

Risk Assessment of Oil and Gas Exploration Well Blowout in Drilling Operations Using Bow Tie Analysis and Bayesian Network

Mostafa Mirzaie Aliabadi¹, Iraj Mohammadfam², Ahmadreza Ahmadi Gahar^{3,*}, Reza Esmaeili⁴

¹ Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, Occupational Safety and Health Research Institute, School of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

² Professor, Department of Occupational Health Engineering, Occupational Safety and Health Research Institute, School of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

³ MSc Student, Department of Health, Safety, and Environment Management, Occupational Safety and Health Research Institute, School of Health, Department of Occupational Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

⁴ MSc Student, Department of Occupational Health, Occupational Safety and Health Research Institute, School of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

* **Corresponding Author:** Ahmadreza Ahmadi Gahar, Department of Health, Safety, and Environment Management, Occupational Safety and Health Research Institute, School of Health, Department of Occupational Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. Email: aahmadi.hse@gmail.com

Abstract

Received: 01/01/2018

Accepted: 10/03/2018

How to Cite this Article:

Mirzaie Aliabadi M, Mohammadfam I, Ahmadi Gahar A, Esmaeili R. Risk Assessment of Oil and Gas Exploration Well Blowout in Drilling Operations Using Bow Tie Analysis and Bayesian Network. *J Occup Hyg Eng*. 2018; 4(4): 59-69. DOI: ---

Background and Objective: The development of oil and gas extraction industry involve a number of risks, including environmental pollution and the loss of human resources and material assets. Blowout is one of the most significant and costly risks in the oil and gas drilling industry, which could have severe consequences, such as explosion, human fatality, and environmental disasters. Risk assessment is one of the most important tools for designing the measures targeted toward risk reduction and safety enhancement in this industry. Regarding this, the aim of the present study was to identify and analyze the basic causes of kick and blowout in the Iranian onshore exploratory drilling industry by using bow tie analysis and Bayesian network (BN).

Materials and Methods: In this study, the identification and evaluation of the basic events leading to a kick was accomplished using the fault trees analysis (FTA). Furthermore, the event tree analysis (ETA) was employed to investigate the safety barriers to blowout and the possible consequences of a kick (e.g., blowout). The potential scenarios of the blowout incidence and the other consequences of a kick were determined through the integration of FTA and ETA by bow tie analysis. Finally, BN was constructed to investigate the blowout probability and other consequences of the incidence of a kick in the well.

Results: The results of the study led to the identification of 24 basic events accounting for the incidence of a kick. The data also revealed seven safety barriers for the prevention of the kick incidence. The probability of kick and blowout was calculated as 9×10^{-2} and 3.5×10^{-5} , respectively.

Conclusion: According to the findings, entrance into the high pressure zone and reduction of bottom hole pressure were identified as the most important basic causes of a kick. Furthermore, the early detection of the kick and proper functioning of blowout preventer were recognized as the most important safety barriers to prevent the blowout.

Keywords: Bayesian Network (BN); Blowout; Bow Tie Analysis (BTA); Kick; Risk Assessment

آنالیز ریسک فوران (Blowout) چاه‌های اکتشافی نفت و گاز در فاز عملیات حفاری با استفاده از تکنیک تحلیل پاپیونی (BTA) و شبکه بیزین

مصطفی میرزایی علی آبادی^۱، ایرج محمدفام^۲، احمد رضا احمدی گهر^{۳*}، رضا اسمعیلی^۴

^۱ استادیار، قطب علمی - آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
^۲ استاد قطب علمی - آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
^۳ 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
^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، قطب علمی - آموزشی بهداشت حرفه‌ای و مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: احمد رضا احمدی گهر، 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. ایمیل: aahmadi.hse@gmail.com

چکیده

سابقه و هدف: اکتشاف و توسعه صنایع نفت و گاز همواره با ریسک‌های متعددی از قبیل تلفات نیروی انسانی، آلودگی‌های زیست محیطی و از بین رفتن تجهیزات و منابع همراه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین خطرات صنعت حفاری در زمینه نفت و گاز، خطر فوران چاه‌های نفت و گاز است. فوران می‌تواند به پیامدهای جبران‌ناپذیری از قبیل انفجار، تلفات شدید انسانی و فجایع زیست محیطی منجر گردد. آنالیز ریسک یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی خطرات، طراحی اقدامات کاهش خطر و افزایش سطح ایمنی در این صنایع است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و آنالیز علل ریشه‌ای منجر به سیلان (Kick) و وقوع فوران در چاه‌های اکتشافی نفت و گاز با استفاده از تکنیک آنالیز پاپیونی (BTA: Bow Tie Analysis) و رویکرد شبکه بیزین (BN: Bayesian Network) در بخش ساحلی صنعت حفاری ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه به منظور شناسایی و ارزیابی رویدادهای پایه دخیل در بروز سیلان از آنالیز درخت خطا (FTA: Fault Trees Analysis) استفاده شد و برای ارزیابی لایه‌های ایمنی کنترل‌کننده فوران و نیز پیامدهای احتمالی ناشی از سیلان از جمله رخداد فوران از آنالیز درخت رویداد (ETA: Event Tree Analysis) بهره گرفته شد. سپس، با ترکیب روش‌های FTA و ETA به وسیله تکنیک پاپیونی، سناریوهای احتمالی حادثه و پیامدهای ناشی از رخداد سیلان شناسایی گردید. در نهایت با استفاده از شبکه بیزین، میزان احتمال فوران و سایر پیامدهای حاصل از وقوع سیلان در چاه محاسبه گشت.

یافته‌ها: براساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که در مجموع، ۲۴ علت یا نقص (رویداد پایه) در بروز رویداد اصلی یا همان سیلان دخالت دارند. همچنین هفت لایه کنترلی در پیشگیری از وقوع فوران شناسایی گردیدند. باید عنوان نمود که رویدادهای پایه همراه با احتمالات رخداد و میزان اهمیت هریک در سمت چپ و پیامدهای پس از رویداد اصلی همراه با احتمالات رخداد هریک در سمت راست دیاگرام BTA مشخص گردیدند. احتمال وقوع رویداد اصلی (سیلان) و پیامد نهایی (فوران) نیز به ترتیب معادل 9×10^{-2} و $3/5 \times 10^{-5}$ محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج حاصل از این مطالعه، ورود به لایه پرفشار در سازند حفاری و کاهش فشار ته چاهی به عنوان مهم‌ترین علل ریشه‌ای در ایجاد سیلان شناخته شدند. همچنین مشخص شد که از بین لایه‌های کنترلی فوران، تشخیص به موقع سیلان و عملکرد صحیح سیستم فوران‌گیر سرچاهی (BOP: Blowout Preventer) مهم‌ترین نقش را در پیشگیری از وقوع فوران ایفا می‌کنند.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک؛ تحلیل پاپیونی (BTA)؛ سیلان، شبکه بیزین (BN)؛ فوران

