



تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران (Blow out) چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری با استفاده از روش پایبونی (Bow-Tie)

مصطفی میرزایی علی‌آبادی: استادیار، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

ایرج محمد فام: استاد، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

احمد رضا احمدی گهر: (نویسنده مسئول) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت سلامت، ایمنی و محیط زیست HSE، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. aahmadi.hse@Gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

فوران،

سیلان،

ارزیابی ریسک،

تحلیل پایبونی (BTA)

زمینه و هدف: یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین خطرات صنعت حفاری در زمینه نفت و گاز، خطر فوران چاه‌های نفت و گاز است. فوران چاه می‌تواند به پیامدهای جبران‌ناپذیری، از قبیل انفجار، تلفات شدید انسانی و فجایع زیست‌محیطی منجر گردد. آنالیز ریسک یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی خطرات، طراحی اقدامات کاهش خطر و افزایش سطح ایمنی در این صنایع است. در همین راستا مطالعه حاضر با هدف شناسایی علل ریشه‌ای و ارزیابی ریسک فوران چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری، با استفاده از تکنیک آنالیز پایبونی (Bow tie Analysis (BTA) انجام گرفت.

روش بررسی: در این مطالعه علل ریشه‌ای فوران چاه در بخش ساحلی چاه‌های اکتشافی صنعت حفاری، با به‌کارگیری تکنیک FTA شناسایی شد. همچنین با استفاده از روش ETA، پیامدهای مرتبط با شکست هر یک از موانع کنترل فوران پیش‌بینی و احتمال هر پیامد محاسبه گردید. در نهایت با استفاده از دیاگرام BTA مسیر حادثه و موانع کنترلی آن از علل تا پیامدها ترسیم و بررسی گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج بدست آمده، در مجموع ۲۸ علت یا نقص (رویداد پایه) در بروز رویداد اصلی یا همان سیلان (Kick) دخالت دارند، همچنین ۸ لایه کنترلی از پیشگیری از وقوع فوران شناسایی گردید. رویداد های پایه همراه با احتمالات رخداد و میزان اهمیت هریک در سمت چپ و پیامدهای بعد از رویداد اصلی همراه با احتمالات رخداد هریک در سمت راست دیاگرام BTA مشخص گردید. احتمال وقوع رویداد اصلی (سیلان) و پیامد نهایی (فوران) به ترتیب $10^{-1} \times 1/23$ و $10^{-3} \times 2/94$ محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج تحلیل دیاگرام BTA در این مطالعه، ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری و خطای انسانی از قبیل پر نکردن مناسب چاه با سیال حفاری در زمان لوله بالا کردن (Trip up) به‌عنوان مهم‌ترین علل ریشه‌ای در ایجاد سیلان شناخته شد. همچنین از بین لایه‌های کنترلی فوران لایه اول (تشخیص به موقع سیلان) و عملکرد صحیح سیستم فوران گیر سرچاهی (Blowout Preventer (BOP)، مهم‌ترین نقش را در پیشگیری از وقوع فوران ایفا می‌کنند.

تعارض منافع: گزارش نشده است.

منبع حمایت کننده: گزارش نشده است.

شیوه استناد به این مقاله:

Mirzaee Aliabadi M, Mohammadfam I, Ahmadi gahar A. Root causes analysis of the Blow out of oil and gas wells in the drilling industry using Bow-Tie analysis. Iran Occupational Health.2019 (Feb-Mar);15(6):16-24.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 1.0 صورت گرفته است.



Root causes analysis of the Blow out of oil and gas wells in the drilling industry using Bow-Tie analysis

Mostafa Mirzaee Aliabadi, Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Iraj Mohammadfam, Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Ahmadreza Ahmadi gahar, (*Corresponding Author) MSc Student, Health, Safety & Environment Management (HSE-MS), School of Health, Department of Occupational Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. aahmadi.hse@gmail.com

Abstract

Background: One of the major concerns in the oil and gas drilling industry are Blowouts. Blowout could have severe consequences, such as fire and explosions, releases of toxic gases and environmental disasters. The aim of this study is to identify the root causes of kick and blowout in drilling industry.

Methods: In this study, FTA investigates root causes of a kick while ETA explores the possible consequences (including blowout) arising from a kick.

Bow Tie Analysis (BTA) combines FTA and ETA to explore the root causes and consequences (blowout) of a kick in onshore exploration

Results: 28 basic event (root causes) have been identified for kick. Also to mitigate kick consequences, 8 safety barriers recognized. The probability of kick and blowout was calculated as $1/23 \times [10]^{-1}$ and $2/94 \times [10]^{-3}$, respectively. The order of importance measure of each root causes was listed.

Conclusion: In this study, Getting into the high pressure zone and not filling well with drilling mud during the trip up, was identified as the most important root causes of kick. Furthermore, early diagnosis of kick and the proper functioning of Blow-Out Preventer (BOP) were recognized as the first safety barrier to prevent the blowout.

