

چارچوب یکپارچه FTA-MCDM برای شناسایی علل ریشه‌ای و اولویت‌بندی عوامل کنترلی در فوران چاه‌های نفت و گاز (مطالعه موردی: میدان گازی پارس جنوبی)
سجاد قنواتی^۱، کتایون ورشوساز^{۱*}

^۱ گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: فوران چاه‌های نفت و گاز، مهم‌ترین ریسک در صنعت حفاری محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل علل ریشه‌ای و ارزیابی مخاطرات فوران چاه‌های نفت و گاز با متد FTA و اولویت‌بندی عوامل کنترلی موثر با روش تصمیم‌گیری چند معیاره در میدان گازی پارس جنوبی در سال ۱۴۰۲ صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها: پژوهش توصیفی- کاربردی حاضر در یک دکل حفاری خشکی انجام شد. شناسایی علل ریشه‌ای فوران چاه با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) و بر اساس نظرات ۱۰ نفر از کارشناس صورت گرفت. تحلیل کمی درخت خطا و محاسبه احتمال فوران چاه با استفاده از نرم‌افزار Cara-FaultTree انجام شد. اولویت‌بندی عوامل کنترلی شناسایی شده با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چند معیاره انجام گرفت. در انجام این پژوهش و استفاده از منابع، رعایت موازین اخلاقی انجام گردید.

یافته‌ها: تعداد ۲۴ رویداد پایه‌ای و میانی شناسایی گردید. خطای انسانی با مقدار ۰/۰۱ دارای بیشترین مقدار احتمال شکست از میان رویدادهای بررسی شده بوده است. احتمال فوران هیدروکربنی چاه برابر با $10^{-4} \times 8/2$ است. مؤلفه‌های فرو ریزش دکل حفاری، حوادث طبیعی و خرابی سیستم جلوگیری‌کننده فوران به ترتیب با ضرایب $10^{-4} \times 1/224$ ، $10^{-7} \times 5/08$ و $10^{-8} \times 7/65$ به عنوان عوامل اصلی بروز حادثه فوران چاه در این پژوهش شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: کارایی و قابلیت اطمینان لایه حفاظتی به عنوان راهکار اساسی برای مقابله با این تهدید در چاه‌های نفت و گاز پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: فوران چاه‌های نفت و گاز؛ تحلیل درخت خطا؛ تصمیم‌گیری چند معیاره.

Please cite this article as: Ghanoati S, Varshousaz K. An integrated FTA-MCDM framework for identifying root causes and prioritizing control factors in oil and gas well blowouts (Case study: South Pars gas field). Journal of Health in the Field 2025; 13(3):58-68. Doi: <https://doi.org/10.22037/jhf.v13i3.47508>.

*نویسنده مسئول: گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

Email: k.varshosaz@iaau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳

مقدمه

پیشرفت فناوری و رقابت فشرده در عرصه های صنعتی، تولیدی و خدماتی منجر به تغییرات اقتصادی و اجتماعی همراه با پیامدهای مختلف آن شده است. یکی از آثار سوء صنعتی شدن افزایش روزافزون تعداد و تنوع حوادث شغلی است [۱]. حفاری چاه های نفت و گاز همواره با مخاطرات و مشکلات اجرایی روبرو می‌باشد که به خسارت‌های زیادی منجر می‌شود [۲]. مدیریت و ارزیابی ریسک یکی از مهمترین ابزارهایی است که می‌توان با کاربرد آن، از وقوع رویدادهای ناخواسته پیشگیری نموده و موانع و اقدامات کاهنده را برای حوادث احتمالی پیش‌بینی نمود [۳، ۴]. از سویی دیگر، نیروی انسانی به عنوان مهمترین عامل در تولید، همواره توسط عوامل بسیاری تهدید میشود که یکی از مهمترین آنها حوادث ناشی از کار می باشد [۵]. بر اساس آمار سازمان بین المللی کار سالانه حدود ۲/۳ میلیون زن و مرد در سرتاسر جهان (حدود ۶۰۰۰ مرگ در هرروز) براثر حوادث و بیماری های ناشی از کار جان خود را از دست میدهند. در سراسر جهان، سالانه حدود ۳۴۰ میلیون حادثه شغلی و ۱۶۰ میلیون بیماری ناشی از کار رخ میدهد [۶]. صنعت حفاری نفت و گاز در دو بخش جداگانه ساحلی و فراساحلی فعالیت می‌کند. همچنین نوع چاه‌های حفاری از لحاظ کارکردی شامل چاه‌های اکتشافی و توسعه‌ای هستند [۷]. حفاری در مناطق فراساحلی از جمله فعالیتهایی است که اقدامات ایمنی را به چالش می‌کشد. این موضوع به سبب طبیعت و محیط خشن، لزوم داشتن سرعت عملیاتی بالا و کنترل از راه دور تجهیزات درون چاهی می‌باشد [۸]. یکی از خطرناکترین و پرهزینه‌ترین رویدادهای صنعت حفاری، فوران و سیلان می‌باشد که به علت بوجود آوردن خسارات مالی و انسانی شدید دارای اهمیت بسیاری در حفاری چاه‌های نفت و گاز دارند [۹]. فوران چاه به عنوان یکی از مخاطرات بحرانی در عملیات حفاری، ناشی از غلبه فشار سازندی بر فشار هیدرواستاتیک ستون سیال حفاری می‌باشد که در صورت عدم تشخیص و کنترل به موقع سیلان، منجر به پیامدهای فاجعه‌بار ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی می‌شود [۱۰، ۱۱]. از این رو، کنترل چاه به عنوان مجموعه‌ای از اقدامات فنی، مهندسی و مدیریتی با هدف پیشگیری، شناسایی و مهار سیلان و جلوگیری از وقوع فوران، نقش کلیدی در مدیریت ریسک حفاری ایفا می‌کند [۱۲، ۱۳].

تجربه وقوع حوادث بزرگ فوران چاه در سطح بین‌المللی و ملی، از جمله حادثه Deepwater Horizon در خلیج مکزیک [۱۴] و فوران گاز H₂S در دکل ۱۱۸ شرکت حفاری شمال [۱۵] که منجر به فوت ۴ نفر از متخصصان صنعت نفت شد، نشان‌دهنده ناکافی بودن رویکردهای سنتی و واکنشی در مواجهه با این پدیده و ضرورت به‌کارگیری روش‌های نظام‌مند ارزیابی ریسک می‌باشد. در این راستا، روش‌های مختلفی برای تحلیل سناریوهای بروز حوادث توسعه یافته‌اند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به تحلیل درخت خطا، آنالیز رویداد پیامد، تحلیل لایه‌های حفاظتی