مقدمه

اکتشاف و توسعه صنایع نفت و گاز همواره با ریسک‌های متعددی از قبیل تلفات نیروی انسانی، آلودگی‌های زیست

در نظر گرفتن نوع عملیات حادث شود [۱۱، ۱۲]. در حالت سیلان [BHP < PP] فشار نفوذی سازند (PP: Pore Pressure) بیش از فشار اعمال شده به وسیله ستون گل حفاری در پایین چاه یا فشار کف چاهی BHP می‌گردد. در واقع نقش گل یا سیال حفاری درون چاه، نگه داشتن و حفظ همیشگی BHP به بالاتر از میزان PP سازند به منظور پیشگیری از وقوع پدیده سیلان است؛ به عبارت دیگر، سیلان در اثر شکست لایه حفاظتی گل یا سیال حفاری (BHP) درون چاه رخ می‌دهد. براساس تجربه از هر ۱۱۰ سیلان رخ داده، یک مورد آن منجر به فوران می‌شود؛ بنابراین در صورتی که سیلان به موقع شناسایی گشته و به درستی کنترل نگردد، پدیده فوران چاه بسیار محتمل خواهد بود؛ از این رو، شناسایی عوامل منجر به سیلان و کنترل آن نقشی حیاتی در پیشگیری از وقوع فوران دارد [۱۳]. به طور کلی، فوران چاه در صنعت حفاری امری محتمل بوده و عوامل مختلف عملیاتی از قبیل طراحی ضعیف، نقص تجهیزات و خطاهای انسانی و همچنین عوامل غیرعملیاتی و رویدادهای طبیعی از قبیل رانش زمین، جنگ و عملیات تروریستی می‌توانند در وقوع آن دخیل باشند. حوادث فوران چاه به وفور 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 نیز حادثه اخیر چاه شماره ۱۴۷ میدان رگ سفید که منجر به کشته شدن دو نفر از پرسنل حفاری، از بین رفتن کامل دکل و دستگاه حفاری و ایجاد خسارتی بالغ بر ۲۰۰ میلیون دلار گردید) رخ داده است [۱۴]. پتانسیل رخداد فوران در چاه همیشه وجود دارد و ریسک فوران را نمی‌توان حذف کرد؛ بلکه می‌توان آن را تا سطح عملی و قابل قبولی کاهش داد [۱۵].

شناسایی و آنالیز ریسک اولین قدم در جهت کاهش حوادث فوران و پیشگیری از خسارات در صنعت حفاری است. ارزیابی احتمال ریسک به عنوان مهم‌ترین ابزار برای آنالیز رویدادهایی با احتمال وقوع کم و شدت بالا (HILP: High Impact, Low Probability) مانند حوادث صنعت نفت و گاز بوده و یکی از مهم‌ترین گام‌ها به منظور توسعه استراتژی‌های پیشگیرانه، طراحی اقدامات کاهش خطر و افزایش سطح ایمنی در این صنایع می‌باشد [۱۶]. ماهیت پویا و دینامیک حوادث فوران نیازمند تکنیکی است که بتواند رویدادهای با علل شکست مشترک (Common Cause Event)، وابستگی رویدادها به یکدیگر و همچنین سایر فاکتورهای فیزیکی متغیر در طول حیات چاه را در نظر بگیرد. مطالعات و روش‌های آنالیز ریسک متعددی از قبیل آنالیز درخت خطا (FTA)، آنالیز درخت رویداد (ETA)، تحلیل پاپیونی و شبکه بیزین جهت آنالیز فوران و علت‌یابی آن در سطح جهان به کار گرفته شده است؛ به عنوان نمونه می‌توان به این موارد اشاره کرد: به کارگیری روش درخت خطا برای آنالیز ریسک فوران در حفاری اکتشافی توسط Andersen در سال ۱۹۹۸، آنالیز کمی ریسک در عملیات فراساحلی به منظور شناسایی علل

محیطی و از بین رفتن تجهیزات و منابع همراه است. صنعت حفاری به دلیل مواجهه با مواد و شرایط خطرناک، مستعد حوادث مخرب و فاجعه‌بار می‌باشد [۱]. در این میان، عملیات حفاری به دلیل شرایط ذاتی خود از قبیل پیچیدگی عملیات، تراکم زیاد تجهیزات و کارکنان، حجم قابل توجه مواد هیدروکربنی و شیمیایی، ناشناخته بودن سازندهای زمین‌شناختی و همچنین محدودیت زمانی پاسخگویی در شرایط اضطراری، بیشترین پتانسیل را برای بروز رویدادهایی با پیامدهای بسیار شدید و غیرمنتظره دارند [۲، ۳]. از سوی دیگر، دور و خشن بودن محیط کار حفاری به طور قابل توجهی خطرات شغلی این صنعت را افزایش داده است؛ به طوری که عملیات حفاری نفت و گاز در مقایسه با دیگر حوزه‌های نفتی، بالاترین نرخ حوادث و بیشترین میزان روزهای ازدست‌رفته کاری را به خود اختصاص داده‌اند [۴، ۵].

صنعت حفاری در زمینه نفت و گاز در دو بخش جداگانه ساحلی (Onshore) و فراساحلی (Offshore) فعالیت می‌کند. علاوه بر این، چاه‌های حفاری به لحاظ کارکردی به سه دسته: اکتشافی (Exploration)، توسعه‌ای (Development) و تعمیراتی (Work Over) تقسیم می‌شوند. فرایند حفاری چاه نیز شامل پنج فاز عملیاتی مختلف از قبیل فاز حفاری (Drilling Ahead)، فاز پیمایش چاه (Tripping)، فاز استاتیک (Static Conditions) و فاز لوله جداری و سیمان کاری (Cementing & Blowing) می‌باشد [۶]. یکی از خطرناک‌ترین و پرهزینه‌ترین رویدادهای صنعت حفاری، فوران (Blowout) است. فوران چاه به عنوان فاجعه‌بارترین حادثه صنعت حفاری شناخته شده است و می‌تواند باعث ایجاد پیامدهای جبران‌ناپذیری از قبیل آتش‌سوزی و انفجار چاه، تخریب مواد و تجهیزات، ایجاد مشکلات زیست محیطی با سرریز شدن میلیون‌ها بشکه مواد هیدروکربنی به محیط اطراف و تلفات شدید نیروی انسانی گردد. کنترل فوران بسیار پیچیده، مشکل و زمان‌بر بوده و نیازمند تجهیزات و اقدامات هزینه‌بر فراوانی می‌باشد؛ به همین دلیل منجر به ایجاد خسارت‌های ملی و فراتر از ابعاد سازمانی می‌گردد [۷، ۸].

فوران عبارت است از جریان کنترل نشده هیدروکربن (گاز، نفت و میعانات گازی) و یا آب شور از درون چاه به محیط اطراف که در اثر سیلان کنترل نشده رخ می‌دهد [۷، ۸]؛ به عبارت دیگر، فوران پس از شکست لایه‌های حفاظتی چاه (فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری یا فشار کف چاهی (BHP: Bottom Hole Pressure) و تجهیزات سرچاهی پیشگیری از فوران (BOP) رخ می‌دهد [۹، ۱۰].

