

فوران چاه ماکاندو^۱ در خلیج مکزیک

تهیه و تنظیم: شرکت نفت خزر

مقدمه

گزارش حاضر حاصل بررسی و مطالعه‌ی چندین گزارش تهیه شده توسط شرکت‌های داخلی و خارجی از حادثه‌ی فوران چاه ماکاندو است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. اداره‌ی حفاری شرکت نفت خزر با تجزیه و تحلیل این گزارش‌ها به منظور به کارگیری تجربیات عملیات مذکور و با هدف پیشگیری از وقوع حوادثی اینچنینی در طول عملیات حفاری در آبهای عمیق، نسبت به تهیه و تنظیم این گزارش اقدام کرده است. عناوین و مشخصات گزارش‌های بررسی شده در جدول ۱- ارائه شده‌اند.

۱- خلیج مکزیک

خلیج مکزیک یکی از بزرگ‌ترین مناطق آب عمیق دنیاست که بین قاره‌ی آمریکای شمالی و جزایر کوبا قرار گرفته و گرم‌ترین آبهای جهان را دارد. بر اساس پیش‌بینی‌های اخیر شرکت بی‌پی، آبهای عمیق این منطقه حدود ۴۰ میلیارد بشکه نفت و گاز دارد که تا کنون حدود ۱۵ میلیارد بشکه‌ی آن شناسایی شده است. میدان نفتی فراساحلی ماکوندو از بلوک MC252 در نزدیکی سواحل ایالت لوئیزیانا آمریکا واقع شده و پس از صدور مجوز



۱ | فوران چاه ماکاندو در خلیج مکزیک



انجام فعالیت‌های اکتشافی توسط رئیس جمهور آمریکا بررسی و مطالعه شد. عملیات حفاری چاه ماکاندو در تاریخ ۲۹ نوامبر سال ۲۰۰۹ توسط سکوی حفاری نیمه‌شناور ترنس اوشن ماریاناز شروع شد که به دلیل طوفان‌های گرمسیری دکل قادر به انجام عملیات در این شرایط نبوده و دچار مشکل گردید و ادامه‌ی عملیات حفاری با دکل نیمه‌شناور دیپ واتر هورایزن در فوریه‌ی سال ۲۰۱۰ ادامه یافت. پس از حفاری تا عمق نهایی ۱۸۳۶۰ فوتی (۵۵۹۶ متری) و راندن و سیمان‌کاری هشت رشته لوله‌های جداری و آستری در مدت زمان ۲/۵ ماه، شرکت بی‌پی جهت صرفه‌جویی در هزینه و زمان تصمیم می‌گیرد به جای راندن آستری ۷" از لوله‌های جداری ترکیبی ۹ ۷/۸×۷" جهت پوشاندن مخزن تولیدی استفاده کند.

پس از راندن و سیمان‌کاری لوله‌های جداری ترکیبی ۹ ۷/۸×۷" در زمان انجام عملیات آزمایش خشک سیمان Shoe Track، در تاریخ ۲۰ آوریل ۲۰۱۰ چاه فوران کرد که منجر به انفجار و متعاقب آن آتش گرفتن سکوی حفاری نیمه‌شناور شد. پنج شناور پشتیبانی موجود در منطقه جهت اطفاء حریق، خنک‌سازی تأسیسات و جلوگیری از واژگون شدن سکو شروع به آب‌فشانی روی سکو می‌کنند تا امکان بستن شیرهای فوران‌گیر و شیرهای کنترل فراهم آید. اما آتش در لوله‌های رایزر ادامه یافت و تا سطح سکو به پیش رفت. بدین ترتیب سکوی دیپ واتر هورایزن با وجود تمامی خدمات و پشتیبانی‌های هوایی و دریایی پس از دو روز، در ۲۲ آوریل در آبهای خلیج مکزیک غرق شد و لاشه‌ی آن در فاصله‌ی ۴۰۰ متری

۱ | مشخصات گزارش‌های استفاده شده در این مطالعه

ردیف	نام گزارش	تهیه کننده	تاریخ تهیه
۱	بحران نفتی در خلیج مکزیک	شرکت ملی نفت ایران - شرکت نفت خزر	شهریور ۱۳۸۹
۲	گزارش نهایی تحقیقاتی فوران چاه ماکاندو	Deep water Horizon Study Group	مارس ۲۰۱۱
۳	گزارش تحقیقاتی حادثه‌ی چاه ماکاندو	Transocean Investigation	سپتامبر ۲۰۱۱
۴	گزارش فاجعه‌ی آبهای عمیق و شرکت بی‌پی ^۲ در سال ۲۰۱۰	MIT Sloan Management	آوریل ۲۰۱۲
۵	گزارش مجلس عوام انگلیس	کمیته‌ی تغییرات آب و هوایی و انرژی	دسامبر ۲۰۱۰
۶	گزارش ارزیابی ایمنی کارکنان آبهای عمیق	Bradley King John Gibbins	آگوست ۲۰۱۱
۷	گزارش تحقیقاتی انفجار و آتش‌سوزی در چاه ماکاندو	US Chemical Safety & Hazard Investigating Board	می ۲۰۱۴

از موقعیت چاه مذکور در بستر دریا قرار گرفت.

اقدامات متعددی جهت کنترل و مهار نشت نفت انجام شد. اولین اقدام سعی در بستن شیرهای فوران گیر روی تاج چاه توسط دستگاه‌های کنترل از راه دور و رباتیک بود اما با عدم کارآیی شیرهای فوران گیر و به عبارت دیگر نیمه فعال شدن شیرها، به روش تاپ کیل^۳ و استاتیک کیل^۴ برای کشتن و مهار چاه اقدام نمودند. اقدام بعدی قرارداد یک مخروط قیفی شکل ۱۲۵ تنی بود که توسط یک لوله به کشتی ذخیره کننده نفت در سطح دریا وصل می شد. این روش نیز به دلیل تشکیل هیدرات‌های گازی و پلاگ شدن خروجی قیف مخروطی با شکست مواجه شد. اما با اندکی تغییر در سیستم قیف مخروطی (تعبیه‌ی ورودی آب داغ و متانول جهت جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی) دوباره از این سیستم استفاده شد. تمامی این روش‌ها هم‌زمان با حفر دو حلقه چاه مورب^۵ انجام شد.

چاه ماکاندو به مدت ۸۷ روز جریان داشت که در تاریخ ۱۵ جولای ۲۰۱۰ و پس از هدر رفتن ۵ میلیون بشکه نفت در آبهای خلیج مکزیک به روش استاتیک کیل کنترل گردید.

