۵- رویداد پنجم؛ فوران[1] چاه

در جریان عملیات حفاری جهت‌دار[2] یک چاه در سازند آسماری و در عمق حدود ۲۶۱۰ متر، عملیات خارج کردن رشته حفاری برای تعویض مته آغاز شد. در حین خارج کردن لوله‌ها، حجم آزادشده در چاه باید با گل حفاری[3] جایگزین می‌شد تا فشار هیدرواستاتیک ستون گل در محدوده لازم برای کنترل فشار سازند حفظ شود.

هم‌زمان با عملیات خارج کردن لوله‌ها[4] از داخل چاه به سمت سطح، بخشی از گل حفاری نیز دچار هرزروی[5] شد. کاهش نرخ پمپاژ گل و تغییر مسیر گردش آن میان مخازن موجب شد پایش حجم واقعی سیال موجود در چاه با اختلال مواجه شود. در ادامه، حجم جایگزین‌نشده ناشی از خارج کردن رشته حفاری و هرزروی گل، موجب کاهش سطح ستون گل و افت فشار هیدرواستاتیک شد.

با نزدیک‌شدن فشار ستون گل به فشار سیال سازند، شرایط برای ورود سیال سازند به داخل چاه فراهم شد. با وجود ادامه جریان چاه به سمت سطح، عملیات خارج کردن لوله‌ها ادامه یافت و گل حفاری نیز به میزان لازم جایگزین نشد. در نهایت، چاه در ساعت ۱۳:۰۲ دچار فوران شد و پس از آن آتش‌سوزی رخ داد.

گردآوری اطلاعات و تدوین رویداد دوم
محمد صالحی‌پور | زهرا نوروزی

۵-۱- سناریوی کامل رویداد

بر اساس برنامه چاه، عملیات حفاری جهت‌دار تا عمق حدود ۲۶۱۰ متر در سازند آسماری ادامه داشت. سازند، لایه یا مجموعه‌ای از لایه‌های سنگی زیرسطحی است که می‌تواند حاوی نفت، گاز یا آب باشد. حدود ساعت ۰۳:۱۸ بامداد روز رویداد، به‌منظور تعویض مته حفاری، عملیات خارج کردن لوله‌ها از چاه آغاز شد.

رشته حفاری از مجموعه‌ای از لوله‌های فولادی متصل به یکدیگر تشکیل شده است که مته و موتور حفاری درون‌چاهی[6] در انتهای آن قرار دارند. هنگام خارج کردن این رشته از چاه، حجمی که پیش‌تر توسط لوله‌ها اشغال شده بود آزاد می‌شود. برای حفظ حجم سیال داخل چاه، این حجم باید هم‌زمان با گل حفاری جایگزین شود.

گل حفاری علاوه بر انتقال خرده‌های حفاری به سطح، خنک‌کاری و روانکاری تجهیزات، یکی از اجزای اصلی کنترل فشار چاه است. ستون گل با ایجاد فشار هیدرواستاتیک، در برابر فشار سیالات موجود در سازند عمل می‌کند. بنابراین، کاهش

[1] Blowout
[2] Directional Drilling
[3] Drilling Mud
[4] Tripping Out
[5] Lost Circulation
[6] Downhole Motor

ارتفاع یا چگالی مؤثر ستون گل می‌تواند اختلاف فشار میان چاه و سازند را کاهش داده و شرایط ورود سیال سازند به چاه را فراهم کند.

عملیات خارج کردن رشته حفاری تا حدود ساعت ۱۰:۲۰ ادامه داشت. از ساعت ۱۰:۲۰ تا ۱۱:۱۶ نیز لوله‌ها از عمق حدود ۱۷۷۳ متر تا ۱۵۳۹ متر خارج شدند. در همین دوره، بخشی از گل حفاری دچار هرزروی شده بود؛ به این معنا که مقداری از گل به داخل شکاف‌ها و فضاهای موجود در سازند نفوذ کرده و از سیستم گردش خارج می‌شد.

در ساعت ۱۰:۲۰، نرخ پمپاژ گل کاهش یافت و سنسورهای پمپ مقادیری بین صفر تا شش استروک[1] را ثبت کردند. استروک، یک رفت‌وبرگشت کامل پمپ است و شمارش آن می‌تواند برای پایش میزان عملکرد و نرخ پمپاژ پمپ گل مورد استفاده قرار گیرد.

در این شرایط، مخزن ساکشن[2] به‌عنوان مخزن فعال[3] سیستم در نظر گرفته شده بود؛ به این معنی که پمپ‌های گل، سیال موردنیاز را از این مخزن برداشت می‌کردند و در شرایط عادی، گل بازگشتی از چاه نیز پس از عبور از تجهیزات سطحی مجدداً به مدار فعال بازمی‌گشت.

با این حال، در ساعت ۱۱:۱۶ جابه‌جایی گل از مخزن شن‌زدا[4] به مخزن میدل[5] آغاز شد. مخزن شن‌زدا بخشی از سامانه کنترل جامدات است که برای جداسازی ذرات نسبتاً درشت از گل حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. گل سپس از طریق باکس الک لرزان[6] عبور می‌کرد؛ تجهیزی که برای جداسازی خرده‌های حفاری و سایر ذرات جامد از سیال برگشتی استفاده می‌شود.

در ادامه این تغییر مسیر، گل برگشتی چاه به مخزن میدل هدایت شد و دیگر مستقیماً وارد مخزن ساکشن نمی‌شد. در نتیجه، چرخه‌ای که پیش‌تر امکان مقایسه برداشت و بازگشت گل از مخزن فعال را فراهم می‌کرد، تغییر کرد و سطح مخزن ساکشن دیگر الزاماً نمایانگر تغییر واقعی حجم سیال موجود در چاه نبود.

هم‌زمان، خارج کردن رشته حفاری ادامه داشت. بر اساس اطلاعات ثبت‌شده، حدود ۱۱ بشکه از حجم چاه بدون جایگزینی باقی ماند و با درنظرگرفتن هرزروی گل، این کمبود حجم به حدود ۱۸ بشکه رسید. این کاهش حجم، معادل افت حدود ۱۲۰ متر از ارتفاع ستون گل و در مجموع کاهش حدود ۱۶۴ پوند بر اینچ مربع از فشار هیدرواستاتیک گزارش شده است.