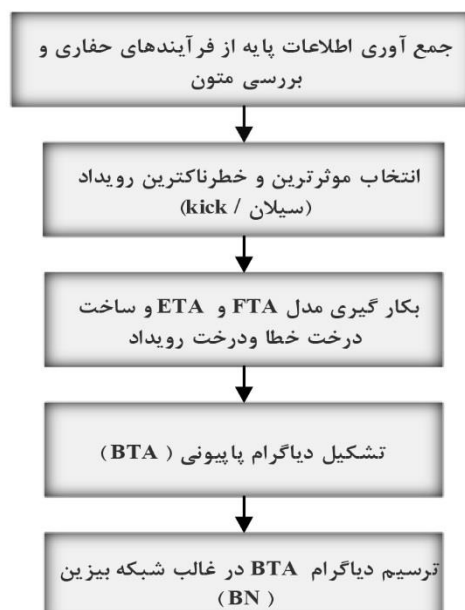
سیلان نیز شامل جریان یافتن برنامه‌ریزی نشده و ناخواسته سیال سازند به درون چاه است و به عنوان اولین رویدادی شناخته می‌شود که می‌تواند به طور بالقوه به پدیده فوران تبدیل گردد. سیلان می‌تواند در هر زمان و در هر سازندی از زمین بدون

ریشه‌های سیلان و فوران در روش حفاری فوق تعادلی با استفاده از تکنیک پاپیونی و شبکه بیزین توسط خاکزاد و همکاران در سال ۲۰۱۳ و همچنین مطالعات Abimbola و همکاران در سال ۲۰۱۴ در ارتباط با به‌روزرسانی احتمال شکست رویدادهای پایه و لایه‌های ایمنی در عملیات حفاری با استفاده از تکنیک پاپیونی و تئوری بیزین [۱۷]. هر کدام از این مطالعات پدیده فوران را در چاه‌ها و فازهای عملیاتی مختلف و با هدف و روشی خاص مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اینکه مطالعات اندکی در زمینه فوران در بخش ساحلی صنعت حفاری صورت گرفته است و همچنین با توجه به تاریخچه حوادث متعدد فوران در این بخش از میدان‌های نفت و گاز ایران، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و آنالیز علل ریشه‌ای منجر به سیلان و وقوع فوران در چاه‌های اکتشافی (نفت و گاز) با استفاده از روش BTA و شبکه بیزین در بخش ساحلی صنعت حفاری ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از روش BTA و شبکه BN به‌منظور شناسایی و آنالیز علل ریشه‌ای که می‌توانند منجر به بروز سیلان شوند و همچنین مشخص کردن پیامدهای نهایی که ممکن است در نتیجه شکست هر کدام از لایه‌های حفاظتی کنترل‌کننده فوران رخ دهند استفاده گردید. شکل ۱ مراحل مختلف انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

روش‌های سنتی ارزیابی ریسک مانند FTA و ETA با محدودیت‌هایی مانند استاتیکی بودن و عدم قطعیت‌های زیادی مواجه هستند؛ بنابراین در پژوهش حاضر به‌منظور پویایی روش و کاهش عدم قطعیت‌ها در شناسایی علت‌های ریشه‌ای پدیده فوران و پیامدهای نهایی محتمل از ترکیب تکنیک BTA و شبکه بیزین بهره گرفته شد.



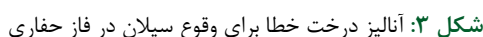
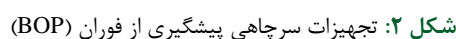
شکل ۱: مراحل انجام پژوهش

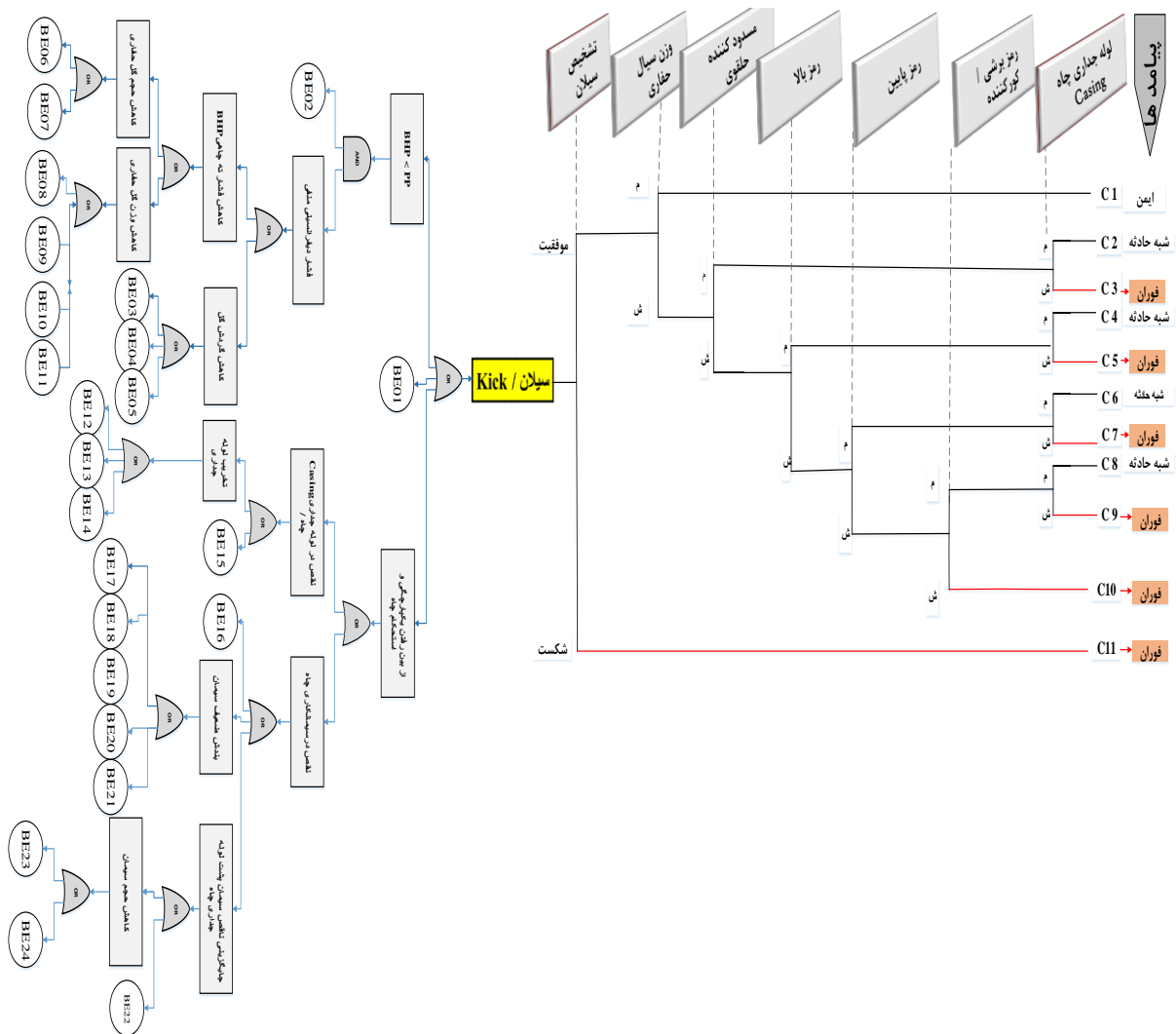
تکنیک BTA به‌منظور شناسایی و ارزیابی ریسک در صنایع مختلفی به کار گرفته شده است و از مؤثرترین و نوین‌ترین روش‌ها در زمینه مدیریت و آنالیز ریسک به شمار می‌رود. دیاگرام BTA یک تجسم سریع و قابل فهم از خطر، روابط بین علت‌ها، روند و توالی آن‌ها و همچنین موانع ایمنی که برای جلوگیری از وقوع این رویدادها به کار گرفته شده است را فراهم می‌کند [۱۸]. از قابلیت‌های این تکنیک، توانایی ارزیابی سناریوهای مختلف براساس احتمال و مسیرهای رخداد حادثه می‌باشد. در واقع، تکنیک BTA چگونگی عملکرد تجهیزات، افراد و سیستم‌های ایمنی در روند یک سناریوی معین و نیز ارتباط بین خطاها و پیامدهای آن‌ها را به‌صورت هم‌زمان نشان می‌دهد [۱۹، ۲۰]. این تکنیک قابلیت‌های درخت خطا و درخت رویداد را با یکدیگر ادغام می‌کند؛ به‌طوری که درخت خطا در سمت چپ BTA علل ریشه‌ای منجر به رویداد سیلان و درخت رویداد در سمت راست آن چگونگی شکست موانع ایمنی و نمایان شدن پیامدهای مختلف از جمله فوران را به تصویر می‌کشد [۲۱]. در مرحله نخست با توجه به بررسی متون، مطالعات انجام‌شده و گزارش حوادث فوران در چاه‌های نفت و گاز، سیلان به‌عنوان رویداد اصلی و مؤثرترین رویداد منجر به فوران در نظر گرفته شد. در ادامه با توجه به اینکه تکنیک BTA از ترکیب دو روش درخت خطا و درخت رویداد تشکیل شده است، از آنالیز درخت خطا FTA به‌منظور شناسایی علت‌ها و یا رویدادهای پایه‌ای که در فاز عملیات حفاری منجر به سیلان می‌شوند، استفاده گردید [۲۲].