Conflicts of interest: None

Funding: None

Keywords

Blowout,
Kick,
Risk assessment,
Bow Tie Analysis
(BTA)

Received: 04/07/2017

Accepted: 22/10/2018

How to cite this article:

Mirzaee Aliabadi M, Mohammadfam I, Ahmadi gahar A. Root causes analysis of the Blow out of oil and gas wells in the drilling industry using Bow-Tie analysis. Iran Occupational Health.2019 (Feb-Mar);15(6):15-24.

This work is published under CC BY-NC-SA 1.0 licence

مقدمه

سیلان، شناسایی به‌موقع سیلان در صورت بروز، پیشگیری از فوران و عملیات کشتن (Kill) چاه صورت می‌گیرد [۱۱ و ۹].

به‌طور کلی فوران چاه در صنعت حفاری امری محتمل بوده و عوامل گوناگونی می‌توانند در وقوع آن دخیل باشند. حوادث فوران چاه به‌وفور در سطح جهان (فاجعه زیست محیطی خلیج مکزیک در میدان نفتی Macondo) و همچنین در میدان‌های مختلف ایران (فوران چاه شماره ۲۴ میدان نفت شهر و چاه شماره ۴۱ میدان نفت سفید) رخ داده است [۱۲]. طبق تقسیم‌بندی، فوران جزء حوادث نادر و بحرانی است و اغلب خسارات سنگینی به همراه داشته و به‌سختی قابل کنترل می‌باشد. صنعت حفاری در زمینه نفت و گاز در دو بخش جداگانه ساحلی و فراساحل فعالیت می‌کند همچنین نوع چاه‌های حفاری از لحاظ کارکردی شامل چاه‌های اکتشافی و توسعه ای می‌باشند. فرآیند حفاری چاه نیز شامل فازهای مختلفی از قبیل عملیات حفاری (Drilling)، عملیات پیمایش چاه (Tripping) و عملیات لوله جدار و سیمان کاری (Casing & Cementing) است [۲].

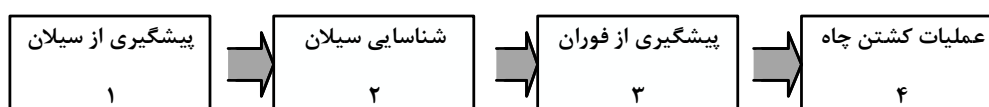
تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه فوران و عوامل تأثیر گزار در آن در سطح جهان و ایران صورت گرفته است که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات خاکزاد و همکاران اشاره کرد [۹]. پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه فوران بیشتر بر روی عملیات حفاری (Drilling)، متمرکز شده و اثر سایر فازهای حفاری و همچنین نقش عواملی همچون رویدادهای طبیعی از قبیل رانش زمین، جنگ و عملیات تروریستی در بروز فوران را لحاظ نکرده‌اند.

با توجه به اهمیت صنعت حفاری، وسعت میدان‌های نفت و گاز و همچنین تاریخچه حوادث فوران چاه در ایران و ابعاد این حوادث در سطح ملی و بین‌المللی، این مطالعه باهدف تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران چاه‌های اکتشافی (نفت و گاز) در بخش ساحلی ایران،

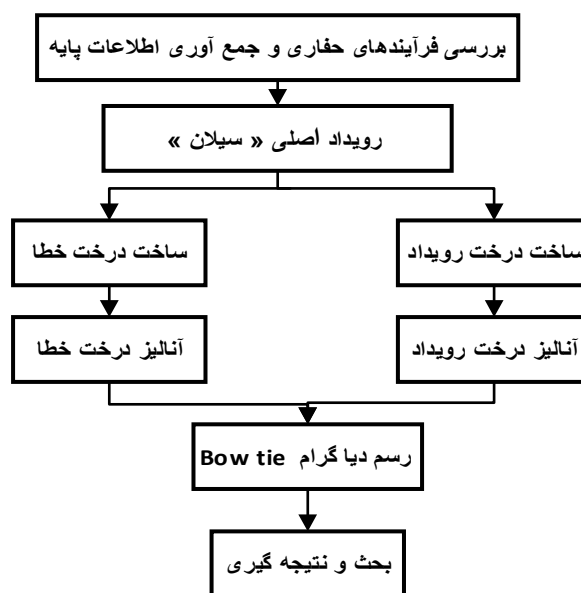
صنایع فرآیندی به دلیل مواد و شرایط خطرناک جزء صناعی با ریسک بالا بوده و به همین دلیل مستعد بروز حوادث بزرگ هستند. صنعت حفاری به دلیل شرایط عملیاتی حاد، تراکم زیاد تجهیزات و کارکنان، حجم قابل توجه مواد هیدروکربنی و شیمیایی و همچنین محدودیت زمانی پاسخگویی در شرایط اضطراری یکی از مهم‌ترین صنایع فرآیندی ریسک بالا در جهان محسوب می‌شود [۱ و ۲]. همچنین دور و خشن بودن محیط کار حفاری به‌طور قابل توجهی خطرات شغلی این صنعت را افزایش داده است، بطوریکه عملیات حفاری نفت و گاز در مقایسه با دیگر حوزه‌های نفتی بالاترین نرخ حوادث و بیشترین میزان روزهای از دست‌رفته کاری را دارند [۳-۵].

یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین حوادث صنعت حفاری، فوران چاه می‌باشد که می‌تواند باعث صدمات تعداد زیادی از پرسنل، آتش‌سوزی و انفجارهای بزرگ، سرریز شدن میلیون‌ها بشکه نفت به محیط اطراف و ایجاد فجایع زیست محیطی شود. طبق تعریف فوران عبارت است از جریان کنترل نشده هیدروکربن (گاز، نفت و میعانات گازی) و یا آب‌سور از چاه به محیط اطراف که در اثر سیلان (Kick) کنترل نشده رخ می‌دهد [۶]. سیلان نیز هجوم ناخواسته، سیالات سازند به چاه در اثر عدم کنترل چاه می‌باشد. به عبارتی در این حالت فشار سیالات سازند یعنی فشار منفذی، بیش از فشار اعمال‌شده توسط ستون سیال حفاری در پایین چاه یا همان فشار ته چاه می‌گردد. [۷-۹].

بر اساس تجربیات از هر ۱۱۰ سیلان رخ داده یک عدد آن منجر به فوران می‌شود. در صورتی که سیلان به‌موقع شناسایی و به‌درستی کنترل نگردد پدیده فوران چاه دور از ذهن نیست. به همین دلیل کنترل سیلان نقشی حیاتی در پیشگیری از فوران دارد [۱۰]. عملیات کنترل چاه (شکل ۱) شامل اقدامات فنی، مدیریتی و سازمانی است که با هدف حفظ کلیت چاه از طریق پیشگیری از



شکل ۱- توالی فازهای کنترل چاه



شکل ۲- نمایش گرافیکی مراحل انجام تحقیق

رویداد اصلی با استفاده از تکنیک FTA شناسایی گردید. یکی از مهم ترین خروجی‌های آنالیز درخت خطا در روش BTA محاسبه میزان اهمیت (Importance Measures) هر یک از رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی است. یکی از روش‌های محاسبه میزان اهمیت هر یک از رویدادهای پایه، استفاده از روش Fussell-FV Vesely می‌باشد. در این روش جهت محاسبه میزان اهمیت هر یک از رویدادهای پایه، رویداد موردنظر را برابر صفر در نظر می‌گیرند و احتمال رویداد اصلی را با قوانین FTA محاسبه می‌کنند سپس با استفاده از رابطه ۱ میزان اهمیت رویداد موردنظر را به دست می‌آورند [۱۵]. جهت محاسبه میزان اهمیت رویدادهای پایه در این تحقیق از روش FV طبق رابطه ۱ استفاده گردید.

$$I_i^{FV} = \frac{P_r(TE) - P_r(TE-x)}{P_r(TE)} \quad \text{رابطه ۱:}$$

I_i^{FV} : میزان اهمیت رویداد پایه یا رویداد میانی مورد نظر
 $P_r(TE)$: احتمال رویداد اصلی
 $P_r(TE-x)$: احتمال رویداد اصلی بدون در نظر گرفتن رویداد مورد نظر

در مرحله سوم به منظور شناسایی و محاسبه احتمال پیامدهای مختلفی که در صورت وقوع رویداد اصلی و نقص هر یک از موانع کنترلی ممکن است رخ دهد از تکنیک ETA استفاده گردید. ETA یک تکنیک مدل

با استفاده از ارزیابی ریسک پاپیونی BTA انجام گرفت.

روش بررسی

مطالعه حاضر با در نظر گرفتن «سیلان» به عنوان رویداد اصلی، بر روی عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری سیلان، موانع کنترلی و پیامدهای ناشی از شکست این موانع متمرکز شده است. شکل شماره ۲ مراحل انجام این مطالعه را نشان می‌دهد.

در مرحله نخست با توجه به بررسی متون و گزارش حوادث چاه‌های نفتی، سیلان به عنوان رویداد اصلی در نظر گرفته شد. در ادامه با توجه به اینکه دیاگرام BTA از ترکیب دو تکنیک آنالیز درخت خطا (FTA) و آنالیز درخت رویداد (ETA) ایجاد می‌شود، ابتدا درخت خطا و درخت رویداد ترسیم گردید [۱۳]. روش FTA مدلی گرافیکی است که روابط بین یک رویداد اصلی را با رویدادهای پایه در یک سیستم نشان می‌دهد. این روش بر اساس شناسایی یک رویداد نامطلوب خاص که باید تجزیه و تحلیل شود (به عنوان مثال شکست سیستم) و به آن رویداد اصلی می‌گویند استوار بوده و درواقع ترکیب نواقصی که می‌توانند منجر به رخداد رویداد خاص موردنظر شوند را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این روش ارتباط بین رویدادها و علل آنها با استفاده از دروازه‌های منطقی AND و OR نشان داده می‌شود [۱۳ و ۱۴]. بنابراین در مرحله دوم عوامل مؤثر در بروز

سازی قیاسی است که با ایجاد دوشاخه موفقیت و شکست به طور همزمان به ارزیابی پیامد یک رویداد منفرد می پردازد [۱۶].