به دنبال انفجار سکو، روش‌های مختلفی برای مبارزه با نشت نفت و کاهش اثرات زیست محیطی بررسی شد که در این راستا شرکت بی پی در ابتدای کار تعدادی ماشین کنترل از راه دور دریایی، ۷۰۰ کارگر، چهار هواپیما و ۳۲ شناور را به منظور مهار آلودگی در خلیج به کار گرفت. در ۲۹ آوریل، ۶۹ شناور شامل لایه بردارها و یدک کش‌ها، بارچ‌ها و شناورهای بازیافت جهت پاک‌سازی منطقه فعال بودند. در ۴ می، تعداد این شناورها به ۱۷۰ و تعداد پرسنل مشغول در پاک‌سازی به ۷۵۰۰ نفر به همراه

۲۰۰۰ نفر داوطلب پاک‌سازی رسید. علاوه بر آن در ۲۶ می، تمامی ۱۲۵ کشتی ماهی‌گیری تجاری موجود در منطقه به کمک این گروه‌ها آمدند.

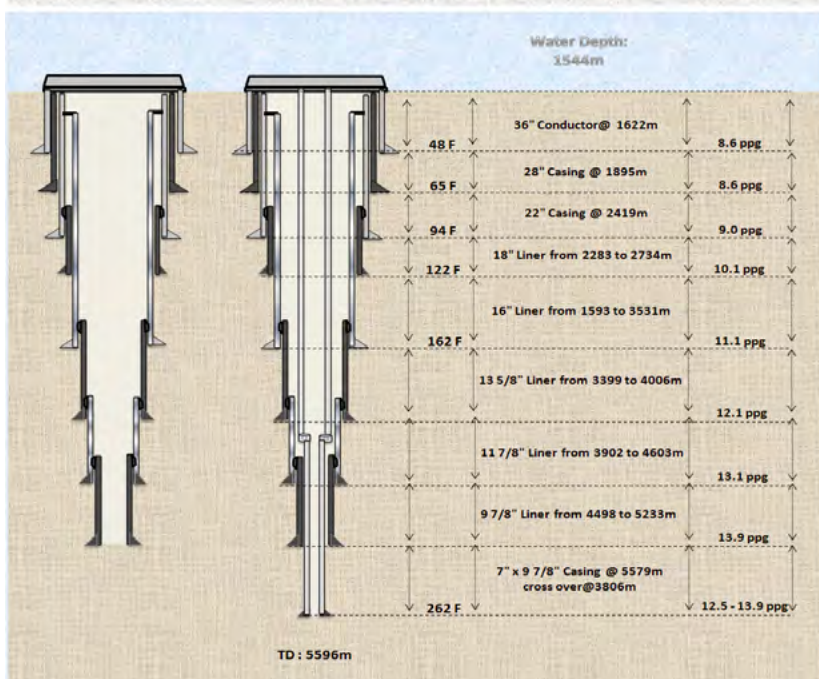
حادثه‌ی بحران نفتی در خلیج مکزیک منجر به نشت حجم گسترده‌ی نفت خام از سیستم سرچاهی چاه اکتشافی ماکوندو شد و اثرات ناگوار زیست محیطی و به دنبال آن پیامدهای زیان‌بار اقتصادی را در منطقه برای مسئولان حادثه در پی داشت؛ به طوری که هزینه‌ای بالغ بر ۳۰ میلیارد دلار را برای جبران خسارات مالی وارده به محیط زیست و مهار بحران به شرکت بی پی به عنوان مسئول و مسبب حادثه تحمیل کرد.

بر اساس معتبرترین اطلاعات منتشر شده توسط متخصصان درباره‌ی حجم نفت ورودی به خلیج مکزیک، در لحظات آغازین مقدار نشتی نفت ۶۲ هزار بشکه در روز بوده که به دلیل کاهش فشار مخزن در روزهای آتی به ۵۳ هزار بشکه در روز کاهش یافته است. مجموعه‌ی

شرکت‌های بی پی با ۶۵ درصد سهم، آنادارکو با ۲۵ درصد سهم و شرکت میتسوی با ۱۰ درصد سهم عملیات اکتشاف این میدان را انجام دادند و شرکت بی پی نیز به عنوان کارفرمای این مجموعه معرفی شد. این میدان حاوی ۱۰۰-۵۰ میلیون بشکه نفت قابل برداشت احتمالی است.

با توجه به این توضیحات شرایط عملیاتی بخش جنوبی دریای مازندران (صرف نظر از بسته بودن و شرایط خاص زیست محیطی آن) به دلیل عمق زیاد آب آن، مشابه شرایط عملیاتی خلیج مکزیک است. از آنجا که شرکت نفت خزر به عنوان یکی از زیرمجموعه‌های شرکت ملی نفت ایران مأموریت اکتشاف، توسعه و تولید از ذخایر هیدروکربنی این دریا را برعهده دارد، مطالعه‌ی شرایط مشابه و امکانات موجود جهت استفاده از تجارب گذشته می‌تواند در بهبود شرایط عملیاتی در بخش‌های عمیق این دریا مورد

Macondo Well Schematic



استفاده واقع شود.

۲- جزئیات عملیات و فوران چاه

■ پس از حفاری تا عمق نهایی ۱۸۳۶۰ فوتی (۵۵۹۶ متری)، لوله‌های جداری ترکیبی $9\frac{7}{8} \times 7$ رانده و سیمان کاری گردید.

■ در تاریخ ۲۰ آوریل پس از خاتمه‌ی عملیات سیمان کاری، اقدام به نصب Well Head Seal Assembly گردید.

■ جهت آزمایش فشار Seal نصب شده، رمز برشی بسته و ۲۷۰۰ پام فشار اعمال شد که در نتیجه مجموعه‌ی رشته‌ی جداری، پلاگ بالایی سیمان کاری و رمز برشی آزمایش شد.

■ رشته‌ی حفاری تا عمق ۸۳۶۷ فوتی (۲۵۵۰ متری) جهت انجام آزمایش خشک فشار^۶ یا Negative Test رانده شد (راندن لوله‌های حفاری به صورت Kick off جهت آزمایش خشک فشار).

■ بخشی از گل درون چاه با سیال حائل^۷ و به دنبال آن با آب دریا جابجا شد. ضمن اینکه جهت کاهش هزینه‌های ساخت سیال حائل از باقیمانده‌ی مواد LCM روی سکو استفاده شده است. جهت انجام آزمایش خشک فشار، فوران گیر دالیزی بالایی روی لوله‌ها بسته شد و فشار سیستم به صفر ترخیص گردید. در ادامه مشاهده شد که سطح گل داخل رشته‌ی رایزر پایین رفت که نشان از نشت گل از رشته‌ی رایزر و از طریق فوران گیر دالیزی به درون حفیره‌ی چاه بود. در ساعت ۱۷:۰۸ روز ۲۰ آوریل فشار پشت فوران گیر دالیزی تا ۱۹۰۰ پام افزایش یافت تا فوران گیر لوله‌ها را seal کند.

■ با پمپاژ گل به فضای دالیز رشته‌ی رایزر مشخص شد که ۵۰ بشکه گل از فضای بین فوران گیر دالیزی و لوله‌ها به درون حفیره‌ی چاه نشت کرده بود.

■ در ساعت ۱۷:۲۷ شیر مسیر لوله‌ها باز شد که در نتیجه‌ی آن ۲۳-۱۵ بشکه آب دریای برگشتی مشاهده گردید.