[1] Stroke
[2] Suction Tank
[3] Active Pit
[4] Desander Tank
[5] Middle Tank
[6] Shale Shaker

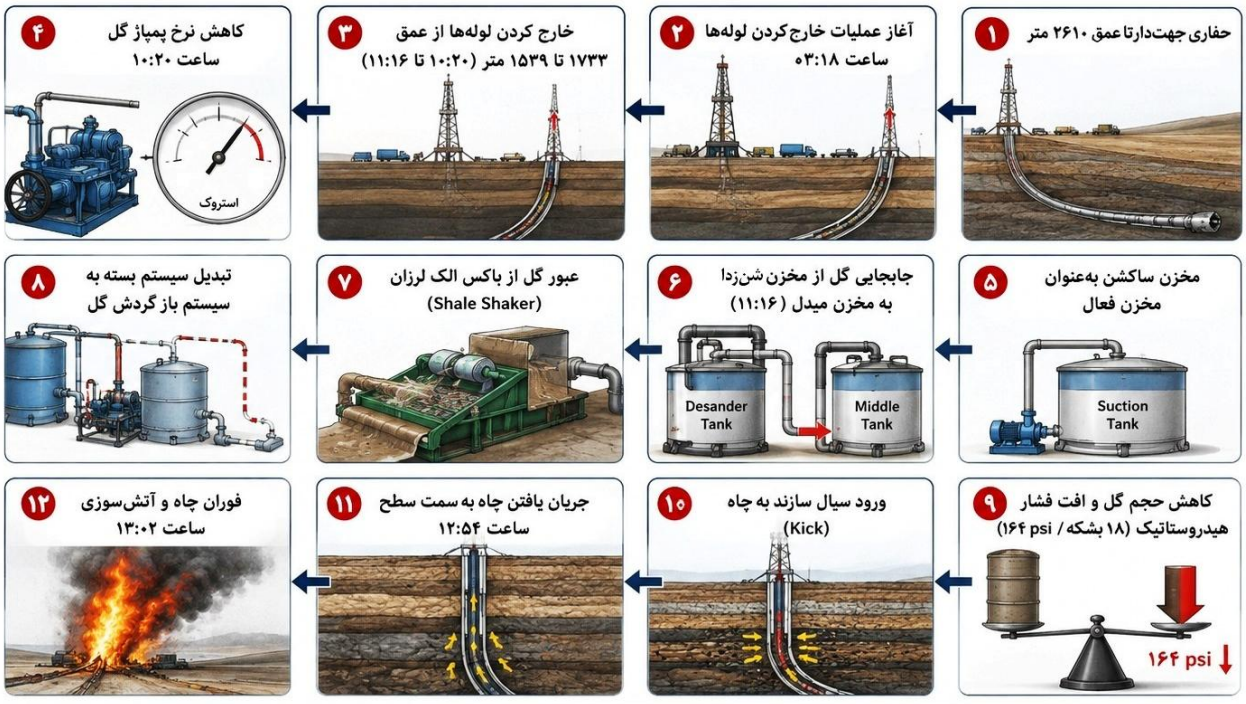
با کاهش فشار هیدرواستاتیک، فشار اعمال‌شده توسط ستون گل به فشار سیال سازند نزدیک شد. در چنین شرایطی، اگر فشار چاه از فشار سازند کمتر شود، سیال سازند می‌تواند وارد چاه شود. ورود ناخواسته سیال سازند به داخل چاه، کیک[1] نامیده می‌شود و یکی از مهم‌ترین نشانه‌های از دست رفتن اولیه کنترل فشار چاه است.

با وجود شکل‌گیری این شرایط، عملیات خارج کردن لوله‌ها ادامه یافت و حجم موردنیاز گل به میزان کافی وارد چاه نشد. در ساعت ۱۲:۵۴ نیز جریان چاه به سمت سطح ادامه داشت؛ وضعیتی که نشان‌دهنده تداوم ورود یا حرکت سیال در چاه بود.

در نهایت، در ساعت ۱۳:۰۲، کنترل فشار چاه از دست رفت و چاه دچار فوران شد. فوران، رهایش کنترل‌نشده سیال از چاه به سطح است که در صورت وجود هیدروکربن و منبع اشتعال می‌تواند به پیامدهایی مانند حریق و انفجار منجر شود. در این رویداد نیز پس از فوران، آتش‌سوزی رخ داد.

در این رویداد، فشار سیال سازند مخاطره اصلی بود؛ اما شرایط زمانی به فوران منجر شد که چند عامل به‌طور هم‌زمان شکل گرفتند: خارج کردن رشته حفاری، جایگزین‌نشدن کامل حجم آزادشده با گل، وقوع هرزروی، تغییر مسیر گردش گل و دشوارشدن پایش حجم واقعی سیال داخل چاه، کاهش فشار هیدرواستاتیک و در ادامه ورود سیال سازند به چاه.

شکل (۵-۱) می‌تواند توالی کامل رویداد را از آغاز عملیات خارج کردن لوله‌ها تا کاهش فشار هیدرواستاتیک، وقوع کیک و در نهایت فوران و آتش‌سوزی نشان دهد.



شکل (۵- ۱) سناریوی کامل و توالی مراحل وقوع رویداد پنجم

[1] Kick

۵-۲- تجهیزات و سیستم‌های مرتبط

در این رویداد، کاهش حجم گل داخل چاه و افت فشار هیدرواستاتیک، شرایط را برای ورود سیال سازند به چاه و شکل‌گیری کیک فراهم کرد. در چنین شرایطی، تشخیص به‌موقع تغییرات حجم سیال و فراهم‌بودن امکان بستن و کنترل چاه، دو وظیفه اساسی در جلوگیری از تبدیل کیک به فوران هستند.

دو تجهیز یا سامانه در این زمینه نقش مهمی دارند: سیستم فوران‌گیر چاه[۱] برای مهار و کنترل جریان چاه و مخزن تریپ[۲] برای پایش دقیق تغییرات حجم گل در عملیات خارج یا واردکردن رشته حفاری.

- سیستم فوران‌گیر چاه

سیستم فوران‌گیر چاه مجموعه‌ای از تجهیزات فشاربالا است که در دهانه چاه نصب می‌شود و وظیفه آن فراهم‌کردن امکان بستن چاه و کنترل جریان سیال سازند در شرایط غیرعادی، از جمله هنگام وقوع کیک است. مجموعه BOP می‌تواند شامل اجزایی مانند فوران‌گیر حلقوی[۳] ، رم لوله‌ای[۴]، رم کور[۵] و رم برشی[۶] باشد. هر یک از این اجزا برای شرایط مشخصی طراحی شده‌اند. فوران‌گیر حلقوی می‌تواند فضای حلقوی اطراف رشته حفاری را مسدود کند، در حالی که انواع رم[۷] با توجه به طراحی خود برای بستن اطراف لوله، مسدودکردن کامل دهانه یا در برخی آرایش‌ها بریدن رشته و بستن چاه به کار می‌روند.