(LOPA)، روش تربیود بتا و تحلیل شرایط بحرانی اشاره کرد [۱۶]. تحلیل درخت خطا (FTA) یکی از روش‌های قیاسی در ارزیابی ریسک است که با تعریف یک رویداد ناخواسته به عنوان رویداد رأس، به شناسایی سیستماتیک ترکیب‌های منطقی خرابی اجزا، خطاهای انسانی و نقص‌های سیستمی منجر به وقوع آن رویداد می‌پردازد و امکان تحلیل کیفی و کمی ریسک را فراهم می‌کند. تحلیل درخت خطا (FTA) به دلیل قابلیت شناسایی ساختارمند علل ریشه‌ای، مدل‌سازی روابط علی- معلولی و برآورد کمی احتمال وقوع حوادث، ابزار مناسبی برای تحلیل فوران چاه محسوب می‌شود. با این حال، خروجی‌های FTA به تنهایی امکان اولویت‌بندی مؤثر اقدامات کنترلی را فراهم نمی‌کند؛ از این رو، تلفیق آن با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند به انتخاب و رتبه‌بندی منطقی و واقع‌گرایانه عوامل کنترلی منجر شود [۱۷]. میدان گازی پارس جنوبی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مخازن گازی جهان، به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، فشار بالای سازندها و حجم گسترده عملیات حفاری، از پتانسیل بالایی برای وقوع سیلان و فوران برخوردار است. بنابراین، انجام مطالعات نظام‌مند ارزیابی ریسک فوران چاه و اولویت‌بندی عوامل کنترلی در این میدان، به‌ویژه در طرح‌های توسعه‌ای، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف ارائه چارچوب یکپارچه FTA-MCDM برای شناسایی علل ریشه‌ای و اولویت‌بندی عوامل کنترلی در فوران چاه‌های نفت و گاز در طرح توسعه فاز ۱۱ پارس جنوبی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در یک دکل حفاری خشکی در محدوده میدان گازی پارس جنوبی در عسلویه انجام شده است. عمق نهایی این چاه حفاری ۳۸۵۶ متر، نوع گل مورد استفاده پایه روغنی و آب نمکی، دارای سیستم مدیریت زائادات برای گل حفاری می‌باشد. تعداد ۱۱۲ نفر در دو شیفت در این دکل حفاری مشغول بکار هستند. با توجه به حفاری در سازندهای آسماری، پتانسیل بالایی برای فوران چاه حفاری وجود دارد. به منظور شناسایی و ارزیابی خطرات و تحلیل روابط علی و معلولی بین رویدادهای شکست اجزا و شکست سیستم، دو رویکرد مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل تحلیل استقرائی (Inductive) یا رو به جلو (Forward) و تحلیل قیاسی (Deductive) یا رو به عقب (Backward) می‌باشند. تحلیل استقرائی با مجموعه‌ای از شرایط شکست اجزا آغاز می‌شود و با شناسایی پیامدهای احتمالی رو به جلو پیش می‌رود، بطوریکه رویکرد «What happens if» (چه اتفاقی می‌افتد اگر...) دنبال می‌شود. اصطلاحات و نمادهای به‌کار رفته در تحلیل درخت خطا عبارت‌اند از: رویداد خطا (Fault Event)، رویداد شر (Undesired Event)، رویداد اصلی (Top Event)، رویداد میانی (Intermediate Event) و رویداد

تحلیل کمی درخت خطا با استفاده از روابط احتمال برای دروازه‌های منطقی AND و OR انجام شد. در موارد استقلال آماری رویدادهای روابط استاندارد احتمال و در صورت وجود وابستگی، روابط اصلاح شده به کار گرفته شد. همچنین، به منظور تعیین اهمیت رویدادهای پایه در وقوع رویداد نهایی، از شاخص Vesely-Fussell استفاده گردید. ترسیم و تحلیل درخت خطا با بهره‌گیری از نرم‌افزار CARA Fault Tree V.4.1 انجام شد [۱۹]. این نرم‌افزار ابزار پیشرفته تحلیل درخت خطا و درخت رویداد است که ارزیابی ریسک و قابلیت اطمینان سامانه‌های پیچیده توسط آن صورت می‌گیرد.

شناسایی عوامل کنترلی

پس از تحلیل کیفی و کمی درخت خطا، مهم‌ترین رویدادهای پایه و مسیرهای بحرانی منجر به فوران شناسایی شدند. بر اساس این نتایج و با مرور دستورالعمل‌های کنترل چاه و تجارب عملیاتی، مجموعه‌ای از عوامل کنترلی مؤثر در پیشگیری و کاهش ریسک فوران استخراج گردید که مبنای مرحله تصمیم‌گیری چند معیاره قرار گرفت.

نظرات ۱۰ نفر از متخصصان حوزه حفاری و کنترل چاه به منظور انجام مقایسات زوجی و اولویت‌بندی عوامل کنترلی اخذ گردید. معیارهای انتخاب خبرگان شامل موارد زیر بود:

- حداقل ۱۰ سال سابقه کاری مرتبط در عملیات حفاری، کنترل چاه یا ایمنی حفاری

- سابقه فعالیت مستقیم در پروژه‌های حفاری میادین گازی

- آشنایی با حوادث سیلان و فوران چاه

- تحصیلات دانشگاهی مرتبط در رشته‌های مهندسی نفت، حفاری یا HSE

جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسشنامه مقایسات زوجی و جلسات کارشناسی انجام شد. نظرات خبرگان پس از بررسی سازگاری، در تحلیل AHP مورد استفاده قرار گرفت.

الف) محاسبات وزن‌های نسبی

به منظور اولویت‌بندی عوامل کنترلی مؤثر در پیشگیری و کاهش ریسک فوران چاه، از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process- AHP) به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر قضاوت خبرگان استفاده شد. این روش امکان تبدیل قضاوت‌های کیفی خبرگان به مقادیر کمی و استخراج اولویت‌های نسبی گزینه‌ها را فراهم می‌کند. در گام نخست، ساختار سلسله مراتبی مسئله تصمیم‌گیری تعریف گردید. در این ساختار، هدف نهایی در بالاترین سطح به صورت «اولویت‌بندی عوامل کنترلی فوران چاه» در نظر گرفته شد. سطح میانی شامل معیارهای تصمیم‌گیری استخراج شده از نتایج تحلیل درخت خطا و مطالعات پیشین بوده و در سطح پایین، گزینه‌ها شامل عوامل کنترلی شناسایی شده قرار گرفتند. در مرحله بعد، به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها و

پایانی که شامل رویداد پایه‌ای (Basic Event)، رویداد توسعه نیافته (Undeveloped Event) و رویداد خانهای (House Event) می‌باشد. همچنین، نمادهای انتقال (Transfer Symbols)، شامل نمادهای انتقال به خارج (Transfer Out) و انتقال به داخل (Transfer In) هستند. از سوی دیگر، نمادهای منطقی یا دروازه‌ها (Gates) شامل دروازه (AND Gate)؛ دروازه یا (OR Gate)؛ دروازه m از n (m-out-of-n Gate) و دروازه بازدارنده (Inhibit Gate) می‌باشند. طریقه تجزیه و تحلیل کمی درخت خطا به شرح زیر است: در صورتی که رویدادهای پایانی A و B به هم وابسته باشند، رابطه ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$P[Z] = P[A \cap B] = P\left[A \cap \frac{B}{A}\right] \quad (1)$$

در صورتی که رویدادهای پایانی A و B از نظر آماری مستقل از هم باشند، رابطه ۲ مورد استفاده قرار خواهد گرفت:

$$P\left[\frac{B}{A}\right] = P[B] \quad (2)$$

در صورتی که رویدادهای A و B به هم وابسته نباشند، رابطه ۳ مورد استفاده قرار خواهد گرفت:

$$P[Z] = P[A \cup B] = P[A] + P[B] - P[A \cap B] \quad (3)$$

در صورتی که رویدادهای A و B مستقل از هم باشند، رابطه ۴ مورد استفاده قرار خواهد گرفت:

$$P[Z] = P[A] + P[B] - P[A]P[B] \quad (4)$$

در صورتی که رویدادهای A و B مستقل از هم نباشند، رابطه ۵ مورد استفاده قرار خواهد گرفت:

$$P[Z] = P[A] + P[B] - P[A]P[B] \quad (5)$$

رده بندی کمی رویدادهای پایانی نیز بر مبنای رابطه ۶ صورت خواهد گرفت:

$$P[Z] = P[I1 \cup I2 \cup \dots \cup In] = P\{I1\} + P\{I2\} \dots + P\{In\} \quad (6)$$

در صورت کوچک بودن سیستم تحت مطالعه یا انجام کامپیوتری تجزیه و تحلیل درخت خطا که امکان تعیین کلیه برش‌های حداقل وجود دارد فرمول vesely-fussell (رابطه ۷) استفاده می‌شود:

$$I_1 = \sum U_a / U_s \quad (7)$$

در این رابطه، IA اهمیت رویداد پایانی A در ایجاد رویداد اصلی $\sum U_a$ حاصل جمع احتمال وقوع برش‌های حداقلی که رویداد A در آنها وجود دارد و

U_s احتمال وقوع رویداد اصلی [۱۸] هستند.