■ در ساعت ۱۷:۲۷ روز ۲۰ آوریل با دستور Well Site Leader ادامه‌ی آزمایش خشک از مسیر لوله‌ها به مسیر خط کشتن چاه^۸ منتقل گردید.

■ در ساعت ۱۷:۵۲ جهت بررسی و ادامه‌ی کار، شیر مسیر خط کشتن چاه باز شد که ۱۵-۳ بشکه آب دریای برگشتی مشاهده گردید. با بستن شیر مشاهده شد که فشار رشته‌ی حفاری تدریجاً افزایش یافت. در ساعت ۱۸:۴۲ جهت اطمینان از پر بودن مسیر خط کشتن چاه، آب دریا پمپ گردید. جهت بررسی برگشتی گل، مسیر خط کشتن به تانک پیمایش^۹ هدایت و حجمی کمتر از یک بشکه برگشتی اندازه گیری شد. با بررسی چاه به مدت ۳۰ دقیقه هیچ جریانی مشاهده نشد (پلاگ شدن خط کشتن چاه توسط مواد LCM موجود در سیال حائل). این در حالی بود که در چند نوبت فشار لوله‌ها ترخیص شده بود اما مجدداً افزایش فشاری درون لوله‌ها مشاهده شد و فشار لوله‌ها به ۱۴۰۰ پام رسید.

■ پس از بحث و گفت و گو علت فشار داخل لوله‌ها پدیده‌ی Bladder Effect (اثر سیال سنگین در دالیز روی سیال سبک در لوله‌های حفاری) عنوان شده و نتیجه‌ی آزمایش خشک قابل قبول و مثبت اعلام گردید.

■ در ساعت ۲۰:۰۰ با باز کردن فوران گیر دالیزی بالایی اقدام به پمپاژ آب دریا به درون چاه جهت جابجایی تمامی گل درون رشته‌ی رایزر در عمق ۸۳۶۷ فوتی شد (ساعت ۲۰:۵۲).

■ با جابجایی گل با آب دریا، فشار هیدرواستاتیک سیال داخل چاه به زیر فشار سازند افتاد و زمینه را برای جریان کامل چاه آماده نمود.

■ در ساعت ۲۱:۰۱ تانک پیمایش تخلیه شد که این امر موجب گردید ابزار مهم و اصلی بررسی چاه عملاً از دست خارج شود. در

این زمان فشار لوله‌ها ۱۰۰ پام افزایش یافت. در ساعت ۲۱:۰۸ حدود ۳۹ بشکه افزایش حجم ثبت شد.

■ سیال حائل برگشتی از چاه آزمایش شد که هیچ هیدرو کربنی در آن مشاهده نگردید. ■ پس از رسیدن سیال حائل به سطح، پمپ‌ها خاموش شد و این در حالی بود که طی مدت ۵/۵ دقیقه فشار لوله‌ها حدود ۲۴۶ پام افزایش یافت و مقدار ۹ بشکه در دقیقه جریان ثبت شد. در ساعت ۲۱:۱۴ ادامه‌ی جابجایی سیال درون چاه با آب دریا از سر گرفته شد. در ساعت ۲۱:۳۱ جهت بررسی چاه پمپ‌ها خاموش و حدود ۳۰۰ بشکه افزایش حجم ثبت شد. پس از گذشت ۵ دقیقه فشار لوله‌ها در حدود ۵۵۶ پام افزایش یافت. در چند نوبت ترخیص فشار داخل لوله‌ها موجب ورود بیشتر سیال به درون حفیره‌ی چاه گردید. در ساعت ۲۱:۴۰ با افزایش جریان Diverter روی جریان بسته شد و مسیر آن به سمت تفکیک گر گاز^{۱۰} منحرف شد. با بستن مجدد فوران گیر دالیزی تلاش شد تا جریان کنترل گردد. فشار لوله‌ها نیز طی ۵ دقیقه از ۳۳۸ پام به ۱۲۰۰ پام افزایش یافت. در این زمان تصمیم به تغییر مسیر جریان از تفکیک گر به خارج از سکو گرفته شد. در شکل ۲- نمایی از تفکیک گر گاز نشان داده شده است.

■ در ساعت ۲۱:۴۷ اولین حسگر گاز موجب روشن شدن آژیر خطر شد و فشار لوله‌ها به طور ناگهانی تا ۵۷۳۰ پام افزایش یافت. در پی آن رمز متغیر روی لوله‌ها بسته شد که به طور موقت جلوی جریان را گرفت. اما قادر به ادامه نبوده و پس از حدود یک دقیقه گاز منتشر شده در محیط سکو به اطاق موتورها رسید و باعث از کار افتادن موتورها و قطع برق سکو گردید که در پی آن صدای اولین انفجار به گوش رسید.

■ انفجار دوم در محل اصلی سکو

اتفاق افتاد و باعث آسیب به کابل‌های ارتباطی با شیرهای فوران‌گیر^{۱۱} و خطوط هیدرولیکی تأمین‌کننده نیروی شیرهای فوران‌گیر شد.

■ آتش و انفجار انجام شده احتمالاً سبب آسیب دیدن وسائل و تجهیزات سطحی گردیده و سبب شده هیدروکربن از درون لوله‌های حفاری جریان یابد. شیر ایمنی روی لوله‌های حفاری به صورت باز رها شد و در نتیجه وسایل سطحی سکو در معرض فشار بالا قرار گرفتند. با وجود بستن شیرهای فوران‌گیر روی لوله‌های حفاری عمل Sealing انجام نشده است.

■ به دنبال وقوع انفجار در سکو، شرکت بی‌پی در تاریخ ۲ می ۲۰۱۰ با به کارگیری دکل Transocean's Development Driller 111 اقدام به حفاری چاه مورب نمود که مدت عملیات حفاری این چاه سه ماه پیش‌بینی شده بود. شرکت بی‌پی در ۱۶ می ۲۰۱۰ حفاری چاه مورب دوم را شروع کرد.

■ جریان چاه ماکاندو در تاریخ ۱۵ جولای ۲۰۱۰ و پس از مدت ۸۷ روز جریان، به روش استاتیک کیل و تزریق سیال سنگین و سیمان از درون تاج چاه از محل Mud line کنترل

شد. جهت اطمینان از قطع جریان چاه، از طریق چاه مورب اول و از نزدیکی عمق نهایی با چاه اصلی ماکاندو ارتباط برقرار شد و مقداری سیال سنگین و سیمان پمپ شد و بدین ترتیب از قطع ارتباط دائمی چاه اطمینان حاصل گردید.

۳- گزارش بررسی فوران چاه

در تاریخ ۲۰ آوریل ۲۰۱۰ فوران چاه ماکاندو منجر به انفجار و متعاقباً آتش‌سوزی خارج از کنترل سکوی حفاری نیمه‌شناور Deep Water Horizon شد که در عمق ۱۲۲۶ متری آب دریا مستقر بود.

در اثر این حادثه ۱۱ نفر جان خود را از دست دادند، ۱۷ نفر به طور جدی صدمه دیدند و ۱۱۵ نفر از مجموع ۱۲۶ نفر از روی سکو تخلیه شدند.