هنگامی که نشانه‌های ورود سیال سازند به چاه شناسایی شوند، انتخاب و بسته‌شدن بخش مناسب BOP می‌تواند مسیر جریان را محدود یا مسدود کند و شرایط لازم را برای اجرای عملیات کنترل چاه فراهم سازد.

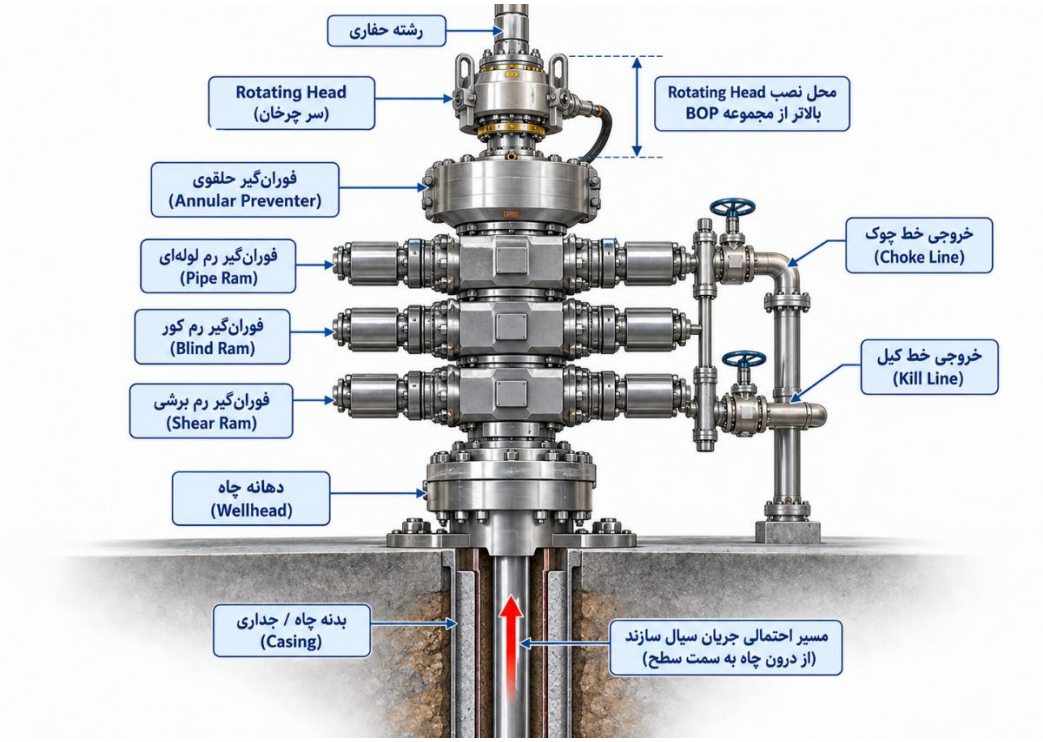
در این رویداد، اگر کیک در مراحل اولیه شناسایی و مجموعه BOP به‌موقع و مطابق رویه کنترل چاه فعال می‌شد، امکان جلوگیری از ادامه جریان کنترل‌نشده سیال سازند به سمت سطح و تبدیل شرایط به فوران وجود داشت. اثربخشی این سامانه به آماده‌به‌کاری تجهیزات، توانایی تشخیص کیک، انتخاب صحیح جزء مناسب BOP و اجرای به‌موقع عملیات کنترل چاه وابسته است.

سرِ چرخان[۸] نیز از تجهیزات مرتبط با کنترل جریان در دهانه چاه است که در برخی آرایش‌های عملیاتی در بالای مجموعه BOP نصب می‌شود. این تجهیز با ایجاد آب‌بندی در اطراف رشته حفاری، امکان هدایت و مدیریت جریان برگشتی را در شرایطی که رشته در حال حرکت یا چرخش است فراهم می‌کند.

---

[1] Blowout Preventer – BOP
[2] Trip Tank
[3] Annular Preventer
[4] Pipe Ram
[5] Blind Ram
[6] Shear Ram
[7] Ram
[8] Rotating Head

سرِ چرخان می‌تواند در برخی روش‌های حفاری و کنترل فشار، امکان مدیریت زودهنگام‌تر جریان چاه را فراهم سازد؛ بااین‌حال، نقش و ظرفیت آن نباید معادل مجموعه اصلی BOP در مهار شرایط فوران در نظر گرفته شود. شکل (۵-۲) می‌تواند آرایش مفهومی مجموعه BOP، اجزای اصلی آن و موقعیت سرِ چرخان نسبت به دهانه چاه را نشان دهد.



شکل (۵- ۲) اجزای اصلی سیستم فوران‌گیر چاه و موقعیت سرِ چرخان در مجموعه کنترل چاه

❖ مخزن تریپ

مخزن تریپ یک مخزن کوچک و مدرج در سیستم گل حفاری است که برای اندازه‌گیری دقیق حجم سیال واردشده به چاه یا خارج‌شده از آن، به‌ویژه هنگام عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری[1]، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگام خارج کردن رشته حفاری، حجم اشغال‌شده توسط بخش خارج‌شده از رشته باید با حجم متناظری از گل حفاری جایگزین شود. با استفاده از مخزن تریپ ، حجم گل موردنیاز برای پرکردن چاه می‌تواند با مقدار تئوری مورد انتظار مقایسه شود. هرگونه اختلاف غیرعادی میان این دو مقدار، نشانه‌ای است که باید از نظر احتمال ورود سیال سازند، هرزروی یا سایر تغییرات حجم در چاه بررسی شود.

[1] Tripping :
فرایند بیرون‌آوردن رشته حفاری از چاه یا پایین‌بردن دوباره آن به داخل چاه

به‌ویژه هنگام خارج کردن لوله‌ها، اگر چاه برای پرشدن کمتر از حجم محاسبه‌شده گل دریافت کند، این وضعیت می‌تواند یکی از نشانه‌های ورود سیال سازند به چاه باشد و نیازمند بررسی فوری شرایط کنترل چاه است.