رویداد نهایی (TE) که در تحقیق حاضر، احتمال فوران چاه است، با توجه به دروازه " و " به شکل زیر محاسبه گردید.

TE (Hydrocarbon Blow-Out) = (Kick) $\cap$ (Well Control Failure) $\cap$ (Kick Detection Failure)

TE (Hydrocarbon Blow-Out) = P (Kick). P (Well Control Failure). P (Kick Detection Failure) = 0.743*
0.185*0.596 = 0.00082 = 8/2 E -04

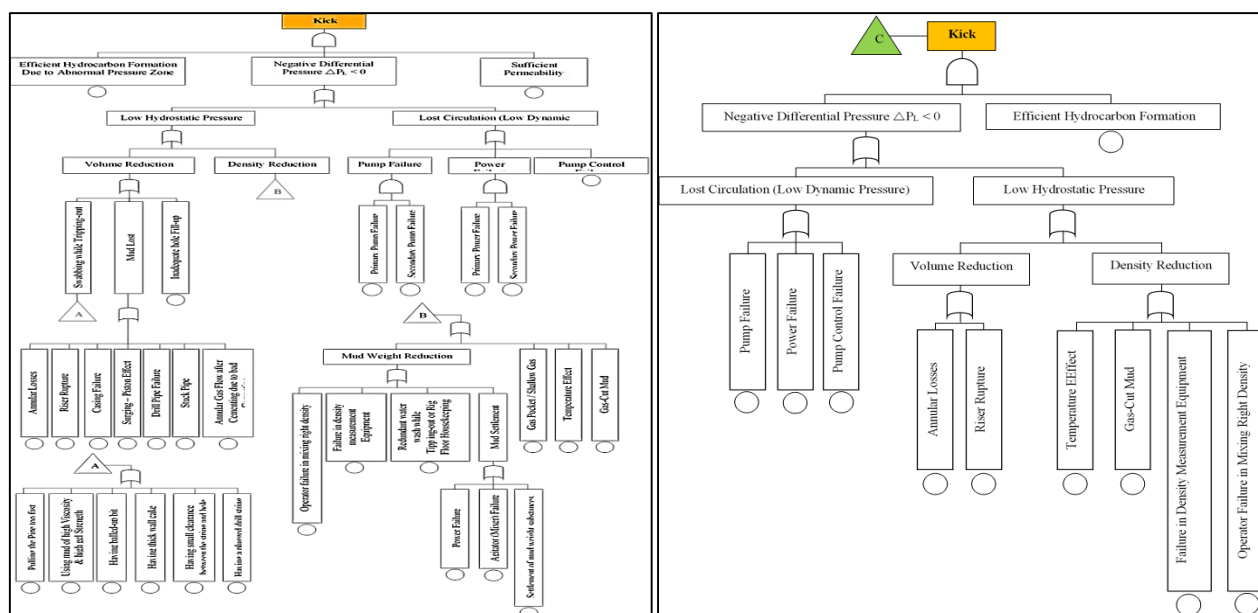
یافته‌ها

درخت خطای رسم شده برای پدیده سیلان دارای علل ریشه‌ای بسیاری است که محاسبات آن را پیچیده می‌کند. با توجه به نبود داده‌های احتمالی دقیق، از رویکرد منطق فازی به منظور تخمین احتمالات رویدادها استفاده گردید. این فرآیند نیازمند طراحی پرسشنامه، توزیع آن بین خبرگان و انجام مصاحبه‌های تخصصی بود. ترسیم درخت خطای رویداد سیلان در شکل ۱-الف و درخت خطای ساده شده این رویداد در شکل ۱-ب ارائه شده است.

دو رویداد اصلی «اختلاف فشار منفی» و «تشکیل هیدروکربن اشباع» به عنوان رویدادهای آغازین وقوع سیلان تعیین شدند. با توجه به اینکه آب‌های کم عمق سازندهای زمین‌شناسی از استحکام کافی برای مقاومت در برابر سیلان برخوردار نمی‌باشند، استفاده از شیرهای فوران‌گیر BOP (Blowout Preventer) ایمن نبوده و لذا پیشگیری از بوجود آمدن سیلان بهتر و کاراتر از استفاده از اقدامات کنترلی ثانویه نظیر بکارگیری BOP می‌باشد. در صورت بروز سیلان و کنترل آن توسط BOP این امکان وجود دارد که سازند دچار شکست شده و یک فوران زیرزمینی اتفاق افتاده که منجر به باز شدن دهانه‌ای غار مانند در سازند شود. ایجاد حفره در نتیجه این سیلان می‌توان باعث کج شدن و یا حتی واژگون شدن دکل حفاری گردد. رویدادهای پایه و احتمال رویداد آنها مربوط به احتمال رویداد شناسایی سیلان در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

گزینه‌ها، مقایسات زوجی بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی (Saaty) انجام شد. بدین منظور، پرسشنامه‌های مقایسه زوجی در اختیار ۱۰ نفر از خبرگان حوزه حفاری و کنترل چاه قرار گرفت و هر کارشناس اهمیت نسبی عناصر را به صورت زوج به زوج ارزیابی نمود. ماتریس‌های مقایسه زوجی حاصل از نظرات خبرگان، پس از بررسی اولیه، به صورت میانگین هندسی تلفیق شدند تا یک ماتریس نهایی برای تحلیل تشکیل گردد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، فرآیند نرمال‌سازی انجام شد؛ به طوری که مجموع عناصر هر ستون محاسبه و هر عنصر بر مجموع ستون مربوطه تقسیم گردید. سپس، وزن نسبی هر معیار و گزینه با محاسبه میانگین مقادیر نرمال شده هر سطر استخراج شد. این وزن‌ها نشان‌دهنده میزان اهمیت نسبی هر عامل کنترلی در کاهش ریسک فوران چاه می‌باشند.

به منظور اطمینان از اعتبار قضاوت‌های خبرگان، نرخ سازگاری (Consistency Ratio- CR) برای ماتریس‌های مقایسه زوجی محاسبه گردید. در صورتی که مقدار CR کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری قضاوت‌ها قابل قبول در نظر گرفته شد و ماتریس مربوطه در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، با ادغام وزن‌های نسبی در سطوح مختلف سلسله مراتب، وزن نهایی و رتبه‌بندی عوامل کنترلی به دست آمد [۲۰]. محاسبات اوزان در روش AHP توسط نرم‌افزار Expert Choice 11 صورت گرفت.



شکل ۱- ترسیم درخت خطای رویداد سیلان (الف) و رویداد سیلان به صورت ساده شده (ب)

Figure 1- Drawing the fault tree of the Ceylon event (a) and Ceylon incident in a simplified form (b)

گیج فشار و سنسور جابجایی به ترتیب با احتمالات $10^{-2} \times 1/87$ و 10^{-4} در زمره رویدادهای پایه با تأثیر قابل توجه در عدم تشخیص سیلان قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که نقص عملکرد ابزارهای پایش کلیدی نقش مهمی در افزایش احتمال عدم شناسایی سیلان دارند.

