سلامت کار ایران
دوره ۱۵، شماره ۶، بهمن و اسفند ۱۳۹۷
مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

# تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران (Blow out) چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری با استفاده از روش پاپیونی (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.
**احمدرضا احمدی گهر:** (*نویسنده مسئول) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت سلامت، ایمنی و محیطزیست 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

**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 کاهشی خطر و افزایش سطح ایمنی در این صنایع است. در همین راستا مطالعه حاضر با هدف شناسایی علل ریشه ای و ارزیابی ریسک فوران چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری، با استفاده از تکنیک آنالیز پاپیونی (Bow tie Analysis (BTA انجام گرفت.

**روش بررسی:** در این مطالعه علل ریشه ای 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 در پیشگیری از وقوع فوران شناسایی گردید. رویداد های پایه همراه با احتمالات رخداد و میزان اهمیت هریک در سمت چپ و پیامدها ی 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 $۱/۲۳ \times ۱۰^{-۱}$ و $۲/۹۴ \times ۱۰^{-۳}$ محاسبه شد.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج تحلیل دیاگرام BTA در این مطالعه، ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری وخطای 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.

**کلیدواژه‌ها**
فوران،
سیلان،
ارزیابی ریسک،
تحلیل پاپیونی (BTA)

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۳
تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۳۰

***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.

[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

Iran Occupational Health

Original Article
http://ioh.iums.ac.ir

Iran Occupational Health.2019 (Feb-Mar);15(6):16-24.

# 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×〖10〗^(-1) and 2/94×〖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

[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

## مقدمه

صنایع فرآیندی به دلیل مواد و شرایط خطرناک جزء صنایعی 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 قابل‌توجه مواد هیدروکربنی و شیمیایی و همچنین محدودیت زمانی پاسخگویی در شرایط اضطراری یکی از مهم‌ترین صنایع فرایندی ریسک بالا در جهان محسوب می‌شود [ ۱و۲]. همچنین دور و خشن بودن محیط کار حفاری به‌طور قابل‌توجهی 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 ازدست‌رفته کاری را دارند [۳-۵].

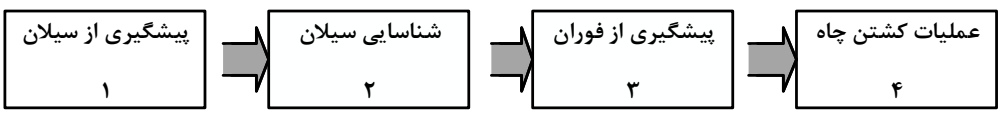
یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین حوادث صنعت حفاری، فوران چاه می‌باشد که می‌تواند باعث صدمات تعداد زیادی از پرسنل، آتش‌سوزی و انفجارهای بزرگ، سرریز شدن میلیون‌ها بشکه نفت به محیط اطراف و ایجاد فجایع زیست محیطی شود. طبق تعریف فوران عبارت است از جریان کنترل نشده هیدروکربن (گاز، نفت و میعانات گازی) و یا آب‌شور 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 می باشد. 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 رخداده یک عدد آن منجر به فوران می‌شود. درصورتی‌که 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 سیلان، شناسایی به‌موقع سیلان در صورت بروز، پیشگیری از فوران و عملیات کشتن (Kill) چاه صورت می‌گیرد [۹و۱۱].

به‌طورکلی 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) رخداده است [۱۲]. طبق تقسیم‌بندی، فوران جزء حوادث نادر و بحرانی است و اغلب خسارات سنگینی به همراه داشته و به‌سختی قابل‌کنترل می‌باشد. صنعت حفاری درزمینه نفت و گاز در دو بخش جداگانه ساحلی و فراساحل فعالیت می‌کند همچنین نوع چاه‌های حفاری ازلحاظ 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 جداری و سیمان‌کاری (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 ازجمله این مطالعات می‌توان به مطالعات خاکزاد و همکاران اشاره کرد [۹]. پژوهش‌های صورت گرفته درزمینه 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 نکرده اند.