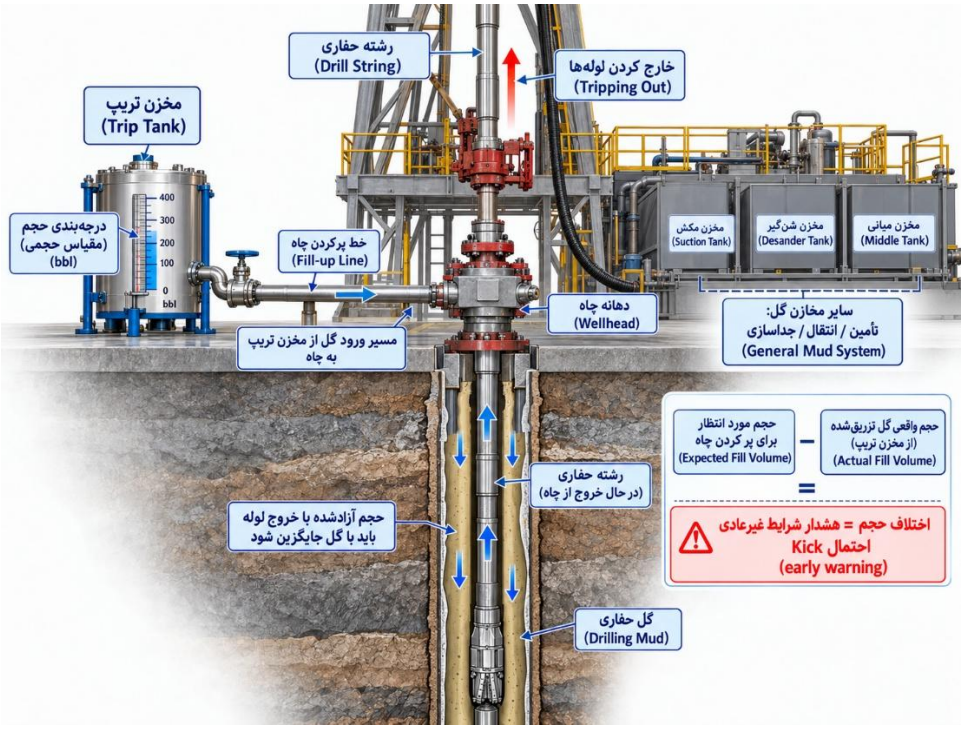
نقش مخزن تریپ با سایر مخازن گل متفاوت است. مخزن مکش[1] عمدتاً سیال موردنیاز پمپ‌های گل را تأمین می‌کند؛ مخزن ماسه‌گیر[2] در مدار کنترل جامدات و جداسازی ذرات قرار دارد و مخزن میانی[3] می‌تواند برای ذخیره یا انتقال گل در مدار مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، وظیفه اصلی مخزن تریپ در عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری، اندازه‌گیری دقیق و پایش تغییرات حجم چاه است.

در سناریوی این رویداد، تغییر مسیر گل برگشتی سبب شد سطح مخزن ساکشن دیگر به‌تنهایی شاخص قابل‌اعتمادی برای تغییر واقعی حجم سیال داخل چاه نباشد. استفاده صحیح از مخزن تریپ می‌توانست حجم واقعی گل موردنیاز برای جایگزینی رشته خارج‌شده را مستقل‌تر و با دقت بیشتری پایش کند و اختلاف میان حجم محاسبه‌شده و حجم واقعی را در مراحل اولیه آشکار سازد.

- به این ترتیب، مخزن تریپ در وهله نخست یک ابزار پایش و تشخیص شرایط غیرعادی است، در حالی که BOP پس از شناسایی کیک، امکان مهار جریان و اجرای عملیات کنترل چاه را فراهم می‌کند.

شکل (۵-۳) می‌تواند ارتباط مخزن تریپ با چاه در حین عملیات خارج کردن رشته و نحوه مقایسه حجم واقعی گل مصرف‌شده با حجم مورد انتظار را نشان دهد.

[1] Suction Tank
[2] Desander Tank
[3] Middle Tank



شکل (۵- ۳) نحوه استفاده از مخزن تریپ برای پایش حجم گل هنگام خارج کردن رشته حفاری

۵-۳- پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی

در این رویداد، کاهش حجم گل حفاری و در نتیجه افت فشار هیدرواستاتیک، موجب شد فشار ستون سیال چاه به فشار سیال سازند نزدیک شود و شرایط برای ورود سیال سازند به چاه فراهم گردد. بااین‌حال، هنگام حرکت رشته حفاری درون چاه، علاوه بر فشار هیدرواستاتیک، اثرات دینامیکی ناشی از حرکت لوله‌ها نیز می‌توانند فشار ته‌چاه را به‌طور موقت کاهش یا افزایش دهند. دو پدیده مهم در این زمینه، فشار مکشی[1] و فشار رانشی[2] هستند.

- فشار مکشی

هنگام خارج کردن رشته حفاری از چاه، حرکت رو به بالای لوله‌ها موجب جابه‌جایی گل حفاری در فضای حلقوی اطراف رشته می‌شود. اگر سرعت خارج کردن لوله‌ها زیاد باشد یا فضای عبور سیال محدودیت بیشتری داشته باشد، حرکت رشته می‌تواند افت فشاری موقت در بخش‌های پایین‌تر چاه ایجاد کند. این کاهش فشار دینامیکی با عنوان فشار مکشی شناخته می‌شود.

در شرایط عادی، فشار هیدرواستاتیک ستون گل باید به‌اندازه‌ای باشد که از ورود سیال سازند به چاه جلوگیری کند. ایجاد فشار مکشی موجب کاهش فشار مؤثر ته‌چاه و در نتیجه کاهش حاشیه ایمنی میان فشار چاه و فشار سازند می‌شود.

[1] Swab Pressure
[2] Surge Pressure

اگر فشار ته‌چاه در اثر ترکیب کاهش سطح ستون گل و اثر مکش[1] به کمتر از فشار سازند برسد، سیال سازند می‌تواند وارد چاه شود و شرایط کیک شکل گیرد. بنابراین، هرچه اختلاف میان فشار هیدرواستاتیک و فشار سازند کمتر باشد، اثر افت فشار ناشی از مکش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

در عملیات خارج کردن رشته حفاری، کنترل سرعت حرکت لوله‌ها یکی از عوامل مؤثر در محدودکردن فشار مکشی است. بااین‌حال، کاهش سرعت رشته جایگزین جبران حجم آزادشده در چاه نیست و حجم ناشی از خارج شدن رشته همچنان باید به‌موقع با گل حفاری جایگزین شود.

- ❖ فشار رانشی

پدیده معکوس در هنگام وارد کردن رشته حفاری به داخل چاه رخ می‌دهد. حرکت رو به پایین رشته، گل حفاری را در فضای حلقوی جابه‌جا می‌کند و مقاومت سیال در برابر این جابه‌جایی می‌تواند موجب افزایش موقت فشار ته‌چاه شود. این افزایش فشار دینامیکی فشار رانشی نامیده می‌شود.