در ادامه به منظور شناسایی و محاسبه احتمال پیامدهایی که در صورت شکست هر یک از موانع کنترلی، ممکن است حادث شود، درخت ETA با حضور متخصصین ایمنی و عملیاتی در حوزه حفاری ترسیم گردید. سپس جهت کمی سازی درخت خطا و درخت رویداد و تعیین احتمال وقوع رویدادهای پایه و همچنین احتمال نقص هر یک از موانع کنترلی، از نظر متخصصین صنعت حفاری، پایگاههای داده از قبیل OREDA [۱۷] و همچنین پژوهشهای صورت گرفته در زمینه آنالیز ریسک فوران از جمله مطالعات خاکزاد و همکاران استفاده گردید [۹]. در مرحله بعد بر اساس ارتباط منطقی بین رویدادهای پایه با رویدادهای میانی، احتمال رویدادهای میانی و در نهایت احتمال رویداد اصلی از طریق قوانین ترکیب دروازه ها طبق روابط ۲ و ۳ (آنالیز درخت خطا) و احتمال رخداد هر پیامد نهایی از طریق رابطه ۴ (آنالیز درخت رویداد) محاسبه گردید. قوانین ترکیب دروازه ها:

AND Gate: $P(B) \times P$

$(A.B) = P(A)$

OR Gate: $P(A+B) = P(A) + P(B) - P$

$(A).P(B)$

رابطه ۲: $P_{And}(E) = \prod_{i=1}^k p(E_i)$

رابطه ۳: $P_{Or}(E) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p(E_i))$

k : تعداد کل رویدادهای ورودی به دروازه موردنظر
 $P_{And}(E)$: احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد

اصلی با ورودی And

$P_{Or}(E)$: احتمال وقوع رویداد میانی،

یا رویداد اصلی با ورودی OR

$P(E_i)$: احتمال رخداد رویدادها در درخت خطا E_i

برای $K = 1, 2, 3$

رابطه ۴:

$P_r(\text{Consequence}) = P_r(TE) \times \prod_{j=1}^n P_r(E_j)$

$P_r(\text{Consequence})$: احتمال رخداد هریک از پیامدها

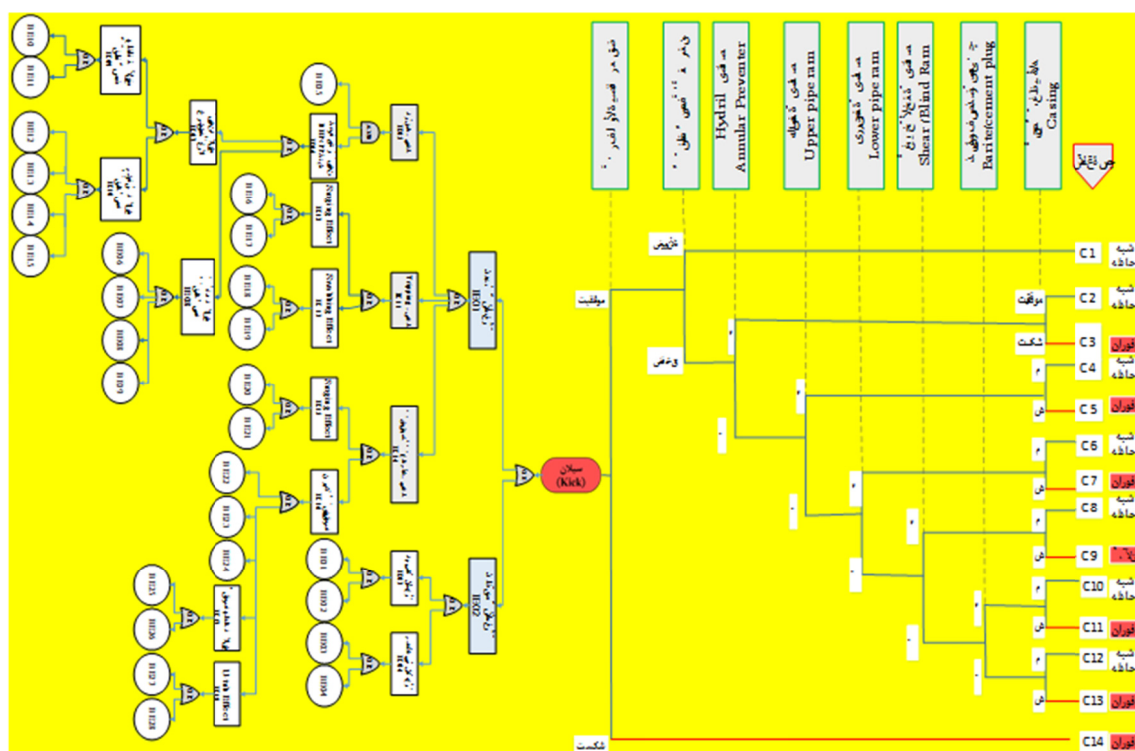
$P_r(TE)$: احتمال رویداد اصلی

$P_r(E)$: احتمال شکست یا موفقیت لایه های حفاظتی
طبق شکل ۲، مرحله پایانی این مطالعه آنالیز رویداد منتخب با استفاده از BTA است. BTA در زمینه مدیریت ریسک از مؤثرترین و نوین ترین روش ها به شمار می رود. این تکنیک درواقع قابلیت های درخت خطا و درخت رویداد را با یکدیگر ترکیب می کند؛ یعنی درخت خطا در سمت چپ BTA علل ریشه ای منجر به رویداد اصلی را نشان می دهد و درخت رویداد در سمت راست آن چگونگی شکست موانع ایمنی و نمایان شدن پیامدهای مختلف را به تصویر می کشد. از قابلیت های این روش توانایی ارزیابی سناریوهای مختلف بر اساس احتمال و مسیرهای رخداد حادثه است. دیگرام BTA درواقع چگونگی عملکرد تجهیزات، افراد و سیستم های ایمنی در روند یک سناریوی معین و همچنین ارتباط بین خطاها و پیامدهای آنها را همزمان نشان می دهد [۱۸ و ۱۹]. درواقع در این مرحله FTA و ETA رسم شده از نقطه مشترک یا همان سیلان (به عنوان رویداد اصلی) باهم ترکیب شدند.

یافته ها

در این مطالعه نیز سیلان به عنوان رویداد اصلی در نظر گرفته شد و قسمت درخت خطای تکنیک پاپیونی در دو بخش شامل رویدادهای خارجی و رویدادهای داخلی، جهت شناسایی عوامل مؤثر در بروز سیلان مورد ارزیابی قرار گرفت. در رویدادهای خارجی نقش عوامل طبیعی و عوامل ناخواسته مانند جنگ و عملیات تروریستی و در رویدادهای داخلی، نقش سه فاز اصلی عملیات حفاری چاه شامل عملیات حفاری، Tripping و عملیات لوله جداری و سیمان کاری، به تفکیک بررسی گردید. در نهایت درخت خطا در قالب آنالیز پاپیونی با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی مربوطه مطابق شکل شماره ۳ دیگرام BTA ترسیم گردید.

پس از ترسیم درخت خطا، احتمال سیلان (رویداد اصلی) با استفاده از ترکیب دروازه های منطقی و روابط ۲ و ۳ محاسبه شد. در ادامه میزان اهمیت هر یک از رویدادهای پایه در بروز سیلان به تفکیک، با استفاده از رابطه ۴ تعیین گردید. جدول شماره ۱ احتمال رخداد رویدادهای پایه و میزان اهمیت هر رویداد را نشان می دهد.



شکل ۳- دیاگرام Bow-Tie Analysis و اجزاء تشکیل دهنده آن

جدول ۱- احتمال رخداد و میزان اهمیت رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی (احتمال رخداد در یک سال)

رویداد	توصیف رویداد	میزان احتمال رخداد	میزان اهمیت رویداد	رویداد	توصیف رویداد	میزان احتمال رخداد	میزان اهمیت رویداد
BE01	زلزله	1×10^{-3}	$2/4 \times 10^{-2}$	BE15	خطای اپراتور در مخلوط کردن صحیح چگالی سیال حفاری	3×10^{-2}	$1/6 \times 10^{-2}$
BE02	رائش زمین	5×10^{-3}	$2/4 \times 10^{-2}$	BE16	راندن رشته حفاری درون چاه (Trip in)	9×10^{-3}	$3/2 \times 10^{-2}$
BE03	جنگ و بمباران هوایی	1×10^{-3}	$3/2 \times 10^{-2}$	BE17	پمپاژ سیال حفاری با سرعت زیاد (استروک بالای پمپ)	1×10^{-2}	$3/2 \times 10^{-2}$
BE04	عملیات خرابکارانه و تروریستی	1×10^{-3}	$3/2 \times 10^{-2}$	BE18	لوله بالا کردن با سرعت زیاد (Trip up کردن سریع)	1×10^{-2}	$4/2 \times 10^{-2}$
BE05	ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری	$1/5 \times 10^{-1}$	$3/7 \times 10^{-1}$	BE19	پر نکردن مناسب چاه با سیال در زمان Trip up کردن	4×10^{-2}	$2/6 \times 10^{-1}$
BE06	نقص سیستم پمپاژ (Pump Failure)	3×10^{-2}	$3/2 \times 10^{-2}$	BE20	پمپاژ با سرعت زیاد (استروک بالای پمپ)	1×10^{-2}	$2/4 \times 10^{-2}$
BE07	نقص سیستم برق (Power failure)	$2/7 \times 10^{-4}$	$2/4 \times 10^{-2}$	BE21	راندن لوله جداری به درون چاه (Casing Trip in)	9×10^{-3}	$2/4 \times 10^{-2}$
BE08	نقص در سیستم کنترل گر پمپ	1×10^{-3}	$3/2 \times 10^{-2}$	BE22	خطا در انتخاب نوع کلاس سیمان	5×10^{-3}	$3/4 \times 10^{-2}$
BE09	خطای اپراتور	3×10^{-2}	$3/2 \times 10^{-2}$	BE23	خطا در اندازه‌گیری صحیح وزن سیمان	5×10^{-3}	$2/4 \times 10^{-2}$