FTA روشی گرافیکی است که روابط بین یک رویداد اصلی با رویدادهای پایه را در یک شکل نشان می‌دهد. این روش براساس شناسایی یک رویداد نامطلوب خاص (رویداد اصلی) استوار است و در واقع ترکیب علت‌هایی که می‌توانند منجر به این رویداد شوند را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این روش ارتباط بین رویدادها و علت‌های آن‌ها با استفاده از دروازه‌های منطقی AND و OR نشان داده می‌شوند؛ به عبارت دیگر، دروازه‌ها نوع ارتباط رویدادهای ورودی مورد نیاز برای بروز رویداد خروجی را معین می‌کنند [۲۲]. درخت خطا در این پژوهش مطابق با شکل ۳ ترسیم گردید. یکی از مهم‌ترین خروجی‌های آنالیز درخت خطا در روش BTA محاسبه میزان یا درجه اهمیت (Importance Measures) هریک از رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی است. یکی از روش‌های محاسبه میزان اهمیت هریک از رویدادهای پایه، استفاده از روش FV (Fussell Veselys) می‌باشد. در این روش به‌منظور محاسبه میزان اهمیت هریک از رویدادهای پایه، رویداد مورد نظر را برابر با صفر در نظر می‌گیرند و احتمال رویداد اصلی را با قوانین FTA محاسبه می‌کنند. سپس با استفاده از رابطه ۱، میزان اهمیت رویداد مورد نظر محاسبه

که ممکن است در اثر شکست هریک از لایه‌های ایمنی ایجاد گردند، از آنالیز درخت رویداد ETA استفاده گردید. به این ترتیب که بر حسب عملکرد صحیح و یا شکست در عملکرد موانع ایمنی با استفاده از تحلیل درخت رویداد می‌توان پیامدهای نهایی ناشی از یک سناریو را تعیین کرد. همچنین می‌توان از طریق ضرب احتمال رویداد اولیه یعنی سیلان در احتمال حالت (شکست یا عملکرد صحیح) موانع ایمنی موجود در شاخه‌هایی که در مسیر منتهی به پیامد نهایی قرار دارند، احتمال وقوع پیامدهای مختلف ناشی از وقوع سیلان را مشخص نمود (با توجه به شکل ۴ دیگرام BTA) [۲۴].

به منظور شناسایی پیامدهای نهایی مرتبط با یک رویداد اولیه
 رویداد مورد نظر
 $P_r(TE - x)$: احتمال رویداد اصلی بدون در نظر گرفتن
 $P_r(TE)$: احتمال رویداد اصلی
 I_i^{Fv} : میزان اهمیت رویداد پایه یا رویداد میانی مورد نظر