سکوی نیمه‌شناور ۳۶ ساعت بعد در دریا فرو رفته و غرق شد. نفت (هیدروکربن) چاه ماکاندو در خلیج مکزیک رها گردید و تا حدود سه ماه جریان داشت تا بالاخره مهار شد.

جهت یافتن پاسخ به سؤالات بحرانی زیر باید تمرکز لازم ایجاد می‌شد:

■ سیال مخزن چگونه و چرا وارد دهانه‌ی چاه گردید؟

■ چه اقداماتی توسط گروه حفاری انجام شده است؟

■ آیا شیرهای فوران‌گیر عمل کرده‌اند؟

■ پس از رسیدن سیال مخزن به سکوی حفاری چه اتفاقی افتاده است؟

■ چگونه پرسنل سکو را تخلیه کردند؟

■ جهت یافتن پاسخ این سؤالات، تیم تحقیقات به شرح زیر عمل کردند:

■ از شاهدین در محل، مصاحبه به عمل آمد.

■ اطلاعات طراحی و برنامه‌ی چاه و نیز چگونگی روند اجرای عملیات بازنگری شد.

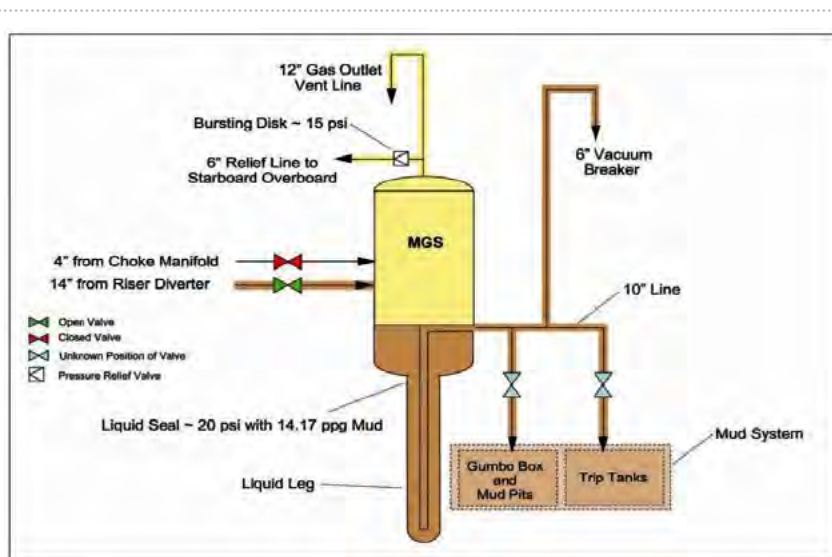
■ حصول اطمینان از ارسال گزارش عملیات مطابق با زمان‌بندی واقعی از سکوی حفاری به مرکز شرکت بی‌پی مستقر در خشکی که توسط شرکت اسپری‌سان^{۱۲} انجام می‌شد.

■ از تجربیات فنی صنعت نفت مشاوره گرفته شد.

■ شخص ثالث مدارک فیزیکی موجود و آزمایش‌های انجام شده را ارزیابی کرد.

۴- خلاصه‌ی عملیات چاه

دکل نیمه‌شناور Deep Water Hori-zon متعلق به شرکت ترنس اوشن (در مالکیت ایالات متحده‌ی آمریکا) و یکی از دکل‌هایی اختصاصی جهت حفاری در آبهای عمیق است. قیمت آن ۵۶۰ میلیون دلار برآورد گردیده که در خلیج مکزیک و روی چاه ماکاندو مشغول عملیات حفاری جهت اکتشاف نفت و گاز بوده است. شرکت بی‌پی با داشتن مجوز عملیات اکتشاف نفت، دکل مذکور را همراه با پرسنل آن به مبلغ ۵۰۰ هزار دلار در روز از شرکت ترنس اوشن اجاره کرده است. از ۱۲۶ نفر کارکنان سکوی حفاری تعداد ۷۹ نفر از شرکت ترنس اوشن، ۷ نفر از پرسنل بی‌پی و مابقی از سایر شرکت‌ها شامل شرکت آنادارکو^{۱۳}، هالیبرتون و شرکت



شکل ۲ | شماتیک تفکیک‌گر گاز

به راندن لوله‌های جداری را صادر می‌کند و برنامه‌ی سیمان‌کاری و نیز نحوه‌ی راندن سنترالایزرها^{۱۵} به شرکت هالیبرتون محول می‌گردد که این شرکت نیز در انجام عملیات سیمان‌کاری لوله‌های جداری ناموفق بوده است. در این خصوص سازمان خدمات مدیریت معدن‌کاری آمریکا^{۱۶} در مطالعات خود اظهار کرده که طی چهارده سال گذشته از هر ۳۹ حلقه چاه در خلیج مکزیک ۱۸ چاه به دلیل سیمان‌کاری نامناسب لوله‌های جداری-آستری با مشکل مواجه شده‌اند.

۵- یافته‌های کلیدی عوامل احتمالی وقوع حادثه

۵-۱- عدم تبدیل حالت خود پرشوندگی^{۱۷} به شیر یک‌طرفه‌ی^{۱۸} کفشک^{۱۹} و طوقه‌ی جداری^{۲۰}

۵-۲- عملیات سیمان‌کاری

۵-۳- مراحل متروکه کردن موقتی چاه

۵-۴- آزمایش خشک فشار

۵-۵- کشف جریان

۵-۶- فعال‌سازی و عملکرد شیرهای فوران‌گیر

۵-۷- انتشار گاز، آتش‌سوزی، جمع‌آوری و تخلیه‌ی پرسنل

۵-۱- تبدیل و برگرداندن خود پرشوندگی به شیر یک‌طرفه

■ طبق مقررات، هنگام راندن لوله‌های جداری-آستری در بخش تولیدی مخزن لازم است کفشک و طوقه‌ی سیمانی از حالت پرشونده به حالت شیر یک‌طرفه تبدیل گردد تا بدین ترتیب از جریان یافتن احتمالی سیال مخزن به درون رشته‌ی جداری جلوگیری به عمل آید. شرکت بی‌پی به‌طور بارزی از برنامه‌های خود جهت برگرداندن و تبدیل حالت کفشک و طوقه‌ی جداری از حالت خود پرشوندگی به شیر یک‌طرفه کوتاهی کرده است.

■ مقدار گردش گل از ۲ بشکه در دقیقه

بی‌پی جهت صرفه‌جویی در هزینه و زمان تصمیم می‌گیرد به جای راندن لوله‌ی آستری ۷" و متعاقب آن Tie-Back تا سطح، از لوله‌های جداری ترکیبی ۷"× $\frac{7}{8}$ " جهت پوشاندن مخزن تولیدی استفاده شود. در صورت استفاده از لوله‌های آستری ضروری است جهت متروکه کردن موقت چاه و به‌منظور ایمنی چاه چهار عدد پلاگ درون چاه نصب گردد. پلاگ اول در قسمت تحتانی لوله‌های آستری، پلاگ‌های دوم و سوم بالای لبه‌ی آستری و پلاگ چهارم جهت ایمنی در نزدیک سطح نصب می‌شود. در نهایت شرکت بی‌پی جهت صرفه‌جویی ۱۰-۷ میلیون دلاری در هزینه‌ی چاه و حداقل سه روز زمان در وقت دکل، دستور

سواکو^{۱۴} (یکی از زیرمجموعه‌های شرکت شلمبرژه) بوده‌اند.