رویدادها و سناریوهای مختلف حوادث پس از رویداد اصلی، مطابق شکل شماره ۳ دیاگرام BTA ترسیم

بخش درخت رویداد، یا در نظر گرفتن هشت لایه کنترلی از سیستم‌های ایمنی و با هدف تعیین توالی

جدول ۱- ادامه

BE10	هرز روی سیال حفاری از طریق دالیز یا سازند حفاری	۳×۱۰ ^{-۴}	۹/۷×۱۰ ^{-۴}	BE24	خطا در مقدار مواد اضافه‌شده به سیمان	۵×۱۰ ^{-۴}	۲/۴×۱۰ ^{-۴}
BE11	هرز روی سیال در اثر شکست سازند	۴/۲×۱۰ ^{-۴}	۷/۳×۱۰ ^{-۳}	BE25	خطا در محاسبه مقدار سیمان موردنیاز Casing	۵×۱۰ ^{-۳}	۲/۴×۱۰ ^{-۲}
BE12	اثرات دما بر سیال حفاری	۲/۵×۱۰ ^{-۳}	۲/۴×۱۰ ^{-۲}	BE26	هرز روی سیمان از طریق سازند حفاری	۸×۱۰ ^{-۳}	۲/۴×۱۰ ^{-۲}
BE13	اثرات ورود نفت، آب یا گاز به سیال	۷×۱۰ ^{-۳}	۲/۵×۱۰ ^{-۲}	BE27	Float shoe نقص	۸×۱۰ ^{-۳}	۲/۴×۱۰ ^{-۲}
BE14	خطا در جهت‌اندازه‌گیری چگالی	۳×۱۰ ^{-۴}	۲/۶×۱۰ ^{-۲}	BE28	Float collar نقص	۸×۱۰ ^{-۳}	۲/۴×۱۰ ^{-۲}

جدول ۲- احتمال شکست لایه‌های حفاظتی کنترل‌کننده‌ی سیلان (احتمال شکست در یک سال)

شماره مانع	توصیف مانع (Safety Barrier)	میزان احتمال	شماره مانع	توصیف مانع (Safety Barrier)	میزان احتمال
۱	تشخیص سیلان	۲/۴×۱۰ ^{-۲}	۵	بستن رمز پایین Lower pipe ram	۲/۴×۱۰ ^{-۲}
۲	افزایش وزن سیال حفاری	۲×۱۰ ^{-۱}	۶	بستن رمز کورکننده Shear Ram	۲/۴×۱۰ ^{-۲}
۳	بستن Annular Preventer	۲/۴×۱۰ ^{-۲}	۷	پلاک باریتی یا سیمانی	۷×۱۰ ^{-۳}
۴	بستن رمز بالا Upper pipe ram	۲/۴×۱۰ ^{-۲}	۸	لوله جداری چاه (Casing)	۱/۵×۱۰ ^{-۱۱}

جدول ۳- سناریوهای منجر به پدیده فوران، احتمال رخداد هر کدام و احتمال کلی بروز فوران (احتمال رخداد در یک سال)

فوران	C ₃	C ₅	C ₇	C ₉	C ₁₁	C ₁₃	C ₁₄	احتمال کلی بروز فوران
احتمال رخداد	۴/۶×۱۰ ^{-۵}	۱/۱×۱۰ ^{-۶}	۱/۵×۱۰ ^{-۷}	۶/۴×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۵×۱۰ ^{-۱۱}	۳/۸×۱۰ ^{-۱۳}	۲/۹×۱۰ ^{-۳}	۲/۹۴×۱۰ ^{-۳}

باحالت شکست یا موفقیت این لایه‌ها و پیامدها در سمت راست دیاگرام BTA قرار گرفته است.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شکل ۳ نتایج مرحله ترسیم درخت خطای دیاگرام BTA نشان داد، در مجموع ۲۸ علت یا نقص (رویداد پایه) در رخداد سیلان دخیل هستند که این امر حاکی از توانایی تحلیل دقیق روش FTA است. نتایج این مطالعه با مطالعات زیر موردبررسی و مطابقت قرار گرفت. در مطالعه خاکزاد و همکاران درخت خطای ترسیم شده، تنها به فاز حفاری عملیات چاه در بروز سیلان پرداخته است، و در آن ۱۰ رویداد پایه شناسایی شده است که با فاز حفاری این مطالعه که دارای ۱۱ رویداد پایه است، همخوانی دارد [۹]. نتایج آنالیز کمی درخت خطا (جدول ۱) در این مطالعه نشان داد که رویدادهای پایه BE05: (ورود به لایه پرفشار در

گردید. جهت تعیین احتمال شکست هریک از لایه‌های کنترلی و اولویت فعال شدن هر کدام از لحاظ عملیاتی، از نظر متخصصان ایمنی، افراد عملیاتی مربوطه و همچنین داده‌های ارائه شده در راهنما OREDA استفاده شد [۱۷]. جدول ۲ احتمال شکست لایه‌های حفاظتی کنترل‌کننده‌ی سیلان را نشان می‌دهد.

