر	نیوتنی و غیرنیوتنی	عمودی	۱. بررسی اثر سیال غیرنیوتنی (علاوه بر سیال نیوتنی) بر فرآیند نفوذ ۲. بررسی شکاف‌های جهت‌دار	در نظر نگرفتن مواردی چون: تغییر شکل‌پذیری شکاف‌ها و نفوذپذیری شکاف‌ها
Sawaryn	کمی	تغییر شکل ناپذیر با عرض ثابت، نفوذ ناپذیر	غیرنیوتنی	عمودی	۱. ارائه معادله‌ای ساده برای سیالات غیرنیوتنی مدل Lietard و همکاران	در نظر نگرفتن مواردی چون: تغییر شکل‌پذیری شکاف‌ها و نفوذپذیری شکاف‌ها
Rasmussen and Civan	کمی	تغییر شکل ناپذیر با عرض ثابت، نفوذ ناپذیر	غیرنیوتنی	عمودی	۱. ارائه معادله‌ای ساده برای سیالات غیرنیوتنی مدل Lietard و همکاران	در نظر نگرفتن مواردی چون: تغییر شکل‌پذیری شکاف‌ها و نفوذپذیری شکاف‌ها
Lavrov and Tronvoll	کمی	تغییر شکل‌پذیر با عرض غیر ثابت، نفوذ ناپذیر	غیر نیوتنی	عمودی	۱. در نظر گرفتن اثر تغییر شکل شکاف با فشار	در نظر نگرفتن نفوذپذیری شکاف‌ها
Huang و همکاران	کمی	تغییر شکل ناپذیر با عرض ثابت، نفوذ ناپذیر	غیرنیوتنی	عمودی	۱. جواب تقریباً دقیق با سرعت بالا با ارائه معادله‌ای درجه ۳ به عنوان جایگزین نمودارهای مرجع (Type Curves)	کاهش دقت مدل با فرضیات ساده‌ساز و در نظر نگرفتن مواردی چون: تغییر شکل شکاف و نفوذپذیری شکاف
Razavi و همکاران	کمی	تغییر شکل‌پذیر با عرض غیر ثابت، نفوذ پذیر	غیرنیوتنی	عمودی	۱. در نظر گرفتن اثر نفوذ گل از دیواره شکاف به سازند	رای انواع گل حفاری پاسخگو نیست. معادله‌ی نفوذ گل حفاری از دیواره شکاف به سازند معادله‌ای ساده است.
Bychina و همکاران	کمی	تغییر شکل‌پذیر با عرض غیر ثابت، نفوذ پذیر	انواع گل حفاری	عمودی	۱. در نظر گرفتن انواع گل حفاری	اثر جاذبه را نادیده می‌گیرد (تنها برای شکاف‌های افقی مناسب است)

عامل مخالف است بنابراین دبی گل در حال نفوذ به سازند به تدریج کاهش یافته و در نهایت پس از مدتی ثابت می‌شود. به‌طور کلی کاهش فشار سازند، کاهش نقطه واروی گل، کاهش اندیس رفتار سیال (Fluid Behavior Index)، کاهش اندیس ثبات گل (Consistency Index) و افزایش سایز اولیه شکاف، هرزروی گل افزایش می‌یابد. به‌طور خلاصه جدول ۱ مقایسه نقاط قوت و ضعف مدل‌های مهم ارائه شده در کارهای گذشته برای ارزیابی شکاف‌های طبیعی با استفاده از داده‌های هرزروی گل را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌های مهم ارائه شده در کارهای گذشته برای ارزیابی شکاف‌های طبیعی با استفاده از داده‌های هرزروی گل معرفی شد و همچنین نقاط قوت و ضعف هر کدام از این مدل‌ها مورد بحث قرار گرفت. بر اساس فرض‌های استفاده شده در توسعه این مدل‌ها می‌توان گفت که مدل‌های Lavrov و Tronvoll یکی از کامل‌ترین مدل‌های موجود است که تقریباً اکثر حالات مختلف را در نظر گرفته و بیشتر از سایرین به واقعیت نزدیک شده است. با این حال همچنان مواردی در مدل‌سازی‌ها بررسی نشده باقی مانده‌اند که عبارتند از:

- ۱- بررسی اثر تراوایی در دیواره‌ی شکاف
- ۲- بررسی اثر سر خوردن سیال روی دیواره‌ها
- ۳- بررسی فرآیند نفوذ گل به شکاف‌های مصنوعی و عوامل موثر بر آن
- ۴- بررسی اثر سیال سازند و تاثیر آن روی فرآیند هرزروی گل