رویدادهای پایه مرتبط با عدم شناسایی به موقع سیلان شامل دو دسته اصلی خرابی تجهیزات اندازه‌گیری و خطاهای انسانی اپراتور می‌باشند. در میان خرابی تجهیزات، احتمال وقوع خرابی فلومتر برابر با $10^{-4} \times 1$ ، خرابی نشانگر سطح مخزن $10^{-4} \times 2$ ، خرابی آشکارساز گاز $10^{-4} \times 3$ و خرابی دانسیته‌متر از نوع ستون $10^{-4} \times 3/40$ برآورد شده است. همچنین، خرابی

جدول ۱- رویدادهای پایه و احتمال رویداد آنها مربوط به احتمال رویداد شناسایی سیلان

Table 1- Basic events and their probability of occurrence related to the probability of well eruption detection event

شخص رویداد پایه	توصیف وقایع پایه	احتمال
۱	خرابی نشانگر سطح شارژ مخزن (سیستم شناور)	$2E-04$
۲	عدم توجه اپراتور به تغییرات سطح مخزن	$21/2E-01$
۳	خرابی فلومتر	$00/1E-04$
۴	عدم توجه اپراتور به فلومتر	$10/6E-03$
۵	خرابی گیج فشار	$87/1E-02$
۶	عدم توجه اپراتور به تغییر فشار	$13/1E-01$
۷	خرابی سنسور جابجایی (مربوط به میزان نفوذ)	$00/2E-04$
۸	عدم توجه اپراتور به تغییر در نرخ نفوذ	$65/5E-02$
۹	خرابی آشکارساز گاز	$00/3E-04$
۱۰	عدم توجه اپراتور به گاز	$34/7E-02$
۱۱	خرابی دانسیته متر (نوع ستون)	$40/3E-03$
۱۲	عدم توجه اپراتور به تغییرات چگالی	$59/1E-02$
۱۳	خرابی سنسور مقاومت	$00/6E-04$
۱۴	عدم توجه اپراتور به تغییرات رسانایی	$59/1E-02$

علل ریشه‌ای خطای شیرهای فوران گیر

کنترل نمودن عدم نفوذ سیال چاه در مراحل اولیه و مقدماتی بوسیله کنترل‌های مقدماتی چاه و مدیریت سیال حفاری صورت می‌پذیرد [۲۱]. کنترل مقدماتی چاه بوسیله افزایش فشار انتهایی چاه و افزایش فشار هیدرواستاتیکی ناشی از سیال حفاری اتفاق می‌افتد. این عملیات بوسیله گردش سیال حفاری و یا بالا بردن دانسیته گل انجام می‌پذیرد و کنترل ثانویه چاه بوسیله ابزار و تجهیزاتی مانند شیرهای فوران گیر (BOP) صورت می‌پذیرد. از دست رفتن کنترل‌های مقدماتی و ثانویه حفاری با سیلان خود را نشان می‌دهد. کنترل مقدماتی چاه در اصل همان موانع اولیه و یا موانع پیشگیرنده هستند اگر این لایه حفاظتی نتواند به درستی به وظیفه خود عمل نماید، سیلان اتفاق می‌افتد [۲۲]. کنترل مقدماتی چاه شامل موانع اولیه و یا موانع پیشگیرنده است. اگر این لایه حفاظتی نتواند به درستی به وظیفه خود عمل نماید، سیلان اتفاق می‌افتد. شیرهای فوران گیر در اینجا نقش خود را نشان می‌دهند اگر کنترل‌های ثانویه نیز نتوانند به فعالیت و وظیفه خود عمل کنند فوران صورت می‌پذیرد. فوران عبارت است از راه یافتن ناخواسته و بدون کنترل سیال سازند به بیرون از چاه که می‌تواند پیامدهای مخربی

بر روی انسان، ابزار و تجهیزات و محیط زیست داشته باشد [۲۳]. فوران زمانی رخ می‌دهد که دومین مانع و اقدامات ایمنی کنترل چاه نیز ناموفق باشد. در حقیقت یک سیلان زمانی توسعه یافته و به فوران تبدیل می‌شود که یا تجهیزات و ادوات مکانیکی که به عنوان اقدامات ثانویه می‌باشند نتواند بطور مناسب به وظیفه خود عمل کرده و یا دچار نقص و یا شکست شوند و یا اینکه سیلان در زمان شروع و به موقع شناسایی و کشف نشود. و در نتیجه هیچ کدام از لایه های ایمنی وارد عمل نشوند [۲۴].

علل ریشه ای وقوع فوران

اغلب از آنجایی که گاز طبیعی و یا سایر سیالات هیدروکربنی در سیلان موجود هستند، این سیالات شروع به آتش گرفتن می‌کنند و غالباً شعله‌های آتش غیر عادی را ایجاد می‌کند. در بعضی موارد، سیال سازند می‌تواند شامل هیدروژن سولفور باشد که موجب تلفات انسانی شود. سیالاتی که از چاه فوران می‌کنند می‌توانند موجبات آلودگی‌های محیط زیستی را فراهم آورند [۲۵]. ریسک ایجاد فوران را نمی‌توان بطور کامل از بین برد، اما می‌توان با استفاده از اقدامات پیشگیرنده و کنترلی از احتمال و شدت وقوع آن کاست. رویدادهای پایه و احتمال رویداد آنها مربوط به احتمال رویداد فوران در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- رویدادهای پایه و احتمال رویداد آنها مربوط به احتمال رویداد فوران

Table 2- Basic events and their probability of occurrence related to the probability of an eruption

ردیف	توصیف وقایع پایه	احتمال	ردیف	توصیف وقایع پایه	احتمال
۱	ضربه		۱۳	خرابی لوله مته (x5)	$5/00E-05$
۲	شکست تشخیص ضربه		۱۴	سیمان بد (x6)	...
۳	قفل شدن دکل (x21)	$2/50E-03$	۱۵	خرابی برق اولیه (x7)	$5/00E-04$
۴	حادثه طبیعی (x20)	$3/00E-05$	۱۶	خرابی برق ثانویه (۸)	$5/00E-04$
۵	خرابی سیستم BOP (x22)	$1/53E-03$	۱۷	خرابی سیستم رایزر (x9)	$1/00E-04$
۶	حمله نظامی (x17)	...	۱۸	خطای اپراتور (x10)	...
۷	تروریسم و خرابکاری (x18)	...	۱۹	خرابی پمپ اصلی (x11)	$4/30E-03$
۸	برخورد کشتی (x19)	$3/00E-05$	۲۰	خرابی پمپ پشتیبان (x12)	$4/30E-03$
۹	خرابی نشانگر سطح گودال (x1)	$2/00E-04$	۲۱	خرابی شیر بدون برگشت لوله مته (x13)	$1/30E-04$
۱۰	خرابی ضربه پمپ (x2)	$2/00E-04$	۲۲	خرابی پوشش (x14)	$6/40E-04$
۱۱	خرابی نشانگر جریان گل (x3)	$2/00E-04$	۲۳	خرابی محفظه سر محفظه (x15)	$1/00E-05$
۱۲	خرابی خط خفه کردن و کشتن (x4)	$3/60E-04$	۲۴	خرابی اتصال سر چاه (x16)	$1/00E-05$