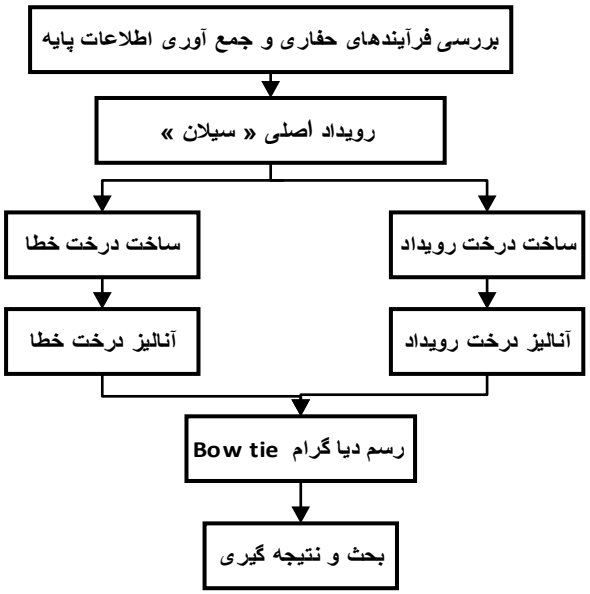
با توجه به اهمیت صنعت حفاری، وسعت میدان‌های نفت و گاز و همچنین تاریخچه حوادث فوران چاه در ایران و ابعاد این حوادث در سطح ملی و بین‌المللی، این مطالعه باهدف تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران چاه‌های اکتشافی (نفت و گاز) در بخش ساحلی ایران،




**شکل ۱**- توالی فازهای کنترل چاه



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]




**شکل ۲**- نمایش گرافیکی مراحل انجام تحقیق

با استفاده از ارزیابی ریسک پاپیونی BTA انجام گرفت.

## روش بررسی

مطالعه حاضر با در نظر گرفتن «سیلان» به‌عنوان رویداد اصلی، بر روی عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری سیلان، موانع کنترلی و پیامدهای ناشی از شکست این موانع متمرکزشده 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 به‌عنوان 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 تجزیه‌وتحلیل شود (به‌عنوان 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 [۱۳و۱۴]. بنابراین در مرحله دوم عوامل مؤثر در بروز 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) Veselys 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 می آورند[۱۵]. جهت محاسبه میزان اهمیت رویدادهای پایه در این تحقیق از روش FV طبق رابطه ۱ استفاده گردید.

رابطه ۱:
$$I_i^{Fv} = \frac{P_r(\mathrm{TE}) - P_r(\mathrm{TE}-x)}{P_r(\mathrm{TE})}$$

$I_i^{Fv}$ : میزان اهمیت رویداد پایه یا رویداد میانی مورد نظر

$P_r(\mathrm{TE})$ : احتمال رویداد اصلی

$P_r(\mathrm{TE}-x)$ : احتمال رویداد اصلی بدون در نظر گرفتن رویداد مورد نظر

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



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

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

در ادامه به‌منظور 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، ازنظر متخصصین صنعت حفاری، پایگاه‌های داده از قبیل OREDA [۱۷] و همچنین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه آنالیز ریسک فوران ازجمله مطالعات خاکزاد و همکاران استفاده گردید [۹]. در مرحله بعد بر اساس ارتباط منطقی بین رویدادهای پایه با رویدادهای میانی، احتمال رویدادهای میانی و درنهایت احتمال رویداد اصلی از طریق قوانین ترکیب دروازه ها طبق روابطِ ۲ و ۳ (آنالیز درخت خطا) و احتمال رخداد هر پیامد نهایی از طریق رابطه ۴ (آنالیز درخت رویداد) محاسبه گردید.

قوانین ترکیب دروازه‌ها:

AND Gate: P (B) ×P (A.B) = P (A)

OR Gate: P (A+B) = P (A) + P (B) – P (A).P (B)

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

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

$k$: 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

$P$ (Ei): احتمال رخداد رویدادها در درخت خطا Ei برای K= *1,2,3*

رابطه ۴:

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

$P_r$ (Consequence): احتمال رخداد هریک از پیامدها

$P_r$ (TE): احتمال رویداد اصلی

$P_r$ (E): احتمال شکست یا موفقیت لایه‌های حفاظتی

طبق شکل ۲، مرحله پایانی این مطالعه آنالیز رویداد منتخب با استفاده از BTA است. BTA در زمینه مدیریت ریسک از مؤثرترین و نوین‌ترین روش‌ها به شمار می‌رود. این تکنیک درواقع قابلیت‌های درخت خطا و درخت رویداد را با یکدیگر ترکیب می کند؛ یعنی درخت خطا در سمت چپ BTA علل ریشه‌ای منجر به رویداد اصلی را نشان می‌دهد و درخت رویداد در سمت راست آن چگونگی شکست موانع ایمنی و نمایان شدن پیامدهای مختلف را به تصویر می‌کشد. از قابلیت‌های این روش توانایی ارزیابی سناریوهای مختلف بر اساس احتمال و مسیرهای رخداد حادثه است. دیاگرام BTA درواقع چگونگی عملکرد تجهیزات، افراد و سیستم‌های ایمنی درروند یک سناریوی معین و همچنین ارتباط بین خطاها و پیامدهای آنها را هم‌زمان نشان می‌دهد [۱۸و ۱۹]. درواقع در این مرحله FTA و ETA رسم شده از نقطه مشترک یا همان سیلان (به‌عنوان رویداد اصلی) باهم ترکیب شدند.

