ارزیابی ریسک سیلان چاه نفت در تالاب هورالعظیم با روش تجزیه‌وتحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA) و آنالیز درخت خطای فازی (FFTA)

مصطفی ساتیاروند[1*]
کتایون ورشوساز[1*]
ندا اورک[1]
محبوبه چراغی[1]
الهام مبارک حسن[1]

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

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
k.varshosaz@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

این مقاله برگرفته از رساله دکتری می‌باشد.

چکیده

صنعت نفت و گاز با چالش‌های ایمنی متعددی مواجه است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها سیلان چاه نفت است. این پدیده می‌تواند منجر به حوادث ناگوار مانند انفجار، آلودگی‌های محیطزیستی و خسارات مالی گردد. بنابراین، مطالعه حاضر در نظر دارد سیلان چاه نفت در تالاب هور العظیم را با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی (FFTA) و روش تجزیه و تحلیل شکست و آثار آن (FMEA) تحلیل نماید. در این مطالعه، روش تجزیه و تحلیل شکست و آثار آن (FMEA) برای شناسایی خطرات و آنالیز درخت خطای فازی (FFTA) برای بررسی احتمال وقوع سیلان در سال ۱۴۰۲ مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا تیمی از خبرگان تشکیل شد و داده‌های میدانی و مستندات فنی جمع‌آوری گردید. سپس با روش FMEA ریسک‌های مربوطه شناسایی و اولویت‌بندی شد. یافته‌ها نشان داد که احتمال شکست رویداد سیلان برابر با $۲/۵\times۱۰^{-۲}$ بود. نتایج FMEA نشان داد که اکثر ریسک‌های شناسایی شده دارای عدد اولویت ریسک (RPN) بالاتر از ۱۰۰ بودند. نتایج تحلیل درخت خطای فازی نشان داد که فشار پراش منفی و نفوذپذیری کافی سازند از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع سیلان چاه هستند. در این مطالعه رویکرد جامعی بر اساس FMEA و FFTA جهت کاهش عدم قطعیت ارایه شد. نتایج FMEA نشان داد که سیلان و متعاقباً فوران چاه نفت یکی از خطرات غیرقابل قبول در عملیات حفاری است. استفاده از این رویکرد ترکیبی با توجه به شناسایی و تحلیل شکست‌های تک جزء و بررسی تعاملات شکست‌های مختلف امکان شناسایی دقیق‌تر ریسک‌ها و برآورد بهتر احتمال وقوع سیلان را فراهم می‌کند. همچنین با اصلاح و کاهش نرخ نقص‌ها از قبیل خطای اپراتور، فشار پراش منفی و نفوذپذیری کافی سازند احتمال وقوع سیلان کاسته خواهد شد. بنابراین یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای تدوین راهبردهای پیشگیرانه برای کاهش احتمال فوران چاه و افزایش ایمنی عملیات حفاری باشد.

واژگان کلیدی: سیلان، چاه نفت، ارزیابی ریسک، آنالیز درخت خطای فازی (FFTA)، تجزیه و تحلیل شکست و آثار آن (FMEA)، تالاب هورالعظیم

مقدمه

صنعت نفت و گاز یکی از مهم‌ترین صنایع راهبردی در جهان به شمار می‌آید که نقش بسزایی در تأمین انرژی و توسعه اقتصادی کشورها دارد. با این حال، فعالیت‌های حفاری و استخراج نفت و گاز همواره با خطرات و چالش‌های متعددی همراه بوده است. اکتشاف و توسعه صنایع نفت و گاز همواره با ریسک‌های متعددی از قبیل تلفات نیروی انسانی، آلودگی‌های محیطزیستی و از بین رفتن تجهیزات و منابع همراه می‌باشد. فوران چاه می‌تواند به پیامدهای جبران‌ناپذیری از قبیل انفجار، تلفات شدید انسانی و فجایع محیطزیستی منجر گردد (Ataallahi and Shadizadeh, 2015; Tamim *et al*., 2017). یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین حوادث صنعت حفاری، فوران چاه نفت می‌باشد که می‌تواند باعث صدمه به تعداد زیادی از شاغلین، آتش‌سوزی و انفجارهای بزرگ، سرریز شدن میلیون‌ها بشکه نفت به

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

محیط اطراف و ایجاد فجایع محیط‌زیستی شود (Chen and *et al*., 2021). فوران جزء حوادث نادر و بحرانی است که اغلب خسارات سنگینی به همراه داشته و به سختی قابل‌کنترل می‌باشد (Tamim *et al*., 2017).