جدول ۳- محاسبه احتمال حادثه نهایی برای وقوع حادثه فوران چاه

Table 3- Calculate the probability of TE for the occurrence of a well-blowout incident

ردیف	حادثه نهایی	کد حادثه	احتمال وقوع	احتمال تجمعی	احتمال کل	شاخص حادثه نهایی
۱	سقوط دکل	X21	$0/00250$	$14E-1/224$	۱	$0/0184$
۲	فاجعه طبیعی	X20	$0/00003$	$07E-5/508$	$0/9999$	$0/9815$
۳	خرابی سیستم BOP	X22	$0/00153$	$08E-7/65$	۱	
۴	حمله نظامی	X17	$0/00700$	$0/0000765$	$0/9999$	
۵	تروریسم و خرابکاری	X18	$0/00900$	$10E-3/825$	۱	
۶	برخورد کشتی	X19	$0/00003$	$0/00000153$	۱	
۷	خرابی نشانگر سطح گودال	X1	$0/00020$	$0/00000153$	$0/9999$	
۸	خرابی سکنه مغزی پمپ	X2	$0/00020$	$08E-2/82897$	۱	
۹	خرابی نشانگر جریان گل	X3	$0/00020$	$07E-1/989$	۱	
۱۰	خرابی خط خفه کردن و کشتن	X4	$0/00036$	$07E-9/792$	$0/9999$	
۱۱	خرابی لوله مته	X5	$0/00005$	$13E-1/53$	۱	
۱۲	سیمان کاری بد	X6	$0/00500$	$0/00700$	$0/993$	
۱۳	خرابی برق اولیه	X7	$0/00050$	$0/00900$	$0/991$	
۱۴	خرابی برق ثانویه	X8	$0/00050$	$0/00003$	$0/9999$	
۱۵	خرابی سیستم رایزر	X9	$0/00010$	$0/00003$	$0/9999$	
۱۶	خطای اپراتور	X10	$0/01000$	$0/00250$	$0/9975$	
۱۷	خرابی پمپ اصلی	X11	$0/00430$			
۱۸	خرابی پمپ پشتیبان	X12	$0/00430$			
۱۹	خرابی شیر بدون برگشت لوله مته	X13	$0/00013$			
۲۰	شکست پوشش	X14	$0/00064$			
۲۱	شکست مسکن سر پوشش	X15	$0/00001$			
۲۲	خرابی کانکتور سر چاه	X16	$0/00001$			

بروز حوادث فوران مانند دریای شمال تا سواحل کانادا، نوع چاه‌ها (اکتشافی و توسعه‌ای)، عمق حفاری (کم عمق و آبهای عمیق)، زمان

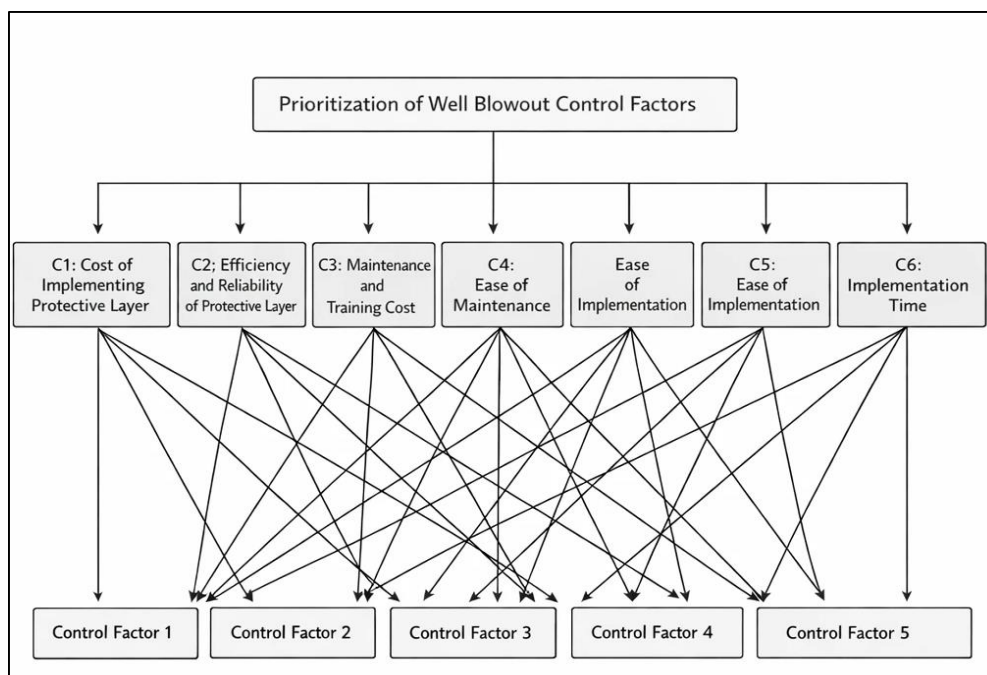
مهم‌ترین عامل وقوع فوران چاه، Kick و خطای ضربه ای در حفاری است. احتمال وقوع آن $5/00 \times 10^{-5}$ است. تعداد زیاد و مکانهای مختلف

مهم‌ترین رویدادهای پایه در مسیرهای بحرانی منجر به فوران شناسایی شد. همچنین رویدادهایی نظیر سیمان‌کاری نامناسب با احتمال $0/005$ ، خرابی برق اولیه با احتمال $0/0005$ و خرابی نشانگرهای ابزار دقیق مانند نشانگر سطح گودال و جریان گل (با مقادیر $0/0002$) نشان می‌دهند که ضعف در یکپارچگی تجهیزات و سیستم‌های پایش، احتمال عدم تشخیص به‌موقع سیلان و در نهایت وقوع فوران را افزایش می‌دهد.

تحلیل و اولویت بندی عوامل کنترلی موثر بر فوران چاه با استفاده از روش AHP

۶ معیار تاثیرگذار بر وقوع حادثه استخراج شده است که عبارتند از هزینه اجرای لایه حفاظتی (C1)، کارایی و قابلیت اطمینان لایه حفاظتی (C2)، هزینه تعمیر و نگهداری/آموزش (C3)، راحتی در تعمیر و نگهداری (C4)، سهولت اجرای لایه حفاظتی (C5) و مدت زمان اجرای لایه حفاظتی (C6). ساختار سلسله مراتبی عوامل کنترلی موثر بر فوران چاه بر اساس از روش AHP در شکل ۲ ارائه شده است.

بروز فوران (در هنگام تربینگ و یا حفاری) و عوامل دیگری چون وضعیت آب و هوایی منطقه، دمای سازند، فشار سازند، نفوذپذیری و نرخ نفوذ (BOP) و همینطور میزان خلل و فرج سازند بستگی دارد [۲۶ و ۲۷]. رویدادهای شناخته شده که دارای نرخ شکست مشخص بودند با استفاده از منابع معتبر محاسبه و سپس رویدادهای ناشناخته مورد آنالیز قرار گرفت. در نهایت Top Event (حادثه نهایی- اصلی) محاسبه گردید (جدول شماره ۳). بر اساس نتایج، احتمال وقوع رویداد نهایی فوران چاه برابر با $10 \times 8/50$ و فروریزش دکل حفاری با ضریب $10 \times 1/224$ حوادث طبیعی با ضریب $10 \times 5/508$ فوران (BOP) با ضریب $10 \times 7/65$ به عنوان مؤلفه‌های اصلی مؤثر در بروز فوران چاه تعیین شدند. این نتایج نشان می‌دهد که رویدادهای با احتمال کم اما پیامد شدید، سهم مهمی در شکل‌گیری رویداد نهایی فوران چاه ایفا می‌کنند. بررسی رویدادهای پایه و میانی نشان می‌دهد که عوامل انسانی و تجهیزاتی نقش برجسته‌ای در افزایش احتمال فوران دارند. خطای اپراتور با نرخ شکست $0/01$ و ضریب مشارکت $0/025$ یکی از



شکل ۲- ساختار سلسله مراتبی عوامل کنترلی موثر بر فوران چاه بر اساس از روش AHP

Figure 2- Hierarchical structure of control factors affecting well blowout based on the AHP method

شماره ۴ ارائه شده است. این نمرات، میانگین مقیاس برای ۱۰ نفر از کارشناسان بوده است. بعد از تکمیل ماتریس‌های مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری هر کدام محاسبه شد که برابر با $0/034$ بود.