شکل ۴: دیاگرام BTA فاز عملیات حفاری

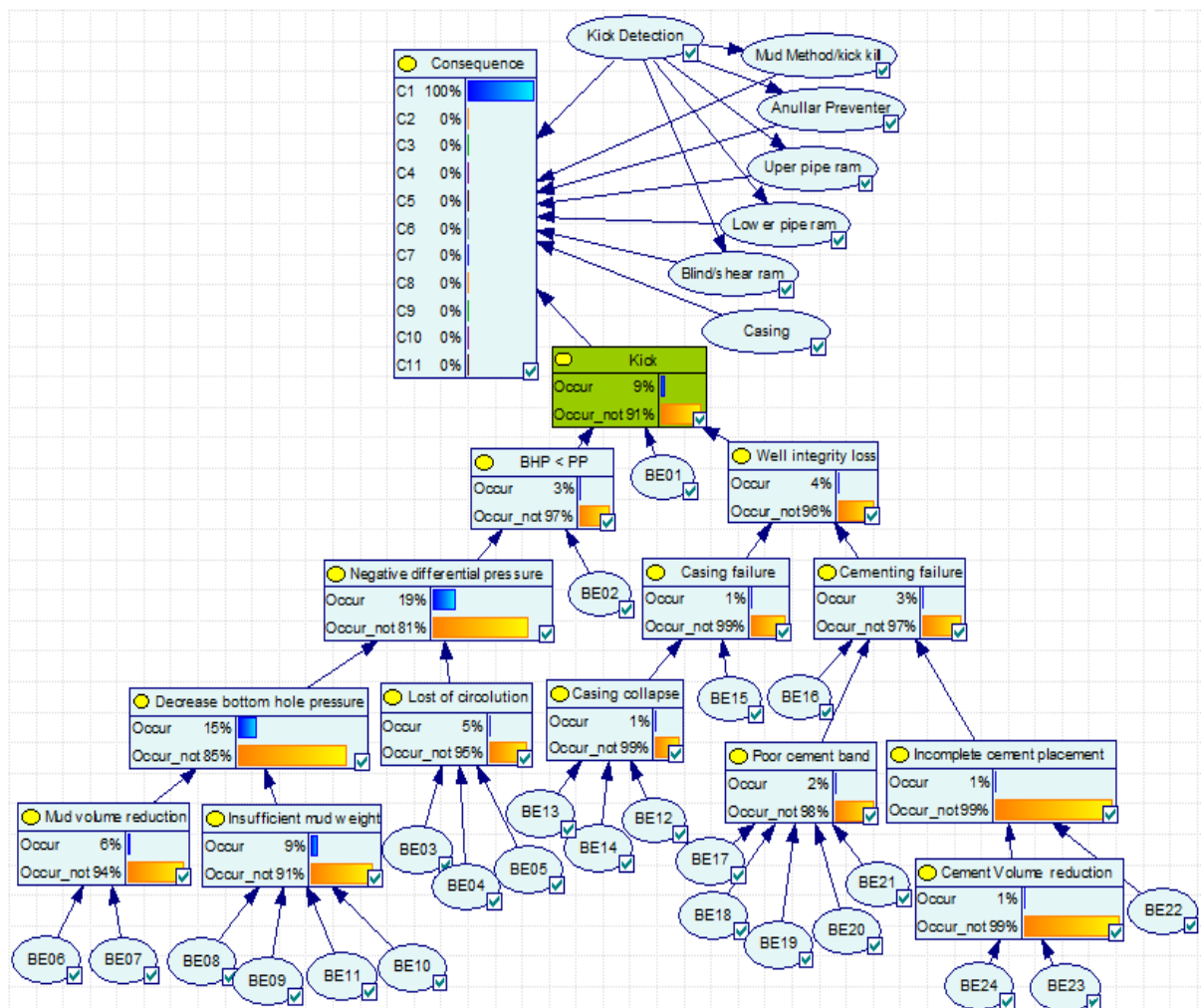
از دیگر لایه‌های ایمنی به شمار می‌آیند که به‌طور مستقل بر عملکرد دیگر لایه‌های ایمنی تأثیر می‌گذارند. در فرایند حفاری چاه نفت و گاز، به‌منظور حفاظت از دیواره چاه در مقابل ریزش و جلوگیری از نفوذ سیالات تحت فشار ساختار درونی زمین از لوله‌های فلزی با آلیاژ مخصوص (Casing) برای پوشش دیواره داخلی چاه استفاده می‌کنند که به این عمل "جداره‌گذاری" گفته می‌شود. در پژوهش حاضر درخت رویداد با توجه به اولویت فعال‌شدن هریک از لایه‌های ایمنی با هفت لایه حفاظتی مطابق با شکل ۴ دیگرام BTA ترسیم گردید.

برای حل این مشکل که BTA روشی کامل برای کمی کردن میزان ریسک، به روزرسانی داده های قدیمی و مدل سازی روابط پیچیده بین موانع ایمنی و بروز حادثه نبوده و قادر به به روزرسانی احتمالات گذشته براساس اطلاعات و داده های جدید نمی باشد [۲۵] و همچنین به منظور لحاظ کردن نقص هایی با علت های مشترک و در نظر گرفتن ارتباط بین علت ها در این پژوهش، نمودار BTA در شبکه بیزین مدل سازی گردید (شکل ۵).

رویگرد BN یک مدل احتمالی گرافیکی است که برای

شایان ذکر می‌باشد که در پژوهش حاضر تکنیک حفاری متعارف (Conventional) یا فوق تعادلی (Overbalanced Drilling) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تکنیک فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری BHP بیشتر از فشار نفوذی سازند PP می‌باشد [۷]. علاوه بر این، ستون گل یا سیال حفاری به عنوان مانع ایمنی اولیه در نظر گرفته می‌شود. این مانع فشار را در سطحی بالاتر از فشار نفوذی در کف چاه حفظ کرده و از وقوع سیلان جلوگیری می‌نماید. تجهیزات سرچاهی یا فوران گیر (BOP) نیز به عنوان مانع ایمنی ثانویه، مانع از وقوع فوران می‌شوند. فوران گیر ابزاری است که از یک بدنه اصلی و تعدادی شیر کنترل تشکیل شده است و طی عملیات حفاری روی سر آخرین لوله جداری در چاه رانده شده بسته می‌شود و شامل دو عدد رمز لوله ای (Pipe Rams)، یک رمز برشی یا کورکننده (Blind/Shear Ram)، یک مهارکننده حلقوی (Annular Preventer) و شیرهای ورود و خروج گل می‌باشد (شکل ۲) [۲۱].

علاوه بر ستون گل و تجهیزات سرچاهی، تشخیص سیلان (Kick Detection) و لوله‌های جداری دیواره چاه (Casing)



شکل ۵: آنالیز پیامدهای فوران در عملیات حفاری با استفاده از شبکه بیزین (BN)

بررسی متون مرتبط با تجزیه و تحلیل ریسک فوران مانند مطالعات خاکزاد و همکاران [۷] استفاده شد. همچنین میزان احتمال رخداد رویدادهای میانی، رویداد اصلی و احتمال وقوع هر یک از پیامدها با استفاده از شبکه بیزین محاسبه گردید. در جدول ۱ احتمال وقوع رویدادهای پایه و اهمیت آن‌ها و در جدول ۲ احتمال شکست لایه‌های ایمنی پیشگیری کننده از فوران در فاز عملیات حفاری ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، دیاگرام BTA از ترکیب روش‌های FTA و ETA تشکیل شده و در آن رویدادهایی که منجر به سیلان می‌شوند با شاخه‌ها و دروازه‌های منطقی در سمت چپ نمودار و موانع ایمنی و پیامدهای ناشی از شکست هر کدام در سمت راست دیاگرام BTA ترسیم گردیده است.

با توجه به محدودیت‌های تکنیک BTA برای به‌روزرسانی احتمالات پیشین و در نظر گرفتن شکست‌های دارای علت‌های مشترک، دیاگرام BTA در غالب شبکه بیزین مطابق با شکل ۵ ترسیم شد و احتمال وقوع هر یک از پیامدهای نهایی با توجه به شکل ۶ محاسبه گردید. جدول ۳ میزان احتمال رخ دادن هر یک از پیامدهای نهایی پس از وقوع سیلان را نشان می‌دهد.