در واقع چاه وقتی فوران می‌کند که فشار طبقات زیادتر از فشار هیدرو استاتیکی گل حفاری است. در این حالت باعث می‌شود آب، گاز و نفت بین طبقات با فشار زیاد به داخل چاه فوران کند و باعث آسیب به چاه گردد. این اتفاق خطرناک‌ترین حادثه حفاری است. فوران چاه را با علائم افزایش غیرقابل انتظار گل حفاری در سطح مخزن و سرعت بیش از حد رشته لوله حفاری موقع برگشت به سطح زمین می‌توان تشخیص داد. برای جلوگیری از این حادثه باید با افزایش چگالی گل حفاری، فشار هیدروستاتیکی آن را تا حدی افزایش داد تا بر فشار طبقات غالب شود و مانع فوران شدید آب، گاز و نفت به داخل چاه شود (Abimbola *et al*., 2015; Abimbola *et al.,* 2014) . بر اساس تجربیات از هر ۱۱۰ سیلان یک مورد آن منجر به فوران می‌شود.

در صورتی‌که سیلان به موقع شناسایی و به درستی کنترل نگردد، پدیده فوران چاه دور از ذهن نیست. به همین دلیل کنترل سیلان نقش حیاتی در پیشگیری از فوران دارد (Chung *et al*., 2016). بنابراین شناسایی، تحلیل و ارزیابی ریسک این پدیده امری ضروری است که می‌تواند به کاهش پیامدهای نامطلوب و افزایش ایمنی عملیات حفاری منجر شود.

ارزیابی ریسک در حوزه مهندسی نفت از روش‌های مختلفی بهره می‌برد که شامل مدل‌های احتمالاتی، روش‌های شبیه‌سازی و تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌شود (Laal *et al*., 2023; Laal *et al*., 2024; Pouyakian *et al*., 2021). با این حال، یکی از روش‌های پرکاربرد برای شناسایی و تحلیل علل احتمالی یک حادثه، روش آنالیز درخت خطا (FTA) است (Laal *et al*., 2023). این روش یک رویکرد سیستماتیک و منطقی برای بررسی وقایع نامطلوب بوده و امکان تعیین مسیرهای مختلفی که ممکن است به وقوع حادثه منجر شوند را فراهم می‌کند. با این وجود، یکی از محدودیت‌های روش سنتی درخت خطا، نیاز آن به داده‌های دقیق و قطعی برای محاسبه احتمالات رویدادهای پایه است که در بسیاری از موارد، داده‌های دقیق در دسترس نیستند یا دارای عدم‌قطعیت می‌باشند (Laal *et al*., 2023). برای غلبه بر این چالش، ترکیب روش درخت خطا با منطق فازی پیشنهاد شده است (Laal *et al* ., 2023). درخت خطای فازی (FFTA) این امکان را فراهم می‌کند که عدم‌قطعیت‌های موجود در داده‌های ورودی مدیریت شوند و ارزیابی دقیق‌تری از احتمال وقوع رویدادهای مختلف ارایه گردد (Hanifi *et al*., 2024; Laal *et al*., 2023). استفاده از مجموعه‌های فازی باعث می‌شود که داده‌های زبانی و کیفی که معمولاً توسط متخصصان و کارشناسان ارایه می‌شوند، در فرآیند تحلیل گنجانده شده و ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از ریسک حاصل شود (Hanifi *et al*., 2024). در کنار روش درخت خطا، روش تحلیل حالات و اثرات شکست (FMEA) نیز به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم برای شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های تجهیزات و فرآیندهای عملیاتی استفاده می‌شود (Fallah *et al*., 2020). گرگین پور و امینی نسب در سال ۱۳۹۹ در مطالعه‌ای با هدف شناسایی و ارزیابی ریسک دکل حفاری صرفاً از روش FMEA جهت شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها استفاده نمودند (Gorginpoor and AminiNasab, 1399). یکی از مهمترین قابلیت‌های روش FMEA شناسایی نقص‌های تک ویژگی یا شکست‌های تک جز است (Fallah *et al*., 2020). شکست‌های تک جز، می‌توانند به تنهایی منجر به ایجاد یک حادثه گردند. در این مطالعه به‌منظور بررسی تعامل این نقص‌ها، بررسی رویدادهای بحرانی و محاسبه احتمالات از رویکرد FTA استفاده می‌گردد زیرا روش FMEA نمی‌تواند در این زمینه تحلیل مناسبی ارایه نماید. همچنین برای کاهش عدم قطعیت در نتایج برآورد احتمالات در این مطالعه از منطق فازی استفاده گردید. بنابراین مطالعه حاضر در نظر دارد تا ابتدا ریسک‌های موجود در حفاری چاه نفت را با روش FMEA شناسایی کرده و سپس با استفاده از درخت خطای فازی تحلیل فوران را انجام دهد.