- ❖ مقدار فشار رانشی به عواملی مانند سرعت حرکت رشته، هندسه چاه و فضای حلقوی، خواص رئولوژیکی[2] گل و شرایط جریان وابسته است. افزایش بیش‌ازحد این فشار می‌تواند فشار وارد بر سازند را افزایش دهد.

اگر مجموع فشار هیدرواستاتیک و افزایش فشار ناشی از رانش[3] از حد تحمل سازند فراتر رود، احتمال ایجاد یا گسترش مسیرهای جریان در سازند و در نتیجه وقوع هرزروی گل افزایش می‌یابد. ازاین‌رو، حرکت بسیار سریع رشته نه‌تنها هنگام خارج کردن، بلکه هنگام وارد کردن آن نیز می‌تواند تعادل فشار چاه را مختل کند.

در یک عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری ایمن، سرعت حرکت رشته، حجم گل واردشده یا خارج‌شده از چاه و وضعیت فشار چاه باید به‌صورت هم‌زمان کنترل شوند. هنگام بیرون‌آوردن رشته حفاری، کنترل سرعت رشته می‌تواند اثر فشار مکشی را کاهش دهد و جایگزینی صحیح حجم گل نیز از افت فشار هیدرواستاتیک جلوگیری می‌کند.

در سناریوی این رویداد، فشار هیدرواستاتیک ستون گل به فشار سازند نزدیک شده بود. در چنین شرایطی، هرگونه افت فشار اضافی ناشی از مکش می‌توانست حاشیه کنترل چاه را بیشتر کاهش داده و شرایط ورود سیال سازند به چاه را مساعدتر کند.

شکل (۵-۴) می‌تواند تغییر فشار ته‌چاه در هنگام حرکت رو به بالا و پایین رشته حفاری و تفاوت اثر مکش و رانش را به‌صورت شماتیک نشان دهد.

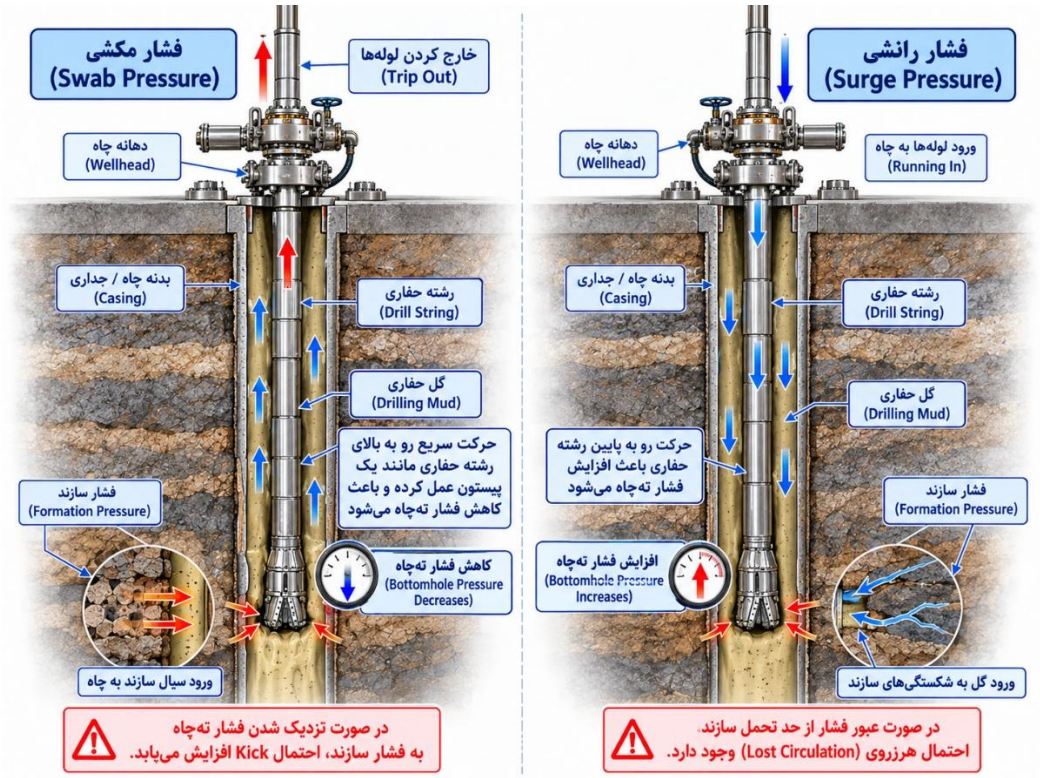
---

[1] Swab

[2] Rheological :

ویژگی‌هایی که نحوه جریان یافتن و تغییرشکل یک ماده تحت اعمال نیرو یا تنش را توصیف می‌کنند.

[3] Surge



شکل (۵- ۴) مقایسه اثر فشار مکشی و فشار رانشی بر فشار ته‌چاه هنگام حرکت رشته حفاری

۵-۴-تحلیل پاپیونی

در این تحلیل، «ورود سیال سازند به داخل چاه (کیک)» به‌عنوان رویداد مرکزی انتخاب شده است. این رویداد نقطه‌ای است که در آن تعادل فشاری موردنیاز برای کنترل اولیه چاه از دست رفته و سیال سازند وارد چاه می‌شود.

پیش از وقوع رویداد مرکزی، دو تهدید اصلی در سناریو قابل شناسایی است. نخست، تزریق ناکافی حجم گل حفاری هنگام خارج کردن رشته است که موجب کاهش ارتفاع ستون گل و در نتیجه افت فشار هیدرواستاتیک می‌شود. دوم، شکست سازند و ایجاد مسیر برای هرزروی گل است که با کاهش حجم سیال داخل چاه می‌تواند فشار هیدرواستاتیک را بیشتر کاهش دهد.