پیش‌بینی اولیه‌ی بی‌پی جهت عملیات حفاری چاه ماکاندو ۵۱ روز بوده و برآورد هزینه‌ی حفاری چاه ۹۶ میلیون دلار بود که تا تاریخ ۲۰ آوریل ۲۰۱۰ مدت ۸۰ روز از عملیات چاه سپری شده بود و هزینه‌ی صرف شده جهت عملیات حفاری چاه بسیار بیشتر از بودجه‌ی پیش‌بینی اولیه تمام شده است.

پس از شروع به کار دکل، Riserها و شیرهای فوران‌گیر با موفقیت نصب شد و تعداد هشت رشته لوله‌های جداری و آستری در مدت ۲/۵ ماه نصب و سیمان‌کاری گردید. پس از حفاری تا عمق نهایی ۱۸۳۶۰ فوتی (۵۵۹۶ متری)، شرکت



TOP-CO INDUSTRIES LTD.
7720 -17 Street, Edmonton, Alberta, Canada T6P 1S7

Tel (780) 440-4440
Fax: (780) 440-4443
Email: topco1@aol.com

**TYPE 235 / 236
AUTOMATIC FILL
FLOAT EQUIPMENT
OPERATING
INSTRUCTIONS**

TYPE 235 RUN-IN POSITION



TYPE 235 DROP BALL



TYPE 235 CHECK VALVE



TYPE 236 FILL UP FLOAT SHOE RUN-IN POSITION



The Top-co Type 235 Automatic Fill-up Float Collar and Type 236 Automatic Fill-up Float Shoe has a flapper valve used in conjunction with a synthetic rubber diaphragm for controlling the filling of the casing. As the casing is lowered down the well the diaphragm will open after the first few joints of casing have been lowered allowing fluid to flow up into the casing. As the casing fills and the differential pressure reduces the diaphragm will close. The rate of fill will equal the rate of lowering the casing reducing possibility of pressure surges.

Circulation can be performed at anytime during the lowering of the casing.

When the casing is lowered to depth the 1 3/4" diameter (44.5mm) Kirksite Ball is released into the casing. It will fall through the drilling fluid where it will enter the valve and become seated in the release sleeve in the float collar. Pump pressure of 400 to 600 PSI over circulating pressure will pump the ball through the valve releasing the flapper into the seating position. The ball will then fall into the float shoe and the application of pressure is again repeated to release the flapper in the float shoe.

Licensed for
API Spec Q-1
100-0008
5CT0465

ISO #97-511
9001:1994

Supplies
and
Services
to
the
Industry

CB

PG

۳ | نمای کفشک و طوقه‌ی سیمانی خود پرشونده شکل

۱۷

تجاوز نکرده اما گردش گل در فشار ۳۱۴۲ پام میسر شده است (حدود پنج برابر آنچه برنامه‌ی چاه بوده).

■ با توجه به موارد بالا تیم تحقیقات به این نتیجه می‌رسد که احتمال تبدیل نکردن کفشک و طوقه‌ی جداری از حالت خود پرشوندگی به شیر یک‌طرفه حتی پس از رسیدن رشته‌ی جداری به عمق مورد نظر و قبل از اجرای عملیات سیمان کاری وجود داشته است (شکل-۳).

۵-۲- عملیات سیمان کاری

عدم گردش کافی گل قبل از سیمان کاری باعث رسوب گل حفاری و ته‌نشینی مواد جامد گل و ذرات ریزشی دیواره‌ی چاه شده و سبب اثرات منفی در سیمان کاری سازند تولیدی گردید.

دلیل ناموفق بودن عملیات سیمان کاری منتج از عوامل متعددی است که محوریت اصلی آن ناشی از تصمیم مدیریتی گرفته شده در فاصله‌ی زمانی ۲۰-۱۲ آپریل است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

■ پیچیدگی برنامه‌ی سیمان کاری

■ احتمال آلوده شدن سیمان ضمن عملیات سیمان کاری

■ ناکافی بودن انجام آزمایش‌های سیمان قبل و بعد از عملیات پمپاژ سیمان جهت کسب اطمینان از عملکرد مناسب عملیات سیمان کاری

■ عدم موفقیت شرکت هالیرتون در عملیات سیمان کاری؛ هرچند کارکنان شرکت بی‌پی به‌عنوان ناظر عملیات، مسئولیت صحت تمامی عملیات انجام شده توسط هالیرتون را عهده‌دار بوده‌اند.

■ با توجه به اتفاقات واضح است که سیمان پمپ شده قادر به جدا کردن هیدروکربن مخزن با داخل چاه نبوده و با توجه به اینکه نمونه‌های سیمان واقعی پمپ شده در چاه در اختیار نبوده با استفاده از یک آزمایش راهنما، آنالیز دوغاب سیمان مشابهی

دوغاب مورد نیاز سیمان کاری گردیده است. طی پیگیری عملیات سیمان کاری مشخص شد که تصمیم شرکت بی‌پی در به‌کارگیری شش عدد سترالایزر و نیز راندن لوله‌های جداری تولیدی به‌صورت لوله‌ی جداری صحیح بوده و با طراحی سایر چاه‌های منطقه یکسان است. در نتیجه به‌دلیل قصور و کوتاهی شرکت هالیرتون در اجرای عملیات

طراحی شد که در خصوص آن موارد زیر قابل توجه است:

■ وجود درصد زیاد نیتروژن در سیمان‌های کف‌دار باعث می‌شود تهیه‌ی دوغاب یک‌دست با مشکل مواجه شود.

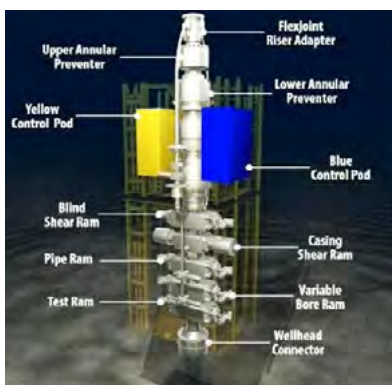
■ در طراحی دوغاب سیمان هیچ‌گونه افزایش‌ی کنترل هرزروی سیال^{۲۱} استفاده نشده است.

■ با توجه به حجم دوغاب پمپ شده، سیمان نسبتاً کمی پمپ گردیده و بنابراین احتمال آلوده شدن سیمان^{۲۲} افزایش می‌یابد.