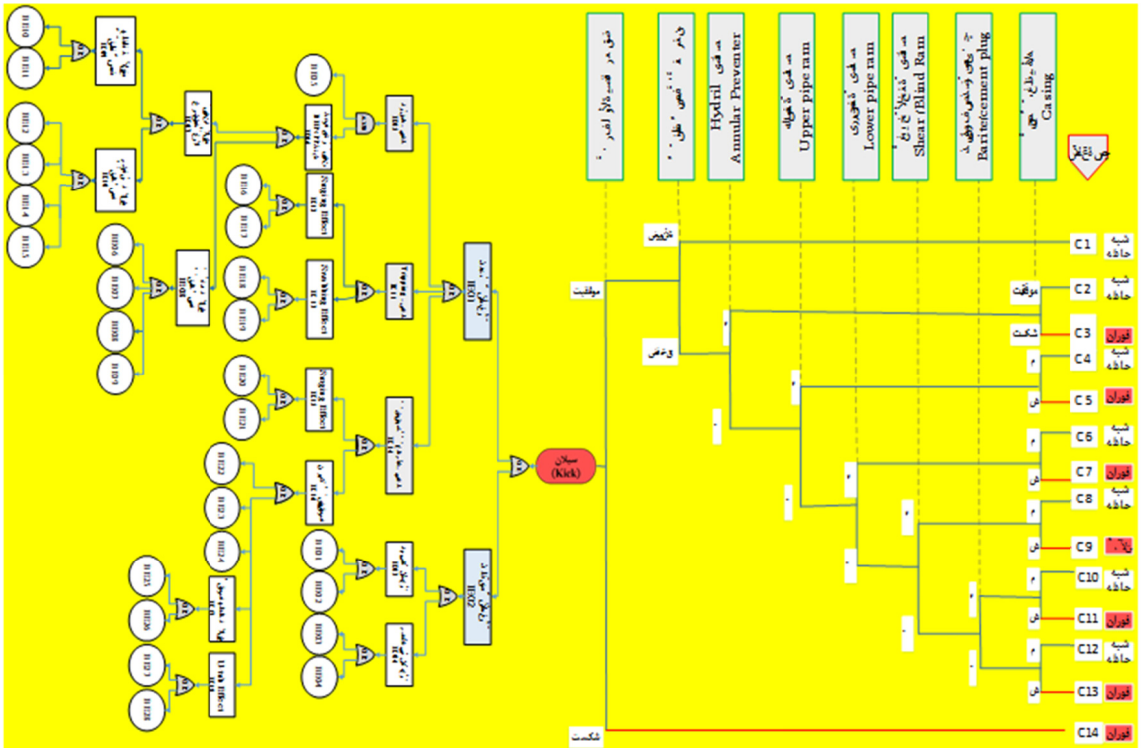
## یافته‌ها

در این مطالعه نیز سیلان به‌عنوان 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 سیمان‌کاری، به تفکیک بررسی گردید. درنهایت درخت خطا در قالب آنالیز پاپیونی با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی مربوطه مطابق شکل شماره ۳ دیاگرام BTA ترسیم گردید.

پس از ترسیم درخت خطا، احتمال سیلان (رویداد اصلی) با استفاده از ترکیب دروازه‌های 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 می‌دهد.



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]




**شکل ۳**- دیاگرام Bow-Tie Analysis و اجزاء تشکیل‌دهنده 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 | $۱\times۱۰^{-۳}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ | BE15 | خطای اپراتور در مخلوط کردن صحیح چگالی سیال حفاری | $۳\times۱۰^{-۲}$ | $۱/۶\times۱۰^{-۲}$ |
| BE02 | رانش زمین | $۵\times۱۰^{-۳}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ | BE16 | راندن رشته حفاری درون چاه (Trip in) | $۹\times۱۰^{-۳}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ |
| BE03 | جنگ و بمباران هوایی | $۱\times۱۰^{-۳}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ | BE17 | پمپاژ سیال حفاری با سرعت زیاد (استروک بالای پمپ) | $۱\times۱۰^{-۲}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ |
| BE04 | عملیات خرابکارانه و تروریستی | $۱\times۱۰^{-۳}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ | BE18 | لوله بالا کردن با سرعت زیاد (Trip up کردن سریع) | $۱\times۱۰^{-۲}$ | $۴/۲\times۱۰^{-۲}$ |
| BE05 | ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری | $۱/۵\times۱۰^{-۱}$ | $۳/۷\times۱۰^{-۱}$ | BE19 | پر نکردن مناسب چاه با سیال در زمان Trip up کردن | $۴\times۱۰^{-۲}$ | $۲/۶\times۱۰^{-۱}$ |
| BE06 | نقص سیستم پمپاژ (Pump Failure) | $۳\times۱۰^{-۲}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ | BE20 | پمپاژ با سرعت زیاد( استروک بالای پمپ) | $۱\times۱۰^{-۲}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ |
| BE07 | نقص سیستم برق (Power failure) | $۲/۷\times۱۰^{-۴}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ | BE21 | راندن لوله جداری به درون چاه (Casing Trip in) | $۹\times۱۰^{-۳}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ |
| BE08 | نقص در سیستم کنترل‌گر پمپ | $۱\times۱۰^{-۳}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ | BE22 | خطا در انتخاب نوع کلاس سیمان | $۵\times۱۰^{-۳}$ | $۳/۴\times۱۰^{-۲}$ |
| BE09 | خطای اپراتور | $۳\times۱۰^{-۲}$ | $۳/۲\times۱۰^{-۲}$ | BE23 | خطا در اندازه‌گیری صحیح وزن سیمان | $۵\times۱۰^{-۳}$ | $۲/۴\times۱۰^{-۲}$ |