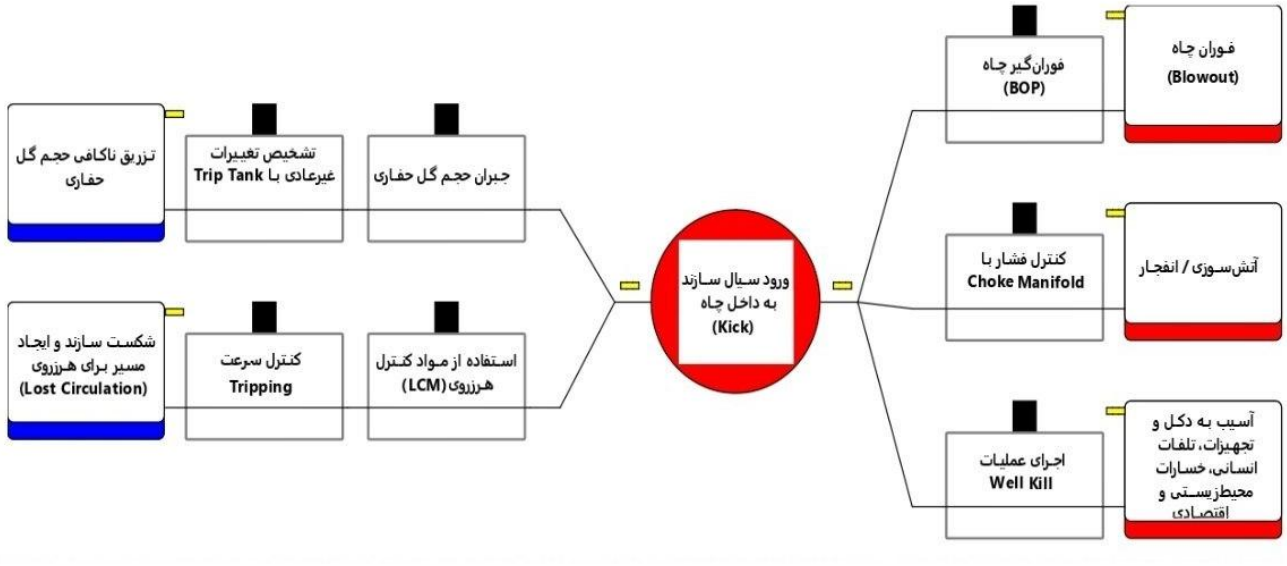
برای کنترل این تهدیدها، پایش دقیق حجم گل با مخزن تریپ، کنترل سرعت خارج کردن رشته حفاری، جایگزینی به‌موقع حجم آزادشده با گل و در صورت وقوع هرزروی، استفاده از مواد کنترل هرزروی[1] از موانع پیشگیرانه به شمار می‌آیند. کنترل سرعت عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری به کاهش اثر فشار مکشی کمک می‌کند و جبران صحیح حجم گل نیز نقش مستقیم در حفظ فشار هیدرواستاتیک ستون سیال دارد.

[1] Lost Circulation Material – LCM :
موادی که به سیال حفاری افزوده می‌شوند تا با مسدود کردن یا پل‌زدن در مسیرهای هرزروی، از ادامه اتلاف گل حفاری به داخل سازند جلوگیری کنند.

پس از وقوع کیک، در صورت نبود کنترل مؤثر، ورود سیال سازند می‌تواند ادامه یافته و به فوران چاه منجر شود. رهایش کنترل‌نشده هیدروکربن در سطح نیز در صورت وجود منبع اشتعال می‌تواند به آتش‌سوزی یا انفجار منتهی شود و آسیب به دکل و تجهیزات، تلفات انسانی و پیامدهای محیط‌زیستی و اقتصادی را در پی داشته باشد.

در این مرحله، مجموعه BOP، مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان[1] و عملیات مهار چاه[2] از مهم‌ترین موانع کاهنده پیامد هستند. BOP امکان بستن و مهار جریان چاه را فراهم می‌کند، مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان برای هدایت و کنترل جریان و فشار پس از بستن چاه به کار می‌رود و عملیات مهار چاه با بازگرداندن شرایط فشاری مناسب، ورود بیشتر سیال سازند را متوقف می‌کند.

شکل (۵-۵)، شماتیک نمودار تحلیل پاپیونی این رویداد را نشان می‌دهد و ارتباط میان تهدیدها، موانع پیشگیرانه، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع کاهنده را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد.



شکل (۵- ۵) نمودار تحلیل پاپیونی رویداد پنجم؛ ورود سیال سازند به داخل چاه

۵-۵- لایه‌های حفاظت در برابر وقوع و گسترش حادثه

لایه‌های حفاظتی این رویداد با دو هدف اصلی عمل می‌کنند: نخست، جلوگیری از کاهش کنترل فشار چاه و شکل‌گیری کیک و دوم، مهار کیک پس از وقوع و جلوگیری از تبدیل آن به فوران و گسترش پیامدهای بعدی.

- ۵-۵-۱- لایه‌های حفاظتی پیشگیرانه
- پایش تغییرات حجم با مخزن تریپ

[1] Choke Manifold
[2] Well Kill

مخزن تریپ امکان اندازه‌گیری دقیق حجم گل موردنیاز برای پرکردن چاه هنگام عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری را فراهم می‌کند. مقایسه حجم مورد انتظار با حجم واقعی می‌تواند تغییرات غیرعادی را در مراحل اولیه آشکار سازد و فرصت لازم برای توقف عملیات و بررسی وضعیت چاه را فراهم کند.

در این رویداد، استفاده صحیح از مخزن تریپ می‌توانست نشان دهد که حجم گل واردشده به چاه با حجم مورد انتظار ناشی از خروج رشته و شرایط واقعی چاه مطابقت ندارد.

- کنترل سرعت عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری

سرعت خارج کردن رشته حفاری یکی از عوامل مؤثر بر مقدار فشار مکشی است. افزایش بیش‌ازحد سرعت حرکت رو به بالای رشته می‌تواند افت فشار دینامیکی بیشتری در ته‌چاه ایجاد کند.

کنترل مناسب سرعت خارج کردن لوله‌ها می‌تواند این افت فشار اضافی را کاهش دهد و از کم‌شدن بیشتر حاشیه میان فشار ته‌چاه و فشار سازند جلوگیری کند.

- جبران حجم گل حفاری

هنگام خارج کردن رشته حفاری، حجم آزادشده در چاه باید به‌موقع با گل حفاری جایگزین شود. این اقدام برای حفظ ارتفاع ستون گل و فشار هیدرواستاتیک ضروری است.

در سناریوی این رویداد، جبران‌نشدن کامل حجم آزادشده یکی از عوامل اصلی کاهش فشار ستون گل بود. بنابراین، پایش و تأمین مستمر حجم موردنیاز گل از مهم‌ترین لایه‌های پیشگیرانه در عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری محسوب می‌شود.

- استفاده از مواد کنترل هرزروی

در صورت ایجاد مسیرهای هرزروی در سازند، مواد کنترل هرزروی می‌توانند برای کاهش یا مسدودکردن این مسیرها مورد استفاده قرار گیرند. کاهش هرزروی باعث حفظ بهتر حجم گل داخل چاه و جلوگیری از افت بیشتر فشار هیدرواستاتیک می‌شود.