ساخت آن می‌توان از داده‌های موجود و یا نظر متخصصان استفاده کرد. این روش به دلیل تجزیه و تحلیل کیفی و کمی به‌طور گسترده‌ای در آنالیز ریسک صنایع فرایندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. BN شامل: گره‌ها، قوس‌ها و جداول احتمالات می‌باشد تا بتواند متغیرهای تصادفی و وابستگی‌های شرطی آن‌ها را نشان دهد. علاوه بر این، رویکرد BN با توجه به توانایی به‌روزرسانی احتمالات قدیمی و در نظر گرفتن نقص و شکست‌های دارای علت‌های مشترک در یک سیستم، نتایج ارزشمندتری را در زمینه آنالیز ریسک نسبت به روش BTA ارائه می‌دهد [۲۶].

یافته‌ها

در مطالعه حاضر علت‌های ریشه‌ای که در ایجاد سیلان دخالت دارند، شناسایی و طبقه‌بندی شد و درخت خطای مرتبط با وقوع سیلان در فاز حفاری با حضور متخصصان و کارشناسان حفاری مطابق با شکل ۳ ترسیم گردید.

به‌منظور محاسبه میزان احتمال شکست تجهیزات، رویدادهای پایه و همچنین احتمال شکست لایه‌های ایمنی از نظر متخصصان، منابع استاندارد داده مانند OREDA [۲۷] و

جدول ۱: احتمال رخداد و درجه اهمیت رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی

رویداد	توصیف رویداد	میزان احتمال	درجه اهمیت
BE01	مواجهه با لایه پرفشار در سازند حفاری	2×10^{-2}	$2/1 \times 10^{-2}$
BE02	وجود مقدار کافی از مواد هیدروکربنی در سازند حفاری	$1/5 \times 10^{-1}$	3×10^{-1}
BE03	نقص سیستم پمپاژ (Pump Failure)	5×10^{-2}	6×10^{-2}
BE04	نقص سیستم برق (Power Failure)	$1/5 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}
BE05	بسته شدن فضای دالیز (Plug annulus)	1×10^{-4}	1×10^{-4}
BE06	هرزروی سیال حفاری از طریق دالیز یا سازند حفاری (Annular Loss)	5×10^{-2}	6×10^{-2}
BE07	هرزروی سیال در اثر شکست سازند	1×10^{-2}	1×10^{-2}
BE08	اثرات دما بر سیال حفاری	3×10^{-3}	1×10^{-2}
BE09	اثرات ورود نفت، آب و یا گاز به سیال حفاری (Cut Mud)	5×10^{-2}	6×10^{-2}
BE10	خطا در تجهیزات اندازه‌گیری چگالی	4×10^{-3}	1×10^{-2}
BE11	خطای اپراتور در مخلوط کردن صحیح چگالی سیال حفاری	4×10^{-2}	5×10^{-2}
BE12	طراحی ضعیف	5×10^{-4}	1×10^{-2}
BE13	رائش زمین / زلزله	5×10^{-4}	1×10^{-2}
BE14	راندن نامناسب لوله‌های جداری	1×10^{-3}	1×10^{-1}
BE15	خطا در بازرسی از لوله‌های جداری	1×10^{-3}	1×10^{-2}
BE16	خطا در بازرسی از سیمان کاری	1×10^{-3}	1×10^{-2}
BE17	خطا در مقدار مواد اضافه شده به سیمان	3×10^{-3}	3×10^{-2}
BE18	آلوده شدن مایع سیمان با گل حفاری و یا سایر سیالات سزندی	1×10^{-2}	1×10^{-1}
BE19	خطا در انتخاب نوع کلاس سیمان	5×10^{-4}	1×10^{-2}
BE20	خطا در اندازه‌گیری صحیح وزن سیمان	5×10^{-3}	5×10^{-2}
BE21	آبرفتگی سیمان (Cement Shrinkage)	5×10^{-3}	5×10^{-2}
BE22	ناکافی بودن گل حفاری جهت جایگزینی سیمان درون لوله جداری	5×10^{-3}	2×10^{-2}
BE23	هرزروی سیمان از طریق سازند حفاری	1×10^{-3}	1×10^{-2}
BE24	خطا در محاسبه مقدار سیمان مورد نیاز جهت لوله	5×10^{-3}	5×10^{-2}

جدول ۲: احتمال شکست لایه‌های حفاظتی کنترل‌کننده فوران در تکنیک BTA

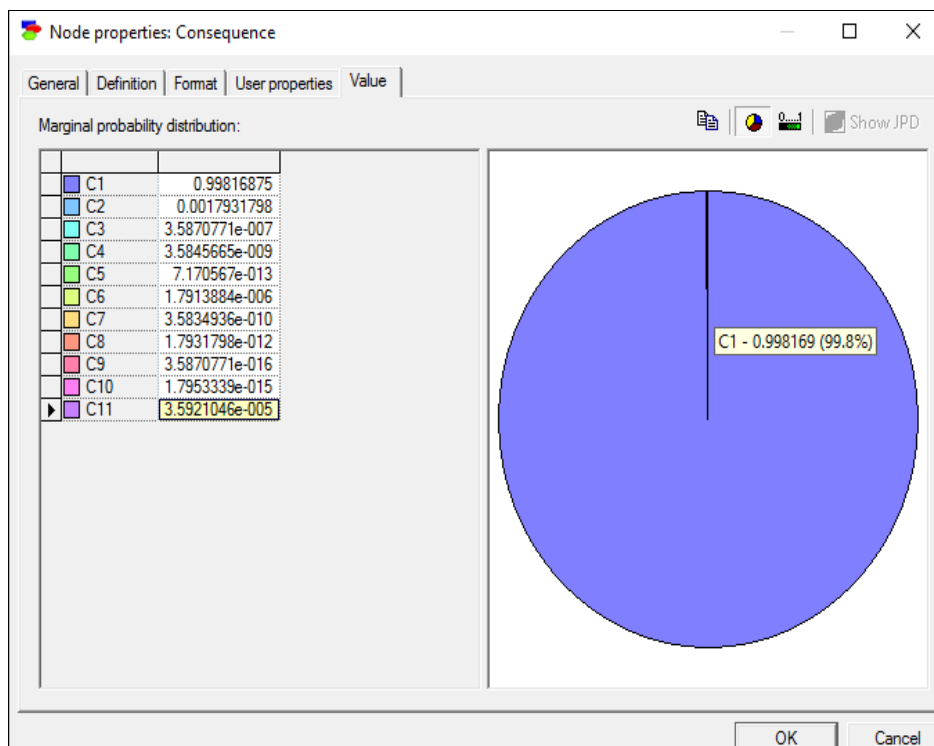
شماره مانع	توصیف مانع (Safety Barrier)	میزان احتمال
۱	تشخیص سیلان (Kick Detection)	2×10^{-4}
۲	گل حفاری (Drilling Mud)	1×10^{-2}
۳	مسدودکننده حلقوی (Annular Preventer)	1×10^{-3}
۴	رمز بالا (Upper Pipe Ram)	1×10^{-3}
۵	رمز پایین (Lower Pipe Ram)	1×10^{-3}
۶	رمز برشی / کورکننده (Blind/Shear Ram)	1×10^{-3}
۷	لوله جداری چاه (Casing)	2×10^{-4}

بحث

BE06 و BE09 و از میان رویدادهای میانی، فشار دیفرانسیلی منفی و کاهش فشار ته چاهی BHP دارای بیشترین احتمال و درجه اهمیت در وقوع سیلان هستند.