بخش درخت رویداد، یا در نظر گرفتن هشت لایه کنترلی از سیستم‌های ایمنی و با هدف تعیین توالی رویدادها و سناریوهای مختلف حوادث پس از رویداد اصلی، مطابق شکل شماره ۳ دیاگرام BTA ترسیم

[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

جدول ۱- ادامه

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BE10 | هرز روی سیال حفاری از طریق دالیز یا سازند حفاری | ۳×□□ $^{-□}$ | ۹/۷×□□ $^{-□}$ | BE24 | خطا در مقدار مواد اضافه‌شده به سیمان | ۵×□□ $^{-□}$ | ۲/۴×□□ $^{-□}$ |
| 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 | نقصFloat shoe | ۸×۱۰ $^{-۳}$ | ۲/۴×۱۰ $^{-۲}$ |
| BE14 | خطا در جهیزت اندازه‌گیری چگالی | ۳×۱۰ $^{-۴}$ | ۲/۶×۱۰ $^{-۲}$ | BE28 | نقصFloat collar | 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 | بستنAnnular Preventer | ۲/۴×۱۰ $^{-۲}$ | ۷ | پلاک باریتی یا سیمانی | ۷×۱۰ $^{-۳}$ |
| ۴ | بستن رمز بالاUpper pipe ram | ۲/۴×۱۰ $^{-۲}$ | ۸ | لوله جداری چاه (Casing ) | ۱/۵×۱۰ $^{-۱۱}$ |

جدول ۳- سناریوهای منجر به پدیده فوران، احتمال رخداد هرکدام 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 $^{-۳}$ |

گردید. جهت تعیین احتمال شکست هریک از لایه‌های کنترلی و اولویت فعال شدن هرکدام ازلحاظ عملیاتی، ازنظر 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 هرکدام 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 وتحلیل قرار گرفت . هما نگونه 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 باحالت شکست یا موفقیت این لایه‌ها و پیامدها در سمت راست دیاگرام BTA قرارگرفته است.

## بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شکل ۳ نتایج مرحله ترسیم درخت خطای دیاگرامBTA نشان داد، درمجموع 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، ودر آن ۱۰ رویداد پایه شناسایی‌شده 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



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

سازند حفاری) وBE19: (پر نکردن مناسب چاه با سیال در زمان Trip up کردن) به ترتیب با احتمال $۱۰^{-۱}$× ۱/۵ و $۱۰^{-۳}$×۴ 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 [۹و۲۰]. همچنین میزان احتمال کلی رویداد اصلی یا سیلان محاسبه شده در این مطالعه ( $۱۰^{-۲}$× ۱/۲۳) به دست آمد که این مقدار احتمال با مطالعات خاکزاد و Majeed Abimbola و همکاران متفاوت بود [۹و۲۱].

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 درمجموع 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 $۱۰^{-۳}$×۲/۹۴ 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 شناسایی‌شد و احتمال نهایی رخداد فوران $۱۰^{-۶}$×۲/۲۵ محاسبه شده است [۹]. همچنین در مطالعه Faisal Khan و همکاران ۶ پیامد و سناریو در بخش درخت رویداد نمودار BTA در نظر گرفته‌شده 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 قرارگرفته 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 بالاکردن (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 تبدیل‌شدن 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 قابل‌درک است.

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



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]

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 وهمچنین پیشگیری از حوادث و طراحی کنترل های 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 foroffshore 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, Ahluwaliac 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 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.

[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-19 ]