این معیارها به روش اسنادی و کارشناسی تعیین شده که در جدول شماره ۴ ارائه شده‌اند. وزن‌دهی به معیارها در روش تحلیل سلسله مراتبی AHP بصورت مقایسات زوجی صورت گرفت که نتایج آن در جدول

جدول ۴ - مقایسات زوجی معیارهای اصلی
Table 4- Pairwise comparisons of the main criteria

C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۳۱۵	۱/۰۵۹	۱/۳۹۸	۲/۴۶	۰/۲۰۹		C1
۱/۳۲	۲/۲۲۱	۳/۲۷۷	۵/۱۱۵			C2
۰/۶۹۹	۰/۶۰۸	۰/۸۰۳				C3
۰/۲۰۶	۰/۴۴۱					C4
۰/۸۷۰						C5
						C6

دارای احتمال وقوع نسبتاً پایین بودند، اما تجمع آنها در ساختار منطقی درخت خطا، احتمال عدم تشخیص سیلان را به طور معناداری افزایش داده است. در این میان، خطاهای انسانی نظیر عدم توجه اپراتور به تغییرات سطح مخزن، فشار یا نرخ نفوذ، بیشترین سهم را در افزایش احتمال شکست نشان دادند. لذا در حضور تجهیزات اندازه‌گیری، ضعف در پایش انسانی و تصمیم‌گیری عملیاتی نقش تعیین‌کننده‌ای در بروز حوادث دارد. سیلان، پیامد مستقیم ناکارآمدی لایه‌های حفاظتی اولیه نظیر مدیریت فشار هیدرواستاتیک و کنترل سیال حفاری است. در صورتی که این لایه‌ها به‌درستی عمل نکنند، وابستگی سیستم به لایه‌های حفاظتی ثانویه مانند شیرهای فوران‌گیر (BOP) افزایش می‌یابد. با این حال، نتایج تحلیل نشان داد که خرابی یا عدم عملکرد مناسب سیستم BOP نیز می‌تواند مسیر حادثه را از سیلان به فوران کامل هدایت کند. این یافته اهمیت ماهیت «لایه‌ای» ایمنی در عملیات حفاری را نشان داده و لذا شکست متوالی لایه‌های حفاظتی، احتمال وقوع فوران را به شدت افزایش می‌دهد. تحلیل کمی رویداد نهایی نشان داد که احتمال فوران چاه برابر با $8/2 \times 10^{-4}$ است. با توجه به پیامدهای شدید فوران، از منظر مدیریت ریسک قابل توجه است. نتایج همچنین نشان داد که رویدادهایی مانند فروریزش دکل حفاری، حوادث طبیعی و خرابی سیستم BOP به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی در شکل‌گیری فوران شناسایی شدند. این امر بیانگر آن است که رویدادهای با احتمال وقوع پایین ولی شدت پیامد بالا، نقش تعیین‌کننده‌ای در ریسک کلی فوران دارند و نباید در ارزیابی‌های ایمنی نادیده گرفته شوند. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان‌دهنده هم‌پوشانی و در عین حال تفاوت‌هایی معنادار است. یانگ و همکاران (۲۰۱۹) نقش شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های سازند را به‌عنوان عامل اصلی در پتانسیل فوران چاه معرفی کردند [۲۸]. این یافته با نتایج مطالعه حاضر همسو است، چراکه شرایط سازندی و فشارهای بالای مخزن به‌عنوان محرک اولیه سیلان در ساختار درخت خطا لحاظ شده‌اند. بریکیک و پارکس (۲۰۲۱) نیز ضعف سیستم‌های حفاظتی، به‌ویژه BOP، را عامل غالب در وقوع فوران گزارش کردند [۲۹] که با نتایج این پژوهش در خصوص اهمیت خرابی سیستم جلوگیری‌کننده فوران همخوانی دارد. در مقابل،

مقایسات زوجی جدول ۴، را در نرم افزار Expert choice که اوزان معیارها محاسبه شده‌اند، وارد گردید. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجی برابر با ۰/۰۵ است و چون کمتر از ۰/۱ بود که نشان دهنده سازگاری قابل قبول آن است. نرخ ناسازگاری نتایج نشان داد که معیار کارایی و قابلیت اطمینان لایه حفاظتی با وزن ۰/۳۴۶ مهم‌ترین معیار بوده است. معیار مدت زمان اجرای لایه حفاظتی با وزن ۰/۲۳۹ دومین معیار سهولت اجرای لایه حفاظتی با وزن ۰/۱۴۵ سوم معیار از لحاظ اهمیت بوده است. بر اساس نتایج تحقیق، تعداد ۲۴ رویداد پایه‌ای و میانی در بروز پدیده فوران چاه نفت نقش دارد. تعداد ۲۰ رویداد پایه‌ای و رویداد میانی دارای نرخ شکست می‌باشند که از منابع معتبر بدست آمدند و تعداد ۴ رویداد پایه‌ای نیز اطلاعات نرخ شکست آنها موجود نبوده یا دارای ابهام می‌باشند که در این حالت از نظر کارشناسان استفاده گردید. خطای انسانی با مقدار ۰/۰۱FP دارای بیشترین مقدار احتمال شکست از میان رویدادهای بررسی شده بوده است. با توجه به محاسبات صورت گرفته، مقدار احتمال فوران چاه برابر $8/2E-04$ محاسبه گردیده است.

بحث

مطالعه حاضر با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر تحلیل درخت خطا (FTA) و تصمیم‌گیری چند معیاره برای شناسایی علل ریشه‌ای و اولویت‌بندی عوامل کنترلی مؤثر در پیشگیری از فوران چاه‌های نفت و گاز، در میدان گازی پارس جنوبی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فوران چاه پدیده‌ای چند عاملی و زنجیره‌ای شامل خطاهای انسانی، نقص تجهیزات، شرایط عملیاتی و عوامل محیطی می‌باشد. با به‌کارگیری روش‌های FTA و AHP شناسایی مسیرهای بحرانی منتهی به فوران، اقدامات کنترلی مؤثر نیز به صورت هدفمند و اولویت‌بندی شده صورت گرفت.