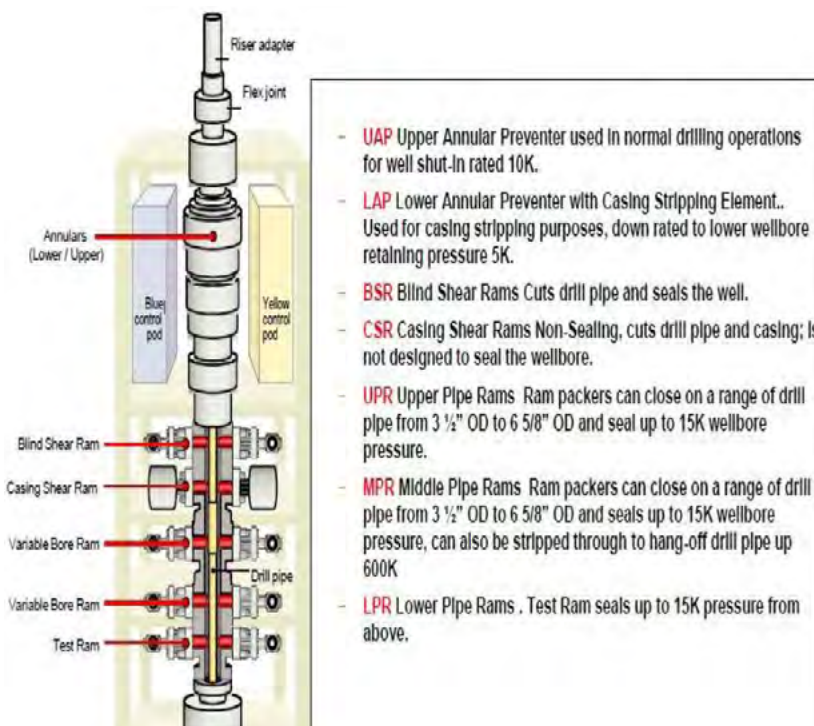
■ شرکت هالیرتون در انجام آزمایش‌های مورد نیاز جهت جلوگیری از وقوع مشکل در دوغاب سیمان قصور داشته است.

■ آزمایش‌های انجام شده در محل سکو روی دوغاب سیمان نشان‌دهنده‌ی آنست که هرگز ثبات سیمان^{۲۳} حاصل نشده است.

بنابراین در حین پمپاژ دوغاب سیمان کفی، نیتروژن از دوغاب جدا شده، باعث آلودگی سیمان و در نهایت سبب عملیات ناموفق در کسب وزن



شکل ۴ | شماتیک کلی شیرهای فوران‌گیر



شکل ۵ | نمایی از شیرهای فوران‌گیر و توضیحاتی در مورد آنها

■ همه‌ی کارکنانی که پس از انفجار سالم ماندند، توانستند با موفقیت دکل را تخلیه کنند.

۶- عواملی که در وقوع حادثه مشارکت داشته اند

عواملی که در وقوع حادثه مؤثر بوده‌اند به چهار موضوع زیر نسبت داده می‌شوند:

۶-۱- مدیریت ریسک و ارتباطات^{۳۱}

۶-۲- برنامه‌ریزی و طراحی چاه^{۳۲}

۶-۳- ارزیابی ریسک و فرآیند ایمنی^{۳۳}

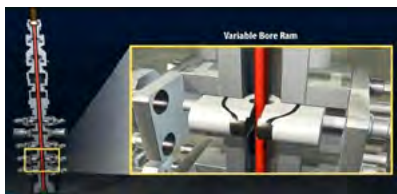
۶-۴- عملیات^{۳۴}

۶-۱- مدیریت ریسک و ارتباطات

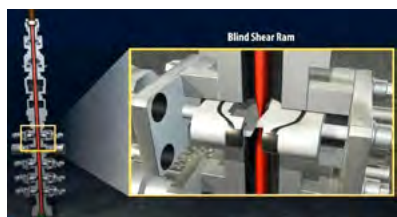
در تحقیقات موارد زیر مشخص شده است: ■ کوتاهی کردن کارفرما در ارزیابی شرایط و مدیریت ریسک در جهت تماس با سایر قسمت‌ها.

■ کوتاهی کردن در اطلاع‌رسانی به کارکنان کلیدی سکو از طرف کارفرما در خصوص امکان تردید در مورد آزمایش خشک انجام شده و نیز مطرح کردن احتمال عدم کیفیت سیمان Shoe Track جهت جلوگیری از جریان احتمالی.

■ در تاریخ ۲۰ آوریل ۲۰۱۰ عملیات انجام شده توسط کارکنان سکو بیانگر این واقعیت است که چاه به‌طور ایمن سیمان



شکل ۶ | نمایی از رمز متغیر در حال بسته شدن دور لوله‌ی حفاری



شکل ۷ | نمایی از رمز Blind/Shear در حال بسته شدن و بریدن لوله‌ی حفاری

۶-۵- فعال‌سازی و عملکرد شیرهای فوران‌گیر

شیرهای فوران‌گیر به‌درستی عمل کرده و بسته شده اما شرایط چاه بر آنها غلبه کرده است. تأخیر در بستن شیرهای فوران‌گیر از دیگر عوامل احتمالی عدم موفقیت عملکرد این شیرها بوده است. در شکل‌های ۴۵-۴۶ شماتیک کلی شیرهای فوران‌گیر و توضیحاتی در مورد آنها ارائه شده است. ■ به علت جریان زیاد چاه، لاستیک فوران‌گیر دالیزی (هایدریل) به‌طور کامل قادر به نشست‌بندی نبوده و نرخ جریان گاز باعث سایش لاستیک فوران‌گیر دالیزی و سایش لوله‌های حفاری در قسمت بالایی فضای حلقوی شده است.

■ بستن رمز پایین متغیر^{۲۷} باعث مسدود شدن فضای حلقوی و در نتیجه توقف موقت جریان شد (شکل-۶)

■ انفجار و آتش‌سوزی باعث عدم فعال شدن EDS^{۲۸} شده است.

■ AMF^{۲۹} مطابق برنامه‌ریزی شده عمل کرده است. لوله‌های حفاری خم شده و تغییر شکل یافته باعث می‌شود رمز متغیر پایینی نتواند عملیات نشست‌بندی دور لوله‌های حفاری را به‌خوبی انجام دهد (تعداد ۳۶ شاخه لوله حفاری "۵/۱" تغییر شکل یافته و دارای خمش و قوس بودند و در نهایت با بستن رمز برشی/کورکننده^{۳۰} نیز قادر به بستن چاه نبوده‌اند (شکل-۷)).

۷-۵- انتشار گاز، جرقه و آتش‌سوزی، جمع‌آوری و تخلیه‌ی پرسنل

■ با پراکندگی سریع گاز در Riserها، تفکیک‌گر گاز در گاز غوطه‌ور می‌شود.

■ با رسیدن حجم زیاد گاز به سکوی حفاری، احتمالاً جرقه زده شده و متعاقب آن انفجار صورت گرفته است.

■ سیستم‌های ایمنی و هشداردهنده مطابق برنامه عمل کرده‌اند.

■ تیم تحقیقاتی، یافتن منبع دقیق جرقه را غیرممکن دانسته‌اند.