۵-۵-۲- لایه‌های حفاظتی کاهنده پیامد

- سیستم فوران‌گیر چاه

پس از شناسایی کیک، مجموعه BOP یکی از مهم‌ترین تجهیزات برای جلوگیری از ادامه جریان کنترل‌نشده سیال سازند به سمت سطح است. با بسته‌شدن جزء مناسب BOP، مسیر جریان چاه محدود یا مسدود شده و شرایط برای اجرای اقدامات بعدی کنترل چاه فراهم می‌شود.

اثربخشی این لایه به تشخیص به‌موقع کیک، آماده‌به‌کاری مجموعه BOP و اجرای صحیح عملیات بستن چاه وابسته است.

- کنترل فشار با مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان

پس از بسته‌شدن چاه، لازم است فشار و جریان سیال به‌صورت کنترل‌شده مدیریت شود. مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان امکان هدایت سیال خروجی از چاه و تنظیم جریان از طریق Choke را فراهم می‌کند و به کنترل فشار چاه در طول عملیات کنترل چاه کمک می‌کند.

- اجرای عملیات مهار چاه

پس از مهار اولیه کیک، باید شرایطی ایجاد شود که فشار داخل چاه مجدداً بتواند در برابر فشار سازند مقاومت کند. در عملیات مهار چاه، با استفاده از روش مناسب کنترل چاه، گردش سیال یا تزریق گل با مشخصات مناسب، شرایط فشاری لازم برای توقف ورود سیال سازند ایجاد می‌شود.

۵-۶- ارتباط رویداد با عناصر مدیریت ایمنی فرآیند

بررسی سناریوی رویداد، شرایط عملیاتی چاه و لایه‌های حفاظتی نشان می‌دهد که کنترل این رویداد تنها به وجود تجهیزات عملیات مهار چاه وابسته نبود. اجرای صحیح عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری، دسترسی به اطلاعات معتبر و به‌روز و توانایی تیم حفاری در تشخیص و واکنش به شرایط غیرعادی نیز در جلوگیری از شکل‌گیری کیک و گسترش آن به فوران اهمیت داشت.

بر این اساس، مهم‌ترین عوامل مدیریتی و سازمانی مرتبط با این رویداد، مطابق جدول (۵-۱)، در ارتباط با عناصر مدیریت ایمنی فرایند تحلیل می‌شوند.

جدول (۵- ۱) مهم‌ترین عوامل مدیریتی و سازمانی مرتبط با عناصر مدیریت ایمنی فرایند مبتنی بر ریسک در رویداد پنجم

شماره و عنوان المان		توضیحات مربوط به حادثه
۸	دستورالعمل‌های عملیاتی	عملیات خارج کردن لوله‌ها نیازمند تعریف روشن الزامات مربوط به سرعت خارج کردن رشته، حجم گل موردنیاز برای پرکردن چاه، پارامترهای قابل پایش و معیارهای توقف عملیات است. دستورالعمل عملیاتی باید مشخص کند در صورت مشاهده اختلاف میان حجم مورد انتظار و حجم واقعی گل، جریان غیرعادی چاه یا سایر نشانه‌های کیک، عملیات در چه شرایطی متوقف و اقدامات کنترل چاه چگونه آغاز شود.
۱۵	اجرای عملیات[1]	در این رویداد، هم‌زمان با کاهش نرخ پمپاژ، تغییر مسیر گردش گل، جبران‌نشدن حجم موردنیاز و کاهش حاشیه فشار هیدرواستاتیک، عملیات خارج کردن لوله‌ها ادامه یافت. اجرای عملیات مستلزم پایش مستمر وضعیت واقعی چاه، توجه به تغییرات و انحرافات

[1] Conduct of Operations

		عملیاتی و تبدیل اطلاعات موجود به تصمیم و اقدام به‌موقع است. توقف عملیات در شرایط غیرعادی می‌توانست فرصت بیشتری برای تشخیص و کنترل کیک فراهم کند.
۶	مدیریت دانش فرایند[1]	کنترل چاه به اطلاعات صحیح و به‌روز درباره فشار سازند، مشخصات گل حفاری، فشار هیدرواستاتیک، حجم چاه، حجم موردنیاز برای پرکردن چاه، میزان هرزروی و شرایط عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری وابسته است. مدیریت دانش فرایند باید اطمینان دهد که این اطلاعات به‌صورت صحیح، قابل دسترس و در زمان مناسب در اختیار افراد مسئول قرار گرفته و مبنای تصمیم‌گیری عملیاتی باشند. در این سناریو، درک ارتباط میان کاهش حجم گل، هرزروی و کاهش فشار هیدرواستاتیک برای تشخیص شرایط ناپایدار چاه اهمیت داشت.
۳	شایستگی ایمنی فرایند[2]	وجود BOP، مخزن تریپ و سایر تجهیزات کنترل چاه به‌تنهایی برای پیشگیری از فوران کافی نیست. افراد درگیر در عملیات باید توانایی تشخیص نشانه‌های کیک، درک رفتار فشار چاه و اجرای صحیح اقدامات عملیات مهار چاه را داشته باشند. تفسیر هم‌زمان داده‌هایی مانند حجم گل، جریان چاه، نرخ پمپاژ و شرایط عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری از جمله توانمندی‌هایی است که برای تشخیص وضعیت غیرعادی و اقدام به‌موقع اهمیت دارد.

۵-۷- مراجع و منابع تخصصی ایمنی فرایند

در بررسی این رویداد، از تجهیزات جلوگیری از فوران و کنترل جریان چاه تا عملیات مهار کیک و کنترل فشار، از استانداردها و منابع تخصصی مرتبط با تجهیزات و عملیات کنترل چاه استفاده شده است. مهم‌ترین منابع مرتبط با این مباحث در جدول (۵-۲) معرفی شده‌اند.

جدول (۵- ۲) مهم‌ترین منابع مورد استفاده در تحلیل رویداد پنجم

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
API Std 53 [1]	Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells	در بررسی سیستم BOP و تجهیزات جلوگیری از فوران چاه به این استاندارد استناد شد. این استاندارد الزامات