در ادامه احتمال رخداد هریک از پیامدهای نهایی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید. جدول ۳ سناریوهای منجر به پدیده فوران، احتمال رخداد هر کدام و همچنین احتمال کلی رخداد فوران در چاه، را نشان می‌دهد.

دیاگرام BTA با ترکیب درخت خطا و درخت رویداد ترسیم گردید و اطلاعات آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هما گونه که در شکل ۳ مشخص است عوامل به وجود آورنده رویداد اصلی همراه با شاخه‌ها و دروازه‌های منطقی در سمت چپ دیاگرام و لایه‌های حفاظتی همراه

است [۸].

دلیل تفاوت احتمالات محاسبه شده در نتایج مطالعات فوق با مطالعه حاضر این است که در این مطالعه فازهای مختلف عملیات حفاری و نقش آن‌ها با تمرکز بر رویداد اصلی (سیلان) به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفته و رویدادهای پایه ای هر فاز در درخت رویداد دیاگرام BTA بسط داده شده است. به عبارتی تعداد رویدادهای پایه‌ای دخیل در رخداد سیلان و همچنین تعداد لایه‌های کنترلی و سناریوهای منجر به پیامد نهایی این مطالعه در مقایسه با دیگر مطالعات مشابه که تنها به بررسی یک فاز از عملیات حفاری پرداخته است، بیشتر بوده است. همچنین در نظر گرفتن رویدادهایی مانند رانش زمین، زلزله، جنگ (مانند چاه‌های ۲۳ و ۲۹ کنگان و چاه‌های میدان سروش) و عملیات تروریستی (مانند چاه ۵۰ کریت اهواز) که می‌توانند منجر به فوران شوند نیز دلیل دیگری بر این تفاوت است.

با توجه به نتایج تحلیل دیاگرام پاپیونی در این مطالعه خطای انسانی از قبیل ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری و پر نکردن مناسب چاه با سیال حفاری در زمان لوله بالا کردن (Trip up) به‌عنوان مهم‌ترین رویداد های پایه ای در ایجاد سیلان و تشخیص به‌موقع سیلان و عملکرد صحیح سیستم فوران گیر سرچاهی Blowout Preventer (BOP)، به‌عنوان اولین و مهمترین لایه‌های کنترلی پیشگیری‌کننده از تبدیل شدن سیلان به فوران شناخته شدند. بر همین اساس تمرکز بر شناسایی، پیشگیری و کنترل به‌موقع علل یادشده، همچنین کاهش شکست‌های انسانی و طراحی ایمن تجهیزات فرایندی، نقش اساسی را در پیشگیری از وقوع حوادث در این‌گونه صنایع دارند.

قابلیت‌های روش پاپیونی در ساده‌سازی، تعیین و تشخیص عوامل علت و معلولی، همچنین خلاصه‌سازی و تبدیل مقدار زیادی از داده‌های کمی به تعداد نسبتاً کمی از سناریوهای رایج، رویکرد پاپیونی را به تکنیکی مؤثر برای ارائه و ابلاغ ریسک پروژه و مدیریت آن تبدیل کرده است که برای تمامی سطوح مسئولان و کارکنان پروژه قابل درک است.

نتایج این مطالعه نشان داد که اجرای روش‌های آنالیز ریسک از قبیل روش پاپیونی BTA در مدیریت ریسک

سازند حفاری و BE19: (پر نکردن مناسب چاه با سیال در زمان Trip up کردن) به ترتیب با احتمال $10 \times 1/5$ و 4×10 بیشترین احتمال را از بین رویدادهای داخلی مؤثر در بروز سیلان داشتند. این نتایج نیز با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات خاکزاد و Majeed Abimbola مطابقت دارد [۹ و ۲۰]. همچنین میزان احتمال کلی رویداد اصلی یا سیلان محاسبه شده در این مطالعه ($10 \times 1/23$) به دست آمد که این مقدار احتمال با مطالعات خاکزاد و Majeed Abimbola و همکاران متفاوت بود [۹ و ۲۱].

میزان اهمیت هر یک از رویدادهای پایه بر اساس رابطه ۱ روش FV در جدول ۱ آمده است که در آن رویدادهای BE05: (ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری)، BE19: (پر نکردن مناسب چاه با سیال در زمان Trip up کردن) و BE18: (لوله بالا کردن یا Trip up کردن سریع)، در بین رویدادهای پایه دارای بیشترین اهمیت و بیشترین تأثیر در وقوع رویداد رأس می‌باشند.