سیمان کاری لوله‌های جداری از یک‌سو و تبدیل نکردن حالت کفشک و طوقه‌ی جداری از حالت خود پرشوندگی به شیر یک‌طرفه از عوامل حادثه بوده است.

۵-۳- مراحل متروکه کردن موقتی چاه^{۲۴}

■ مهندسان شرکت بی‌پی در فاصله‌ی زمانی ۲۰-۱۲ آوریل حداقل پنج برنامه‌ی مختلف که هر کدام به‌طور فاحشی با یکدیگر متفاوت بودند ارائه کرده‌اند.

■ برنامه‌ی نهایی متروکه کردن موقت چاه شامل ریسک‌های غیرضروری بوده است. برنامه‌ی نهایی شامل موارد زیر است:

■ جایگزینی گل درون چاه در عمق ۸۳۶۷ فوتی (۲۵۵۰ متری) با آب

■ جایگزینی و خارج‌سازی گل قبل از نصب پلاگ‌های سیمانی ثانویه

۵-۴- آزمایش خشک فشار

■ نتیجه‌ی آزمایش خشک فشار به غلط تفسیر شده است. پس از انجام آزمایش خشک، شرکت بی‌پی تصمیم به ادامه‌ی عملیات و جایگزینی گل درون چاه می‌گیرد.

■ مشاهده‌ی فشار غیرعادی روی لوله‌های حفاری در طول انجام آزمایش خشک باید به‌منزله‌ی اعلام خطر و وجود ارتباط با مخزن تلقی می‌شد و مسئولیت آن متوجه گروه بررسی کننده بوده است.

■ علاوه بر تفسیر غلط نتیجه‌ی آزمایش خشک، تصمیم شرکت بی‌پی مبنی بر مانیتور کردن فشار از طریق خط کشتن چاه به‌جای مانیتور کردن از طریق لوله‌های حفاری اشتباه بوده است.

۵-۵- کشف جریان یافتن چاه^{۲۵}

افزایش فشار لوله‌های حفاری پس از جابجایی گل و به‌دنبال انجام آزمایش به اصطلاح خشک فشار، بیانگر ورود جریان^{۲۶} به درون چاه بوده که پرسنل حفاری متوجه نشده‌اند (در فاصله‌ی زمانی ۰۹:۱۴-۰۹:۰۴ بعدازظهر)

شده و انجام آزمایش‌ها با موفقیت همراه بوده و چاه ایمن است. اگر در حین فرآیند متروکه کردن موقت چاه، گزارش‌ها با تمامی جزئیات و در نظر گرفتن ریسک‌های احتمالی منعکس می‌شد، می‌توانست باعث واکنش بهتر کارکنان سکو نسبت به حادثه گردد.

۶-۲- برنامه‌ریزی و طراحی چاه

■ طراحی نامناسب وزن گل و فشار هیدروستاتیکی وارد بر سازند؛ در این چاه فشار هیدروستاتیکی در موقع حفاری به بیش از فشار شکست سازند رسید و سبب هرزروی گل حفاری به درون سازند شد که این شکست سازند، تأثیر خود را در هنگام عملیات سیمان کاری آشکار کرده است. ■ حجم، وزن مخصوص و نرخ دوغاب پمپ شده مطابق برنامه‌ی ارائه شده سیمان کاری نبوده است.

■ عدم انجام آزمایش‌های صحیح مربوط به قبل و بعد از عملیات سیمان کاری، خطر تصمیم‌گیری را دوچندان کرده است. ■ آنچه باعث شد حادثه‌ی چاه ماکاندو به سرعت انجام شود انجام آزمایش خشک غیراستاندارد و نامناسب بودن سیمان موجود در Shoe Track بوده است.

۶-۳- ارزیابی ریسک و فرآیند ایمنی

■ شرکت بی‌پی در تأیید آزمایش حساس خشک کوتاهی کرده یا ریسک‌هایی را متقبل شده است.

■ شرکت هالبرتون برنامه‌ریزی و عملیات سیمان کاری را به درستی انجام نداده است ■ شرکت بی‌پی در فاصله‌ی زمانی ۲۰-۱۲ آوریل حداقل پنج طرح متفاوت برای متروکه کردن موقت چاه ماکاندو ارائه کرده است.

■ شرکت بی‌پی در نهایت طرح متروکه کردن موقت چاه که ریسک غیرضروری داشت را بدون تأییدیه از مدیریت

معدن کاری آمریکا اجرا نموده است. ■ طرح نهایی متروکه کردن موقت چاه بر آن شد تا گل درون چاه قبل از نصب پلاگ سیمانی ثانویه با آب جایگزین گردد که بدین ترتیب چاه زیر فشار تعادلی قرار گرفت.

■ به نظر نمی‌رسد این ریسک‌ها یا تبعات منفی آن روی کارکنان سکو به کارکنان یا مسئولان گزارش شده باشد.

■ به نظر نمی‌رسد تغییر برنامه‌ی متروکه کردن موقت چاه یا تصمیمات گرفته شده که ریسک داشته گزارش شده باشد.

۶-۴- عملیات

نتیجه‌ی آزمایش حساس و بحرانی خشک فشار که توسط شرکت بی‌پی برنامه‌ریزی و تأیید شده حاکی از آنست که عملیات سیمان کاری لوله‌های جداری سبب جدا کردن هیدروکربن سازند از درون چاه شده است. این در حالی است که تفسیر آزمایش نادرست بوده است.

شرکت بی‌پی نتیجه‌ی آزمایش خشک فشار را تأیید کرده و با ادامه‌ی عملیات تصمیم به ادامه متروکه کردن موقت چاه می‌گیرد. هیچ یک از افرادی که چاه را بررسی کرده‌اند نتوانسته‌اند جریان یافتن چاه را تشخیص دهند.

با وجود چندین عامل نشان‌دهنده‌ی ورود جریان به دهانه‌ی چاه در مراحل نهایی، جایگزینی گل درون چاه انجام شده و در نتیجه چاه در حالت پایین‌تر از فشار تعادل مخزن قرار گرفته است.

مشخص نیست که چرا کارکنان سکو نتوانسته‌اند فشار غیرعادی را تا حدود ساعت ۲۱:۳۰ تشخیص دهند.

زمانی که کارکنان متوجه فشار غیرعادی می‌شوند با تشخیص ورود جریان به دهانه‌ی چاه عکس‌العمل لازم را انجام می‌دهند؛ از جمله فعال کردن رمزهای مختلف شیرهای فوران‌گیر.

مدارک و مستندات در خصوص انجام آزمایش‌ها برای شیرهای فوران‌گیر که توسط شرکت Det Norske Veritas انجام شده و توسط تیم تحقیقات نیز تأیید گردیده بیانگر آنست که شیرهای فوران‌گیر به درستی حفظ و نگهداری شده و عمل کرده‌اند؛ هرچند عملیات انجام شده در مراحل مختلف آزمایش خشک فشار سبب جریان شدید گاز گردیده است.

از دیگر اشتباهات فاحش شرکت بی‌پی عدم راندن نمودار بندش سیمان^{۳۵} CBL/VDL بعد از اتمام عملیات سیمان کاری لوله‌های جداری بوده که صورت‌حساب لغو راندن نمودار بندش سیمان شرکت شلمبرژه موجود است.