[1] Process Knowledge Management
[2] Process Safety Competency

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
		مرتبط با طراحی، نصب، بازرسی، آزمون، نگهداری و بهره‌برداری از سیستم‌های جلوگیری از فوران را پوشش می‌دهد. در این رویداد، BOP می‌توانست پس از تشخیص کیک، جریان سیال سازند را مهار کرده و شرایط لازم برای ادامه عملیات کنترل چاه را فراهم کند.
API Spec 16RCD [2]	Rotating Control Devices	در بررسی سرِ چرخان به این مرجع تخصصی استناد شد. این مشخصات الزامات مرتبط با طراحی، ساخت، عملکرد و آزمون تجهیزات کنترل چرخشی را پوشش می‌دهد. در این رویداد، سرِ چرخان می‌توانست در شرایط مناسب، آب‌بندی اطراف رشته حفاری و کنترل جریان سیال چاه را هنگام حرکت یا چرخش رشته فراهم کند؛ بااین‌حال، نقش آن معادل BOP در مهار فوران نیست.
API Spec 16C [3]	Choke and Kill Equipment	در بررسی مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان و تجهیزات مرتبط با مهار و کنترل از این مشخصات استفاده شد. این مرجع الزامات مربوط به طراحی، مواد، ساخت، عملکرد، آزمون و بازرسی تجهیزات مربوطه را پوشش می‌دهد. در این رویداد، پس از مهار کیک با BOP، مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان می‌توانست برای کنترل جریان خروجی و مدیریت فشار چاه به کار رود و شرایط را برای ادامه عملیات مهار چاه فراهم کند.
API RP 59 [4]	Well Control Operations	در بررسی عملیات مهار چاه و عملیات مهار چاه به این مرجع استناد شد. این روش اجرایی توصیه‌شده به رویه‌ها و ملاحظات عملیاتی مرتبط با کنترل چاه می‌پردازد. در این رویداد، پس از تشخیص و مهار کیک، اجرای صحیح عملیات کنترل و کشتن چاه می‌توانست با بازگرداندن

استاندارد / کتاب	توضیحات مربوط به استاندارد	کاربرد در حادثه
		شرایط فشاری چاه به وضعیت کنترل‌شده، از ادامه ورود سیال سازند و تشدید رویداد جلوگیری کند.

۵-۸- سنجش تحلیل مهندسی رویداد

پس از بررسی و واکاوی سناریوی حادثه، پدیده‌های فیزیکی مؤثر، تجهیزات ایمنی و لایه‌های حفاظتی، اکنون نوبت به سنجش تحلیل مهندسی است. پرسش‌های این بخش برای ارزیابی توانایی شما در پیوند دادن شواهد فنی، شناسایی نقاط شکست در زنجیره حادثه و انتخاب تصمیم‌های مؤثر در کنترل خطر طراحی شده‌اند؛ نه صرفاً یادآوری مفاهیم مطرح‌شده. (پاسخ‌نامه و توضیح مختصر پاسخ‌های صحیح، در انتهای کتابچه ارائه شده است.)

۱- در این سناریو، عملیات خارج کردن لوله‌ها با تأمین ناکافی گل و هم‌زمان هرزروی ادامه یافت. از دیدگاه دستورالعمل‌های عملیاتی، کدام مورد مناسب‌تر است؟

الف) با مشاهده کیک، عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری تا عمق ایمن ادامه یابد و سپس مهار چاه آغاز شود.

ب) رویه فقط حداکثر سرعت عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری را مشخص کند؛ زیرا کنترل حجم گل با تجهیزات سطحی انجام می‌شود.

ج) رویه حجم پرکردن چاه، پارامترهای پایش و شرایط توقف عملیات و آغاز عملیات مهار چاه را تعیین کند.

د) تا زمانی که BOP آماده‌به‌کار باشد، وقوع کیک نگران‌کننده نیست.

۲- کاهش نرخ پمپاژ، تغییر مسیر گردش گل و افت فشار هیدرواستاتیک به‌طور هم‌زمان رخ داد. تیم این تغییرات را مشاهده کرد، اما بدون بازبینی شرایط چاه به عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری ادامه داد. کدام تحلیل دقیق‌تر است؟

الف) مسئله اصلی الزاماً نقص تجهیزات است؛ زیرا ادامه عملیات به عملکرد BOP وابسته است.

ب) مشاهده پارامترهای غیرعادی کافی نیست؛ تیم باید آن‌ها را تفسیر کرده و در شرایط خارج از حدود، عملیات را متوقف و واکنش مناسب را اجرا کند.

ج) تا زمان مشاهده جریان سیال سازند در سطح، ادامه عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری از دیدگاه اجرای عملیات قابل قبول است.

د) تغییر مسیر گردش گل فقط مسئله طراحی سیستم گل است و ارتباط مستقیمی با اجرای عملیات ندارد.

۳- ورود سریع لوله به چاه باعث رانش و خروج سریع آن باعث مکش می‌شود. کدام نتیجه درباره کنترل ایمن عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری دقیق‌تر است؟

الف) برای جلوگیری از هر دو پدیده، سرعت عملیات رفت‌وبرگشت رشته حفاری باید تا حد امکان زیاد باشد.

ب) رانش و مکش فقط به وزن گل وابسته‌اند و کنترل سرعت اثر قابل‌توجهی ندارد.

ج) کنترل سرعت می‌تواند رانش و مکش را کاهش دهد، اما حجم گل، فشار هیدرواستاتیک و نشانه‌های کیک نیز باید هم‌زمان پایش شوند.

د) با کنترل سرعت و استفاده از مخزن تریپ، جبران حجم گل دیگر ضرورت ندارد.

۴- بخشی از گل بر اثر هرزروی وارد سازند شده بود. اگر هرزروی ادامه می‌یافت، کدام تحلیل درباره استفاده از LCM دقیق‌تر است؟

الف) LCM با افزایش مقاومت جریان، فشار اصطکاکی را افزایش داده و افت فشار هیدرواستاتیک را جبران می‌کند.

ب) LCM با کاهش یا مسدودکردن مسیر هرزروی، از کاهش بیشتر حجم گل و فشار هیدرواستاتیک جلوگیری می‌کند.

ج) LCM با کاهش نفوذپذیری سازند، فشار سازند را کاهش داده و اختلاف فشار را افزایش می‌دهد.

د) LCM با کاهش گردش گل، زمان تماس سیال با سازند را افزایش داده و فشار هیدرواستاتیک را تثبیت می‌کند.

۵- پس از تشخیص کیک و مهار جریان با BOP، چرا کنترل مجموعه شیرهای کنترل فشار و جریان باید با توجه به حدود فشار مجاز چاه و سازند انجام شود؟

الف) زیرا بستن بیشتر مهار همیشه کنترل کیک را بهتر می‌کند و افزایش فشار مطلوب است.

ب) زیرا مهار باید جریان و فشار را کنترل کند، بدون آنکه فشارهای وارد بر چاه از حدود مجاز سازند و تجهیزات فراتر رود.

ج) زیرا بازکردن مهار فشار را کاهش داده و احتمال فوران را به‌طور کامل از بین می‌برد.

د) زیرا پس از عملکرد BOP، مهار نقش مهمی ندارد و کنترل فشار عمدتاً به وزن گل وابسته است.

References:

[1]	
[2]	
[3]	
[4]	