در مطالعات مختلف از رویکردهای متعددی برای تحلیل ریسک‌ها استفاده شده است. Liu و همکاران در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی ریسک کمی پویا برای کنترل حفاری چاه انجام دادند. در این مطالعه تأثیر عوامل انسانی، مکانیکی و محیطی بر ریسک کنترل چاه حفاری مورد بررسی قرار گرفت (Liu et *al*., 2022). میرزایی علی آبادی و همکاران (۱۳۹۷) نیز تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری را با استفاده از روش بوتای انجام دادند (علی آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). بهوندی و همکاران، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی دکل‌های حفاری را با روش HAZAN انجام دادند و ریسک‌های زیست‌محیطی را بر اساس دو فاکتور احتمال و

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

شدت امتیازبندی کردند (بهوندی و همکاران، ۱۳۹۶). جوزی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی ریسک محیطزیستی تجهیزات فوران‌گیر چاه‌های گازی به روش تجزیه و تحلیل درخت خطا به محاسبه بروز فوران و همچنین بروز احتمال شکست در لایه‌های حفاظتی پرداختند (مسعود و همکاران، ۱۳۹۵). گرگین پور و همکاران در سال ۱۳۹۹ در مطالعه خود با عنوان شناسایی و ارزیابی ریسک دکل حفاری (چاه‌های نفت منطقه پایدار) از روش FMEA استفاده نمودند (گرگین پور و امینی نسب، ۱۳۹۹). قاسمی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه‌ای شناسایی و ارزیابی ریسک‌های شغلی دکل حفاری با استفاده از روش JSA (مطالعه موردی چاه‌های نفت منطقه دهلران) را مورد بررسی قرار دادند (قاسمی و امینی نسب، ۱۳۹۹). با توجه به مطالعات در دسترس تاکنون مطالعات اندکی در این زمینه انجام گرفته است. لذا مطالعه حاضر در نظر دارد با استفاده از این رویکرد ترکیبی FMEA، FTA و منطق فازی علاوه بر بررسی دقیق‌تر تعاملات رویدادها، عدم قطعیت موجود در ارزیابی ریسک را نیز کاهش دهد.

مواد و روش‌ها

مطالعه توصیفی، تحلیلی حاضر از دو گام اصلی تشکیل شده است. در واقع پس از انجام هاهنگی‌های لازم و تشکیل تیمی از خبرگان ابتدا تحلیل FMEA انجام شد و سپس احتمال فوران با درخت خطای فازی مورد بررسی قرار گرفت. FMEA یک تکنیک مهندسی به منظور مشخص نمودن و حذف خطاها، مشکلات و اشتباهات بالقوه موجود سیستم، فرایند تولید و ارایه خدمات، قبل از وقوع بوده که این روش می‌کوشد تا حد ممکن خطرات بالقوه موجود در محدوده‌ای که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌گیرد و نیز علل و اثرات مرتبط با آن خطرات را شناسایی و اولویت‌بندی نماید (Fallah *et al*., 2020). جهت اجرای FMEA، ابتدا تیمی ۵ نفره متشکل از متخصصین فرآیند، سیویل، ابزار دقیق، کارشناسان ایمنی، بهداشت و محیطزیست در محل اجرای مطالعه تشکیل شد. سپس نقشه‌های عملیاتی شامل P&ID و PFD، چیدمان، خواص فیزیکی و شیمیایی، سمیت، اشتعال‌زایی و دیگر خصوصیات مواد مورد تحلیل قرار گرفت و پس از انجام بازدیدهای میدانی اطلاعات لازم در محل تحلیل و بررسی گردید و علل و حالات شکست و پیامدهای احتمالی با استفاده از بارش افکار تحلیل شد. همچنین حوادث و علل احتمالی آن در تحقیقات و صنایع مشابه نیز مورد بررسی قرار گرفت.