۷- هشت عامل در وقوع حادثه مشارکت داشته‌اند

■ دو دلیل از عوامل این حادثه در خصوص ورود هیدروکربن به دهانه‌ی چاه بوده است. اعتقاد بر اینست که سیمان پشت لوله‌های جداری ترکیبی "۷×۹" و پلاگ سیمانی Shoe Track قادر به جدا کردن هیدروکربن مخزن نبوده‌اند و در نتیجه باعث جریان یافتن چاه شده است.

■ سه دلیل دیگر از عوامل جریان یافتن چاه مربوط به کارکنان دکل است که ورود نفت و گاز به درون چاه را تشخیص نداده‌اند. در حالی که اگر متوجه این امر می‌شدند اقدام لازم صورت می‌گرفت. با وجود اینکه آزمایش خشک فشار به عمل آمده ورود سیال مخزن را نشان می‌داده این آزمایش تأیید شده است. در نتیجه جهت جلوگیری از نفوذ نفت و گاز به Riserها بسیار دیر اقدام گردیده و عملیات انجام شده جهت کنترل جریان ناموفق بوده است.

■ دلایل ششم و هفتم در خصوص ورود هیدروکربن‌های نفتی از طریق Riserهاست که پس از آن در سطح سکو پراکنده شده و باعث ایجاد جرقه گردیده است. مشخص شد که جریان چاه به سمت

که رعایت آن از همان ابتدا می‌توانست از بروز چنین حادثه‌ای جلوگیری کند، استفاده از ابزار استاندارد آزمایش خشک فشار و همچنین تجزیه و تحلیل درست آزمایش خشک فشار انجام شده جهت بررسی احتمال وجود ارتباط با سیال مخزن است.

توضیحاتی در مورد آزمایش فشار و متروکه کردن موقت چاه

■ جهت انجام آزمایش خشک فشار حتی در شرایط بسیار مناسب‌تر از شرایط آزمایش در مناطق حساس و بحرانی آبهای عمیق، از رشته‌ی مخصوص DST استفاده می‌شود تا در صورت جریان یافتن چاه در همان اعماق پایین، فشار مخزن قابل کنترل باشد و از ورود هیدروکربن به دهانه‌ی چاه جلوگیری گردد.

■ پس از انجام آزمایش به اصطلاح خشک، شرکت بی‌بی نسبت به نتیجه‌ی آزمایش کوتاهی کرده و تفسیر آزمایش را به غلط انجام داده که همین عامل باعث تمامی اتفاقات ناگوار بعدی و در نتیجه فوران چاه و متعاقب آن آتش گرفتن دکل شده است.

■ ضمن اینکه متروکه کردن موقت یک حلقه چاه نیازمند پلاگ گذاری در اعماق مختلفی از دهانه‌ی چاه است که این نکته‌ی مهم نیز در برنامه‌ی عملیات متروکه کردن موقت چاه توسط شرکت بی‌بی لحاظ نشده است.

یک طرفه‌ی کفشک و طوقه‌ی جداری
 ■ عدم دقت کارکنان دکل جهت مشخص کردن ورود جریان نفت و گاز به دهانه‌ی چاه
 ■ راندن لوله‌های حفاری به صورت Kick off جهت آزمایش خشک فشار
 پلاگ سیمانی به جای راندن و استفاده از رشته‌ی مخصوص DST^{۳۶}

■ هدایت جریان به سمت تفکیک گر گاز به جای دور کردن آن به خارج از سکوی حفاری

■ مشکلات شیرهای فوران گیر، مبنی بر عدم توانایی آنها در نشت‌بندی چاه. این در حالی است که شرکت پیمانکار دکل علت احتمالی عملکرد نامناسب فوران گیرها را ناشی از مواردی مثل شرایط چاه، نرخ جریان هیدروکربنی که سبب سایش لوله‌های حفاری در محدوده‌ی شیر فوران گیر شده، انفجار و آتشی که باعث عدم عملکرد EDS^{۳۷} گردیده و تغییر شکل لوله‌های حفاری در محدوده‌ی شیرهای فوران گیر عنوان کرده است.

قطعاً تمامی موارد بالا در وقوع حادثه روی دکل Deep Water Horizon بی‌تأثیر نبوده‌اند و احتمالاً عدم بروز هر یک از این عوامل مانع از آتش گرفتن دکل، از دست رفتن جان یازده نفر، خسارات زیان‌بار اقتصادی و اثرات ناگوار زیست محیطی می‌شد. مهم‌ترین عاملی

تفکیک گر گاز هدایت شده و سبب گردیده گاز جریان یافته به جای دور شدن از سکو در سطح سکو پراکنده شود. در نتیجه حجمی از آتش‌سوزی روی سکو ایجاد شده که سیستم اطفاء حریق دکل قادر به خاموش کردن آن نبوده است. طراحی تفکیک گر گاز برای جریان سیالات با حجم کم در نظر گرفته شده و برای جریان سیالات با حجم زیاد، باید جریان از طریق خط هدایت کننده‌ی ۱۴" (Over Board) به خارج از محیط سکو هدایت گردد. با پراکنده شدن گاز روی سکوی حفاری، زمینه‌ی ایجاد جرقه به صورت حجم انبوهی از گاز قابل اشتعال مهیا شده است.

■ دلیل هشتم درباره‌ی شیرهای فوران گیر بوده است. با از دست رفتن کنترل چاه و متعاقب آن انفجار و آتش‌سوزی، شیرهای فوران گیر قادر به نشت‌بندی دهانه‌ی چاه نبوده‌اند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که در گزارش آمده عوامل مؤثر در وقوع حادثه‌ی چاه به‌طور خلاصه عبارتند از:

- سیمان نامناسب پشت لوله‌های جداری و Shoe Track
- عدم تبدیل حالت خود پرشوندگی به شیر

پانویس‌ها

- | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1. Macondo | 14. Swaco | 26. Influx |
| 2. BP (British Petroleum) | 15. Centralizers | 27. VBR; Variable Bottom Ram |
| 3. Top Kill | 16. MMS; Mineral Management Service | 28. Emergency Disconnect System |
| 4. Static Kill | United States | 29. Automatic Mode Function |
| 5. Relief Well | 17. Differential | 30. BSR; Blind Shear Ram |
| 6. Dry Test | 18. Float | 31. Risk Management and Communication |
| 7. Spacer | 19. Shoe | 32. Well Design and Construction |
| 8. Kill Line | 20. Float Collar | 33. Risk Assessment and Process Safety |
| 9. Trip Tank | 21. Fluid Loss Additives | 34. Operations |
| 10. MGS; Mud Gas Separator | 22. Cement Contamination | 35. Cement Bond Log |
| 11. BOP | 23. Cement Stability | 36. Dry Stem Test. |
| 12. Sperry Sun | 24. Temporary Abandonment Procedures | 37. Emergency Disconnect System |
| 13. Anadarko | 25. Kick Detection | |