بروز سیلان در فاز حفاری به دلیل مواجهه ناخواسته با لایه پرفشار در سازند حفاری بسیار محتمل می‌باشد. کاهش فشار ته چاهی BHP به‌عنوان اولین و مهم‌ترین رویداد مؤثر در بروز سیلان شناخته شده است. همچنین وجود مقدار کافی از مواد هیدروکربنی در سازند حفاری، هرزروی سیال حفاری از طریق

در این مطالعه تجزیه و تحلیل کمی ریسک به وسیله تکنیک BTA و شبکه‌های ببیزین با استفاده از نرم‌افزار GeNie 2.0 برای عملیات حفاری انجام شد. نوع پیامدهای و میزان احتمال آن در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نمودار FTA در شکل ۳ می‌توان گفت که در مجموع، ۲۴ رویداد پایه در وقوع رویداد اصلی و رخداد فوران دخالت دارند که میزان احتمال این رویدادها و درجه اهمیت هریک از آنها در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. براساس محاسبات انجام‌شده، رویدادهای پایه‌ای BE01، BE02



شکل ۶: احتمال وقوع فوران و سایر پیامدها در عملیات حفاری با استفاده از شبکه بیزین (BN)

جدول ۳: میزان احتمال رخداد هریک از پیامدهای نهایی در دیاگرام BTA

احتمال رخداد پیامدهای نهایی پس از وقوع سیلان		
پیامد	توصیف پیامد	میزان احتمال
C1	شرایط ایمن	$99/8 \times 10^{-2}$
C2	شبه حادثه	$1/7 \times 10^{-3}$
C3	فوران	$3/5 \times 10^{-7}$
C4	شبه حادثه	$3/5 \times 10^{-9}$
C5	فوران	2×10^{-13}
C6	شبه حادثه	2×10^{-6}
C7	فوران	$3/5 \times 10^{-10}$
C8	شبه حادثه	2×10^{-12}
C9	فوران	$3/5 \times 10^{-16}$
C10	فوران	3×10^{-15}
C11	فوران	$3/5 \times 10^{-5}$

- عدم وجود اطلاعات زمین‌شناختی و داده‌های کافی از سازند مورد حفاری در چاه‌های اکتشافی نسبت به سایر چاه‌ها
 - تغییرات سریع و پیش‌بینی‌نشده فشار در حین حفاری در چاه‌های اکتشافی
 - تحریک دیواره سازند حفاری در فاز عملیات حفاری نسبت به سایر فازها
 - عمق زیاد حفاری در چاه‌های اکتشافی نسبت به عمق حفاری در چاه‌های دیگر که این مسئله احتمال برخورد با لایه‌های پرفشار زیرزمینی در چاه‌های اکتشافی را افزایش می‌دهد.
- با توجه به احتمالات ارائه‌شده در جدول ۳، احتمال وقوع

- دالیز یا سازند حفاری (Annular Loss) و اثرات ورود نفت، آب و یا گاز به سیال حفاری (Cut Mud) از دیگر رویدادهای پایه‌ای هستند که بیشترین احتمال و تأثیر را در بروز سیلان و رخداد فوران نسبت به سایر رویدادها دارند. یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که عملیات حفاری در چاه‌های اکتشافی برای بروز سیلان و حوادث فوران نسبت به سایر چاه‌ها و فازهای عملیاتی دیگر مستعدتر می‌باشد که از مهم‌ترین عوامل آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- احتمال مواجهه ناخواسته با منطقه پرفشار و یا لایه گازی حین عملیات حفاری نسبت به سایر فازهای عملیاتی

حفری بسیار محتمل بوده و کاهش فشار ته چاهی BHP اولین و مهم‌ترین رویداد مؤثر در بروز سیلان می‌باشد. همچنین مشاهده شد که وجود مقدار کافی از مواد هیدروکربنی در سازند حفاری، هرزروی سیال حفاری از طریق دالیز یا سازند حفاری و اثرات ورود نفت، آب و یا گاز به سیال حفاری از دیگر رویدادهای پایه‌ای هستند که بیشترین احتمال و تأثیر را در بروز سیلان نسبت به سایر رویدادها دارند و بیشترین نقش را در بروز سیلان و رخداد فوران ایفا می‌کنند. علاوه بر این، بر مبنای نتایج مشخص گردید که تشخیص به موقع سیلان و عملکرد صحیح سیستم فوران‌گیر سرچاهی BOP بیشترین تأثیر را در کنترل سیلان و پیشگیری از وقوع فوران دارند. از سوی دیگر، به کارگیری شبکه بیزین در تجزیه و تحلیل علت‌های ریشه‌ای فوران ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم آنالیز پویا و دینامیکی از میزان ریسک رخداد سیلان و وقوع فوران داشته باشیم؛ به طوری که با استفاده از داده‌های جدید و یا انجام اقدامات اصلاحی ایمنی در سیستم‌های مختلف، ضمن کاهش عدم قطعیت در میزان احتمالات محاسبه شده بتوانیم میزان تأثیر اقدامات ایمنی و داده‌های جدید در رخداد پیامدهای اصلی را محاسبه نماییم؛ بنابراین ادغام روش‌های آنالیز ریسک مانند تکنیک BTA با شبکه بیزین در مدیریت ریسک صنایع فرایندی از قبیل صنعت حفاری می‌تواند نگرش دقیقی را در ارتباط با تحلیل علت‌های وقوع حوادث و پیشگیری از آنها ایجاد کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد آقای احمد رضا احمدی گهر در دانشگاه علوم پزشکی همدان استخراج شده است. بدین‌وسیله نویسندگان از شرکت ملی حفاری ایران و تمامی افرادی که در راستای اجرای این پژوهش با نویسندگان همکاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

REFERENCES

1. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Proc Saf Environ Protect*. 2013;91(1):46-53.
2. Amir-Heidari P, 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 Proc Ind*. 2016;44:405-13. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.015
3. Tamima N, Labourea DM, Mentzera RA, Hasanb AR, Mannana MS. A framework for developing leading indicators for offshore drill well blowout incidents. *Proc Saf Environ Protect*. 2017;106:256-62.
4. Ataallah E, Shadizadeh SR. Fuzzy consequence modeling of blowouts in Iranian drilling operations; HSE consideration. *Saf Sci*. 2015;77:152-9. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.03.014
5. Skogdalen JE, Utne I, Vinnem JE. Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts. *Saf Sci*. 2011;49(8-9):1187-99. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.03.012
6. Abimbola M, Khan F. Development of an integrated tool for risk analysis of drilling operations. *Proc Saf Environ Protect*. 2016;102:421-30.
7. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Quantitative risk analysis of

فوران در فاز حفاری زمانی که سیلان شناسایی نشده باشد (C11) برابر با $3/5 \times 10^{-5}$ و هنگامی که سیلان شناسایی شده باشد؛ اما لایه‌های ایمنی عمل نکنند و یا نقص داشته باشند (C10) معادل $1/7 \times 10^{-15}$ محاسبه گردید که این امر نشان از اهمیت بالای تشخیص سیلان در پیشگیری از وقوع فوران دارد. براساس یافته‌های این مطالعه، تشخیص به موقع سیلان و عملکرد صحیح سیستم فوران‌گیر سرچاهی BOP از مهم‌ترین لایه‌های پیشگیری‌کننده از وقوع فوران می‌باشند. در پژوهش حاضر احتمال وقوع سیلان و فوران به ترتیب معادل 3×10^{-2} و $3/5 \times 10^{-5}$ محاسبه گردید.