به‌دست آوردند. این معادله یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی است و در آن تغییر شکل شکاف بر اثر فشار وارده و نفوذ گل حفاری از طریق دیواره‌ها در نظر گرفته شد. همچنین این معادله به صورتی به‌دست آمد که در آن اثرات انواع سیال حفاری در نظر گرفته شد. نحوه حل این معادله به صورت عددی به روش تفاضل محدود ضمنی (Explicit Finite Difference) است. درستی معادله در این تحقیق با اعمال فرضیات تحقیقات دیگر، اعمال آن در این معادله و مقایسه نتایج حاصل با نتایج تحقیقات به‌دست آمد. علی‌رغم نتایج خوبی که این معادله به‌دست می‌دهد همچنان فرضیات ساده‌ساز (اعم از سیال تراکم‌ناپذیر و یا صرف‌نظر از اثر جاذبه) آن را کمی از واقعیت دور می‌کند ولی با این حال نتایج این معادله از معادلات قبلی دقیق‌تر است. اثر تغییر شکل شکاف و تغییر عرض شکاف همانند معادلات Lavrov and Tronvoll در نظر گرفته شد. اثر سیالات گوناگون با اعمال رابطه‌ی عمومی تنش برشی-سرعت در معادله سرعت-فشار در نظر گرفته شد. معادله دیفرانسیل کلی به شرح زیر است:

$$\left[\frac{m}{(2m+1) \cdot k^{\frac{1}{m}} \cdot 2^{1+\frac{1}{m}}} \cdot \left(-\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{(2m+1)}{m+1} \cdot \frac{(2\tau_y)}{w} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot w^{1+\frac{1}{m}} \right] \cdot \left[\frac{2m+1}{m \cdot k} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{m} \cdot w \cdot \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{(2m+1)}{m+1} \cdot \frac{(2\tau_y)}{w^2} \cdot \frac{1}{k_n} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{k_n} \frac{\partial p}{\partial t} = -2q \quad (22)$$

بر مبنای این تحقیق رئولوژی گل حفاری، هندسه شکاف و فشار سازند سه عامل مهم و موثر بر رفتار هدر روی گل هستند. در این فرآیند اختلاف بین فشار سیال سازند و گل عامل موافق و نقطه واروی گل

منابع

- [1]. Carter, R. J. A. I. o. O. F. C. f. F. E., "Drilling, et al. (1957). "Derivation of the general equation for estimating the extent of the fractured area." 261-269.
- [2]. Dyke, C., et al. (1995). "Advances in characterising natural fracture permeability from mud log data." SPE Formation Evaluation 10(03): 160-166.
- [3]. Sanfillippo, F., et al. (1997). Characterization of conductive fractures while drilling. SPE European formation damage conference, Society of Petroleum Engineers.
- [4]. Liétard, O., et al. (1998). "Design, execution and evaluation of acid treatments of naturally fractured carbonate, oil reservoirs of the North Sea." 13(02): 133-140.
- [5]. Liétard, O., et al. (1999). "Fracture width logging while drilling and drilling mud/loss-circulation-material selection guidelines in naturally fractured reservoirs (includes associated papers 75283, 75284, 81590 and 81591)." SPE drilling & completion 14(03): 168-177.
- [6]. Lavrov, A. and J. Tronvoll (2004). Modeling mud loss in fractured formations. Abu Dhabi international conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- [7]. Lavrov, A. and J. Tronvoll (2005). Mechanics of borehole ballooning in naturally-fractured formations. SPE middle east oil and gas show and conference, Society of Petroleum Engineers.
- [8]. Lavrov, A. and J. Tronvoll (2006). Numerical analysis of radial flow in a natural fracture: applications in drilling performance and reservoir characterization. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Society of Petroleum Engineers.
- [9]. Huang, J., Griffiths, D. V., & Wong, S.-W. (2011). "Characterizing natural-fracture permeability from mud-loss data." SPE Journal 16(01): 111-114.
- [10]. Sawaryn, S.J. (2001). "Discussion of Fracture Width Logging While Drilling and Drilling Mud/Loss-Circulation-Material Selection Guidelines in Naturally Fractured Reservoirs". SPE Drill & Compl 16 (4): 268-269.
- [11]. Civan, F. and Rasmussen, M.L. (2002). "Further Discussion of Fracture Width Logging While Drilling and Drilling Mud/Loss-Circulation-Material Selection Guidelines in Naturally Fractured Reservoirs." SPE Drill & Compl 17 (4): 249-250.
- [12]. Razavi, O., et al. (2015). How to effectively strengthen wellbores in narrow drilling margin wells: an experimental investigation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- [13]. Razavi, O., et al. (2016). "Optimum particle size distribution design for lost circulation control and wellbore strengthening." 35: 836-850.
- [14]. Razavi, O., et al. (2017). Characterization of Naturally Fractured Reservoirs Using Drilling Mud Loss Data: The Effect of Fluid Leak-Off. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
- [15]. Razavi, O., et al. (2017). "Comprehensive analysis of initiation and propagation pressures in drilling induced fractures." 149: 228-243.
- [16]. Bychina, M., Thomas, G. M., Khandelwal, R., & Samuel, R. (2017). "A Robust Model to Estimate the Mud Loss into Naturally Fractured Formations". Society of Petroleum Engineers.