با توجه به شکل ۳ دیاگرام BTA، نتایج مرحله ترسیم درخت رویداد نشان داد که در مجموع ۱۴ سناریو در حالت‌های مختلف شکست یا موفقیت لایه‌های کنترلی و توالی رویدادها می‌تواند به وجود آید که ۷ سناریو منجر به رخداد فوران و ۷ سناریو بدون پیامد خاص (شبه حادثه) است. مطابق جدول ۳ از میان سناریوهای منجر به فوران سناریوی C_{14} و سناریوی C_3 دارای بیشترین احتمال رخداد و سناریوی های C_{11} و C_{13} دارای کمترین احتمال رخداد می‌باشند. با جمع احتمال سناریوهای منجر به رخداد فوران میزان احتمال کلی فوران چاه $10 \times 2/94$ به دست آمد. همچنین از بین لایه های کنترلی فوران لایه اول (تشخیص به موقع سیلان) و عملکرد صحیح سیستم فوران گیر سرچاهی Blowout Preventer (BOP)، مهمترین نقش را در پیشگیری از وقوع فوران داشتند. این نتایج با مطالعات زیر موردبررسی و مطابقت قرار گرفت. در مطالعه خاکزاد و همکاران ۱۰ پیامد و سناریو در بخش درخت رویداد BTA شناسایی شد و احتمال نهایی رخداد فوران $10 \times 2/25$ محاسبه شده است [۹]. همچنین در مطالعه Faisal Khan و همکاران ۶ پیامد و سناریو در بخش درخت رویداد نمودار BTA در نظر گرفته‌شده

Bayesian approach. *Safe Sci.* 2013;57:108–17.

10. Chung S, Kim S, Yang Y. Use of hazardous event frequency to evaluate safety integrity level of subsea blowout preventer. *Int J Naval Architect Ocean Engineer.* 2016;8:262-276.

11. Abimbola M, Khan F. Development of an Integrated Tool for Risk Analysis of Drilling Operations. *Process Safe Enviro Protect.* 2016.

12. Farajzadeh dehkordi AR, Kuti S. Eruptions and control of oil well blowout causes and methods of control wells. First International Conference inspection and safety in the oil and energy industries. Seminar alchemy of energy. 2010 [Persian].

13. Cai B, Liu Y, Zhang Y, Fan Q, Liu Z, Tian X. A dynamic Bayesian networks modeling of human factors on offshore Blowouts. *J Loss Prev Process Indust.* 2013;1-11.

14. Zulqarnain M, Tyagi M. Quantification of Risks Associated With a Representative Production Well in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2015.*

15. Vesely DL, Straub KD, Nolan CM, Rolfe RD, Finegold SM, Monson TP. Purified Clostridium difficile cytotoxin stimulates guanylate cyclase activity and inhibits adenylate cyclase activity. *Infect Immun.* 1981;33(1):285-91.

16. Al-shanini A, Ahmad A, Khan F. Accident modelling and safety measure design of a hydrogen station. *Int J Hydrogen Energy.* 2014;1-9.

17. Autor O, Autor SIM. OREDA: Offshore reliability data handbook: PO Box; 2002.

18. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliabil Engineer Syst Safe.* 2012;104:36-44.

19. Mokhtari K, Ren J, Roberts Ch, Wang J. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *J Hazard Mat.* 2011;192:465–475.

20. Abimbola M, Khan F, Khakzad N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. *J Loss Prev Process Indust.* 2014;30:74-85.

21. Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safe Sci.* 2015; 76:133–144.

صنایع فرآیندی نفت و گاز از قبیل صنعت حفاری می‌توانند نتایج مطلوبی جهت ایجاد نگرش دقیق در تحلیل علل وقوع حوادث، برآورد کمی از میزان احتمال وقوع رویدادهای نامطلوب و همچنین پیشگیری از حوادث و طراحی کنترل‌های کاهش ریسک، داشته باشند.

تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد آقای احمدرضا احمدی گهر در دانشگاه علوم پزشکی همدان استخراج شده است. نویسندگان بدینوسیله از شرکت ملی حفاری ایران و تمام کسانی که در راستای اجرای این پژوهش همکاری کردند، کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آورند.

References

1. Khakzad N, Khana F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safe Enviro Protect.* 2013;46-53.
2. Tamima N, Laboureura MD, Mentzera AR, Hasanb AR, Mannana MS. A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents. *Process Safe Enviro Protect.* 2017; 106:256–262.
3. Song G, Khan F, Wang H, Leighton Sh, Yuan Z, Liu H. Dynamic occupational risk model for offshore operations in harsh environments. *Reliabil Engineer Syst Safe.* 2016.
4. Ataallahi E, Shadizadeh SR. Fuzzy consequence modeling of blowouts in Iranian drilling operations; HSE consideration. *Safe Sci.* 2015;77:152 -159.
5. Heidari PA, Maknoon R, Taheri B, Bazyari M. Identification of Strategies to Reduce Accidents and Losses in Drilling Industry by Comprehensive HSE Risk Assessment-A Case Study in Iranian Drilling Industry. *J Loss Prev Process Indust.* 2016.
6. Liua R, Hasanb AR, Ahluwalia A, Mannana MS. Well specific oil discharge risk assessment by adynamic blowout simulation tool. *Process Safe Enviro Protect.* 2016;103:183–191.
7. Espen Skogdalen J, ErikVinnem J. Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study. *Reliabil Engineer Syst Safe.* 2012;1003:58–66.
8. Islam R, Khan F, Venkatesan R. Real Time Risk Analysis of Kick Detection: Testing and Validation. *Reliabil Engineer Syst Safe.* 2016
9. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A