در این راستا، در پژوهش خاکزاد و همکاران (۲۰۱۳) میزان احتمال سیلان و فوران در فاز عملیات حفاری به ترتیب برابر با $2/55 \times 10^{-2}$ و $2/55 \times 10^{-6}$ گزارش شده است [۲۸]. همچنین در پژوهش Khan و همکاران (۲۰۱۵) که با استفاده از تکنیک BN صورت گرفت، میزان احتمال فوران معادل $2/09 \times 10^{-5}$ تخمین زده شد [۲۹]. اختلاف در میزان احتمالات مطالعات فوق نسبت به پژوهش حاضر می‌تواند ناشی از گسترش بیشتر درخت خطای مربوط به علت‌های به وجودآورنده سیلان باشد. از سوی دیگر، مطالعات ذکرشده بر چاه‌های فراساحلی متمرکز بودند؛ در صورتی که پژوهش حاضر در بخش ساحلی صنعت حفاری انجام شده است که ماهیت آن‌ها با یکدیگر تفاوت دارد. علاوه بر این، عواملی چون نوع چاه حفاری (به عنوان مثال چاه اکتشافی یا توسعه‌ای)، ویژگی‌های سازند حفاری و زمان فوران (حین حفاری یا در زمان پیمایش چاه) در این اختلاف نقش دارند [۲۸].

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تجزیه و تحلیل کمی ریسک به وسیله تکنیک BTA و شبکه بیزین برای فاز عملیات حفاری صورت گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که بروز سیلان در فاز حفاری به دلیل مواجهه ناخواسته با لایه پرفشار در سازند

- offshore drilling operations: a Bayesian approach. *Saf Sci*. 2013;57:108-17. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.01.022
8. Bergan HH, Naseri M. Well control operation in the arctic offshore: a qualitative risk model. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, Trondheim, Norway; 2015.
9. Skogdalen JE, Vinnem JE. Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study. *Reliabil Eng Sys Saf*. 2012;100:58-66.
10. Liua R, Hasanb AR, Ahluwalia A, Mannana MS. Well specific oil discharge risk assessment by a dynamic blowout simulation tool. *Proc Saf Environ Protect*. 2016;103:183-91. DOI: 10.1016/j.res.2011.12.002
11. Islam R, Khan F, Venkatesan R. Real time risk analysis of kick detection: testing and validation. *Reliabil Eng Sys Saf*. 2017;161:25-37. DOI: 10.1016/j.res.2016.12.014
12. Farajzadeh Dehkordi AR, Kuti S. Blowout 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, Tehran, Iran; 2010. [Persian]
13. Chung S, Kim S, Yang Y. Use of hazardous event frequency to evaluate safety integrity level of subsea blowout preventer.

- Int J Naval Arch Ocean Eng.* 2016;**8**:262-76. DOI: [10.1016/j.jnaoe.2016.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jnaoe.2016.03.005)
14. Schout G, Hartog N, Hassanizadeh SM, Griffioen J. Impact of an historic underground gas well blowout on the current methane chemistry in a shallow groundwater system. *Proc Natl Acad Sci.* 2018;**115**(2):296-301. DOI: [10.1073/pnas.1711472115](https://doi.org/10.1073/pnas.1711472115)
 15. Cain 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 Proc Ind.* 2013;**26**(4):639-49. DOI: [10.1016/j.jlp.2013.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.01.001)
 16. Strand GO, Lundteigen MA. Human factors modelling in offshore drilling operations. *J Loss Prev Proc Ind.* 2016;**43**:654-67. DOI: [10.1016/j.jlp.2016.06.013](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.06.013)
 17. Song GO, Khan F, Wang H, Leighton S, Yuan Z, Liu H. Dynamic occupational risk model for offshore operations in harsh environments. *Reliabil Eng Sys Saf.* 2016;**150**:58-64. DOI: [10.1016/j.res.2016.01.021](https://doi.org/10.1016/j.res.2016.01.021)
 18. Muniz MV, Lima GB, Caiado RG, Quelhas OL. Bow tie to improve risk management of natural gas pipelines. *Proc Saf Prog.* 2017;**10**:90. DOI: [10.1002/prs.11901](https://doi.org/10.1002/prs.11901)
 19. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliabil Eng Sys Saf.* 2012;**104**:36-44. DOI: [10.1016/j.res.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/j.res.2012.04.003)
 20. Mokhtari K, Ren J, Roberts C, Wang J. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *J Hazard Mater.* 2011;**192**(2):465-75. PMID: [21705142](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21705142/) DOI: [10.1016/j.jhazmat.2011.05.035](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.035)
 21. Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Saf Sci.* 2015;**76**:133-44. DOI: [10.1016/j.ssci.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.01.010)
 22. Zulqarnain M, Tyagi M. Quantification of risks associated with a representative production well in the Gulf of Mexico. ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers; 2015. DOI: [10.1115/OMAE2015-42115](https://doi.org/10.1115/OMAE2015-42115)
 23. 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. PMID: [6114928](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6114928/)
 24. Al-shanini A, Ahmad A, Khan F. Accident modelling and safety measure design of a hydrogen station. *Int J Hydrogen Ener.* 2014;**39**(35):20362-70. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2014.05.044](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.044)
 25. Vannerem M. Bow tie methodology: a tool to enhance the visibility and understanding of nuclear safety cases. *NEA CSNI R.* 2013;**4**:139-55.
 26. Zerrouki H, Smadi H. Bayesian belief network used in the chemical and process industry: a review and application. *J Fail Anal Prev.* 2017;**17**(1):159-65.
 27. Autor O, Autor SI. OREDA: offshore reliability data handbook. New York: PO Box; 2002.
 28. Abimbola M, Khan F, Khakzad N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. *J Loss Prev Proc Ind.* 2014;**30**:74-85. DOI: [10.1016/j.jlp.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.05.002)
 29. Bhandari J, Abbassi R, Garaniya V, Khan F. Risk analysis of deep water drilling operations using Bayesian network. *J Loss Prev Proc Ind.* 2015;**38**:11-23. DOI: [10.1016/j.jlp.2015.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.004)