یافته‌های بخش تحلیل درخت خطا نشان داد که عدم شناسایی به موقع سیلان یکی از مسیرهای کلیدی منجر به فوران چاه است. در این مسیر، رویدادهای پایه مرتبط با خرابی تجهیزات پایش و به‌ویژه خطاهای انسانی اپراتور نقش برجسته‌ای ایفا می‌کنند. اگرچه برخی از خرابی‌های تجهیزاتی مانند خرابی فلومتر، نشانگر سطح مخزن و آشکارساز گاز

درخت خطا، احتمال وقوع فوران هیدروکربنی چاه در صورت خطای انسانی درجه شکست بالایی خواهد داشت. عللی همچون نظیر فروریزش دکل حفاری، حوادث طبیعی و خرابی سیستم جلوگیری کننده فوران (BOP)، نقش تعیین کننده‌ای در شکل‌گیری رویداد نهایی دارند. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت هم‌زمان عوامل انسانی و تق‌نهایی ایفا می‌کنند. نتایج حاصل از روش AHP نشان داد که کارایی و قابلیت اطمینان لایه حفاظتی مهم‌ترین معیار در اولویت‌بندی عوامل کنترلی است و معیارهای مدت زمان اجرا و سهولت اجرا در رتبه‌های بعدی قرار دارند. چارچوب FTA-MCDM ارائه‌شده در این مطالعه، ابزاری نظام‌مند و کاربردی برای شناسایی مسیرهای بحرانی فوران و انتخاب اقدامات کنترلی مؤثر فراهم می‌کند. به‌کارگیری روش‌های فازی یا پویا برای کاهش عدم قطعیت در نرخ شکست رویدادها، استفاده از داده‌های عملیاتی بلندمدت، و تعمیم چارچوب پیشنهادی به چاه‌های فراساحلی و سایر میادین نفت و گاز می‌تواند به افزایش دقت و قابلیت تعمیم نتایج در تحقیقات آینده کمک نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت پارس جنوبی واقع در عسلویه که در انجام مطالعه مشارکت نمودند تشکر ویژه می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافی ندارند.

تامین مالی مطالعه

بدین وسیله اعلام می‌شود مقاله تحت حمایت مالی قرار نگرفته است.

ملاحظات اخلاقی

احتراماً مقاله حاضر دارای کد اخلاق ۱۶۲۷۴۰۰۲۰ از دانشگاه آزاد اهواز می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

ایده و طراحی مطالعه: کتابون ورشوساز

جمع‌آوری داده‌ها: سجاد قنوتی

تحلیل و تفسیر داده‌ها: سجاد قنوتی

نگارش پیش‌نویس مقاله: کتابون ورشوساز

بازبینی انتقادی مقاله از نظر محتوای علمی: کتابون ورشوساز

تجزیه و تحلیل آماری: سجاد قنوتی

نظارت بر مطالعه: کتابون ورشوساز

استفاده از هوش مصنوعی

بدین وسیله اعلام می‌شود در تدوین مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

وود (۲۰۲۴) ضعف سیستم‌های هشداردهنده و پایش را عامل اصلی حادثه Deepwater Horizon معرفی کرده است [۳۰].

اگرچه در مطالعه حاضر نیز خرابی ابزارهای پایش و خطاهای انسانی مرتبط با آن‌ها نقش مهمی دارند، اما نتایج نشان می‌دهد که عوامل ساختاری و محیطی نظیر سقوط دکل و حوادث طبیعی در میدان مورد مطالعه سهم برجسته‌تری در شکل‌گیری فوران دارند. این تفاوت می‌تواند ناشی از اختلاف در نوع چاه (خشکی در مقابل فراساحل)، شرایط عملیاتی، و ویژگی‌های زمین‌شناسی میدان پارس جنوبی باشد. بنابراین، نتایج این پژوهش بر لزوم توجه به شرایط بومی هر میدان در ارزیابی ریسک فوران تأکید می‌کند. نتایج AHP نشان داد که کارایی و قابلیت اطمینان لایه حفاظتی مهم‌ترین معیار در اولویت‌بندی عوامل کنترلی است. این یافته به خوبی با نتایج تحلیل درخت خطا هم‌راستا است، زیرا بخش عمده‌ای از مسیرهای بحرانی فوران ناشی از شکست یا ناکارآمدی لایه‌های حفاظتی بوده‌اند. پس از آن، مدت زمان اجرای لایه حفاظتی و سهولت اجرا به‌عنوان معیارهای مهم شناسایی شدند که نشان‌دهنده اهمیت اقدامات پیشگیرانه سریع و قابل اجرا در محیط‌های عملیاتی حفاری است. این نتایج بیانگر آن است که صرفاً کاهش هزینه یا پیچیدگی فنی نباید معیار اصلی انتخاب اقدامات کنترلی باشد، بلکه قابلیت اطمینان عملکردی آن‌ها باید در اولویت قرار گیرد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پیشگیری از فوران چاه نیازمند رویکردی فنی نباید معیار اصلی انتخاب اقدامات کنترلی باشد، بلکه قابلیت اطمینان عملکردی آن‌ها باید در اولویت قرار گیرد.

چارچوب FTA-MCDM ارائه‌شده در این مطالعه، ابزاری نظام‌مند برای شناسایی مسیرهای بحرانی و انتخاب اقدامات کنترلی اثربخش فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی برای تدوین برنامه‌های مدیریتی و ایمنی در عملیات حفاری، به‌ویژه در میادین گازی پرریسک مانند پارس جنوبی، مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه بوده است. نخست، برخی از رویدادهای پایه فاقد داده‌های آماری معتبر نرخ شکست بودند که در این موارد از قضاوت خبرگان استفاده شد؛ این موضوع می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد. دوم، مطالعه به‌صورت موردی و بر روی یک دکل حفاری خشکی انجام شده است، بنابراین تعمیم نتایج به سایر میادین یا عملیات فراساحلی باید با احتیاط صورت گیرد. سوم، فرض استقلال آماری برخی رویدادها در تحلیل کمی درخت خطا می‌تواند بر دقت برآورد احتمال‌ها اثرگذار باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از داده‌های عملیاتی گسترده‌تر، روش‌های فازی و تحلیل‌های پویا برای کاهش این محدودیت‌ها استفاده شود.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان داد که فوران چاه حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل انسانی، تجهیزاتی، عملیاتی و محیطی است. بر اساس تحلیل کمی

References

- 1- Gholamnia R, Amirsalari Fard F, Khaloo Sh, Saeedi R. Identifying and prioritizing the main factors and components affecting health, safety and environment (HSE) motivation in the construction industry using fuzzy Delphi and network analysis process (ANP) methods. *Journal of Health in the Field* 2022; 10(2):20-29 (In Persian).
- 2- Wei L, Yang X, Xi C, Hong C, Yumin L, Xueqing L. Research and application of downhole blowout prevention system while drilling: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2020; 188:106882. Doi: 10.1016/j.petrol.2019.106882.
- 3- Abdel-Basset M, Gunasekaran M, Mohamed M, Chilamkurti N. A framework for risk assessment, management and evaluation: Economic tool for quantifying risks in supply chain. *Future Generation Computer Systems* 2019; 90(1):489-502. Doi: 10.1016/j.future.2018.08.035.
- 4- Ostrom LT, Wilhelmsen CA. Risk assessment: tools, techniques, and their applications. John Wiley & Sons. 2019.
- 5- Shabani A, Mirghafari M, Seyedzadeh A, Hamerezaee M, Mouloudpourfard B. Identifying and assessing risk in a textile industry in Iran using the technique of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). *Journal of Health in the Field* 2024; 12(1):11-21 (In Persian).
- 6- Asgari R, Hajjar Tabar M, Bagheri A. Investigating the relationship between HSE culture and burnout of treatment staff. *Journal of Health in the Field* 2023; 11(1):1-6 (In Persian).
- 7- Shukla A, Karki H. Application of robotics in offshore oil and gas industry—A review Part II. Robotics and Autonomous Systems 2016; 75:508-24.
- 8- Adumene S, Ikue-John H. Offshore system safety and operational challenges in harsh Arctic operations. *Journal of Safety Science and Resilience* 2022; 3(2):153-68.
- 9- Millett JM, Wilkins AD, Campbell E, Hole MJ, Taylor RA, Healy D, et al. The geology of offshore drilling through basalt sequences: Understanding operational complications to improve efficiency. *Marine and Petroleum Geology* 2016; 77:1177-92.
- 10- Yin B, Li B, Liu G, Wang Z, Sun B. Quantitative risk analysis of offshore well blowout using bayesian network. *Safety Science* 2021; 135:105080. Doi: 10.1016/j.ssci.2020.105080.
- 11- Shafiee M, Elusakin T, Enjema E. Subsea blowout preventer (BOP): Design, reliability, testing, deployment, and operation and maintenance challenges. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020; 66:104170. Doi: 10.1016/j.jlp.2020.104170.
- 12- Premaratne U, Suzuki N, Ratnayake N, Kularathne C. Burial and thermal history modelling of the Mannar Basin, offshore Sri Lanka. *Journal of Petroleum Geology* 2016; 39(2):193-213. Doi: 10.1111/jpg.12640.
- 13- Gao B, Han X, Zhang H. Study on H2S monitoring technique for high risk wellsite. *Procedia Engineering* 2012; 45:898-903.
- 14- Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science* 2015; 76:133-44. Doi: 10.1016/j.ssci.2015.01.010
- 15- Slater DH. Was the Deepwater Horizon incident a “Normal” accident?. *Safety Science* 2023; 168:106290. Doi: 10.1016/j.ssci.2023.106290.
- 16- Tayefeh Younesi A, Sabah M, Ameri Shahrabi MJ. Assesment of self-killing as a blowout control method in deep water wells. *Journal of Petroleum Geomechanics* 2022; 5(2):17-33.
- 17- Shamsuddin DSNA, Fekeri AFM, Muchtar A, Khan F, Khor BC, Lim BH, et al. Computational fluid dynamics modelling approaches of gas explosion in the chemical process industry: A review. *Process Safety and Environmental Protection* 2023; 170:112-38.
- 18- Cristea G, Constantinescu DM. A comparative critical study between FMEA and FTA risk analysis methods. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017; 252(1):012046.
- 19- Kokangül A, Polat U, Dağsuyu C. A new approximation for risk assessment using the AHP and Fine Kinney methodologies. *Safety Science* 2017; 91:24-32. Doi: 10.1016/j.ssci.2016.07.015.
- 20- Reese J, Hatteburg R, Partain L. Managing a blowout: A case study. *Journal of Petroleum Technology* 2001; 53(07):14-84.
- 21- Kabdoloy A, Feltracco D, Dupal K, Jones R, Zausa F, Gandini G, et al. Safest available technology to reduce the blowout probability in high-h2s and high-pressure drilling and completions applications while using a surface BOP. In *International Petroleum Technology Conference 2022 Feb*. P: D031S070R002. Doi: 10.2523/IPTC-22152-MS.
- 22- - Afi F, Aji WS, Noviansyah M, Aquar A, Usman R, Pentury N, et al. How to survive brown oil field production-re-route venting system to derrick mast rig to anticipate oil production losses. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2015* (pp. SPE-176235). SPE. 2015. Doi: 10.2118/176235-MS.
- 23- Januarilham Y. Analysis of component criticality in the blowout preventer. *School of Air Sciences: Stavanger University* 2012; P:118-122.

- 24 Buali M, Al-Zaid M, Abdulghaffar T, Gallagher B. First worldwide development and deployment of a uniquely designed blowout stopper. In International Petroleum Technology Conference 2023 Feb 28; Bangkok, Thailand. P IPTC-23023-EA. Doi: 10. 2523/IPTC- 23023-EA.
- 25- Sanchez J. Down hole blowout preventer (DH-BOP): Innovador equipo de seguridad para el control de influjos (Doctoral dissertation). 2011.
- 26- Carapezza ML, Ranaldi M, Tarchini L, Gattuso A, Pagliuca NM, Vinci M, Barberi F. Dangerous emissions of endogenous CO₂ and H₂S from gas blowouts of shallow wells in the Rome Municipality (Italy). *Applied geochemistry* 2020; 123:104769. Doi: 10. 1016 /j. apgeochem.2020. 104769.
- 27- Tetteh DA, Salehi S, Ghalambor A, Konate N. Mud-Gas separator analysis: A comprehensive review of sizing, design criteria, and industry standards. In SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition 2024 March 5-7; Texas, USA. P: 1-23.
- 28- Yang D, Chen G, Shi J, Li X. Effect of gas composition on dispersion characteristics of blowout gas on offshore platform. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 2019; 11(2):914-22.
- 29- Brkić D, Praks P. Probability analysis and prevention of offshore oil and gas accidents: Fire as a cause and a consequence. *Fire* 2021; 4(4):71. Doi: 10. 3390/fire4040071.
- 30- Wood DA. Natural gas drilling: an overview of sustainability challenges. *Sustainable Natural Gas Drilling* 2024; 4:3-34.



Journal homepage: <https://journals.sbmu.ac.ir/jhf>

**Journal of
Behdasht dar Arseh
(i.e., Health in the Field)**



Shahid Beheshti University of Medical Sciences
School of Public Health and Safety

Vol.13, No.3, Autumn 2025

An integrated FTA–MCDM framework for identifying root causes and prioritizing control factors in oil and gas well blowouts (Case study: South Pars gas field)

Sajjad Ghanoati¹ , Katayoun Varshousaz^{2*} 

¹ Department of Environment Sciences, Ahv. C, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abstract

Background and Aims: Blowouts of oil and gas wells are considered one of the most critical risks in drilling operations. The present study was conducted with the aim of root cause analysis and risk assessment of oil and gas well blowouts using the Fault Tree Analysis (FTA) method, as well as prioritizing effective control factors through a multi-criteria decision-making (MCDM) approach in the South Pars Gas Field in 2023.

Materials and Methods: The present descriptive–applied study was conducted on an onshore drilling rig. Root causes of well blowouts were identified using the Fault Tree Analysis (FTA) method based on the opinions of 10 experts. Quantitative fault tree analysis and estimation of blowout probability were performed using Cara FaultTree software. The identified control factors were prioritized through a multi-criteria decision-making (MCDM) method. Ethical principles were observed throughout the conduct of the study and in the use of research resources.

Results: A total of 24 basic and intermediate events were identified. Human error, with a failure probability of 0.01, had the highest likelihood among the evaluated events. The probability of a hydrocarbon blowout was estimated to be 8.2×10^{-4} . The components of drilling rig collapse, natural hazards, and failure of the blowout preventer system were identified as the main contributors to well blowout occurrence, with probabilities of 1.224×10^{-14} , 5.508×10^{-7} , and 7.65×10^{-8} , respectively.

Conclusion: Improving the performance and reliability of protective layers is recommended as a fundamental strategy to mitigate this threat in oil and gas wells.

Keywords: Oil and gas well blowout; Fault tree analysis; Multi-criteria decision-making.

Please cite this article as: Ghanoati S, Varshousaz K. An integrated FTA–MCDM framework for identifying root causes and prioritizing control factors in oil and gas well blowouts (Case study: South Pars gas field). Journal of Health in the Field 2025; 13(3):58-68. **Doi:** <https://doi.org/10.22037/jhf.v13i3.47508>.

Corresponding Author: Department of Environment Sciences, Ahv. C, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Corresponding Author: Department of Environment Sciences, Ahv. C, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Email: k.varshosaz@iau.ac.ir

Received: 5 February 2025

Accepted: 3 January 2026