الف. روش FMEA

روش FMEA اتکا بر سه پارامتر شدت (S) ، احتمال وقوع (O) و احتمال کشف (D) شکست‌ها دارد که با توجه به جداول استاندارد مربوطه شامل اعدادی از ۱ تا ۱۰ است (Fallah *et al*., 2020). از تعامل و ضرب سه پارامتر فوق عدد اولویت ریسک به دست آمد. تکنیک بارش افکار و نظر تیم خبرگان در این تحلیل‌ها موثر بود. بنابراین در این مرحله پس از تکمیل کاربرگ FMEA مقادیر مربوطه با توجه به نظر اکثریت تیم منظور گردید. RPN مربوطه در بهترین حالت عدد ۱ و در بدترین شرایط عدد ۱۰۰۰ را به خودش اختصاص می‌دهد و با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد. در این مطالعه سطح اطمینان ۹۰ درصد برای RPN ها در نظر گرفته شد. بنابراین برای ریسک‌های بالاتر از ۱۰۰ باید مداخله ایمنی انجام گردد.

$$RPN = \text{احتمال کشف} \times \text{احتمال وقوع} \times \text{شدت اثر} \quad (۱)$$

ب. روش تحلیل درخت خطای فازی (FFTA)

در گام بعدی احتمال وقوع فوران چاه نفت با روش آنالیز درخت خطای فازی مورد تحلیل قرار گرفت. روش FTA یکی از تکنیک‌های شناخته شده برای تحلیل علل ریشه‌ای وقوع حوادث پیچیده مانند فوران چاه است.

این روش با مدل‌سازی منطقی رویدادهای مختلف، روابط علت و معلولی بین آن‌ها را مشخص کرده و احتمال وقوع حادثه را بر اساس داده‌های آماری محاسبه می‌کند (Pouyakian *et al*., 2023). با این حال، در بسیاری از موارد، اطلاعات مربوط به خرابی تجهیزات، عملکرد انسانی و شرایط محیطی به‌صورت کیفی و غیرقطعی است. بنابراین در این مطالعه از منطق فازی استفاده شد. درخت خطای فازی امکان در نظر گرفتن داده‌های زبانی و غیردقیق را فراهم کرده و احتمال وقوع رویدادهای خطرناک را با دقت بیشتری برآورد می‌کند. دراین

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

مطالعه تیم کارشناسان با تخصص‌های مختلف تشکیل شد تا در مورد ساختار درخت خطا و احتمالات مربوط به رویدادهای پایه، اظهار نظر کنند. در مطالعات متعددی که بر مبنای فازی پایه‌ریزی می‌شوند تعداد خبرگان از ۳ نفر تا چندین نفر گزارش شده است که در این مطالعه از ۵ خبره به‌صورت ناهمگون استفاده شد زیرا تخصص‌های مختلف می‌تواند بینش و درک متفاوتی نسبت به ریسک‌ها داشته باشند (Ishikawa *et al*., 1993; Jafari *et al*., 2022; Pouyakian *et al*., 2021). Ishikawa و همکاران سه متخصص را جهت تحلیل فازی انتخاب کردند (Ishikawa *et al*., 1993). در سایر مطالعات نیز تعداد خبره ها بیش از ۳ نفر گزارش شده است (Laal *et al*., 2023; Laal *et al*., 2024; Pouyakian *et al*., 2021). همچنین به دلیل اینکه افراد خبره دارای سطح متفاوتی از تخصص، سابقه و تجربه کاری هستند لذا، یک فاکتور وزنی، در نظر گرفته شد (Omidvari *et al* ., 2014; Yazdi *et al*., 2017). در این مطالعه به دلیل این‌که عبارات کلامی زیاد ممکن است باعث سردرگمی خبره در جواب دادن به سؤالات گردد، از عبارات کلامی ۵ تایی استفاده شد.

جدول۱. عبارات کلامی و اعداد فازی ذوزنقه ای

عبارات کلامی	اعداد فازی ذوزنقه‌ای			
خیلی کم	۰/۲	۰/۱	۰	۰
کم	۰/۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱
متوسط	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۳
زیاد	۰/۹	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶
خیلی زیاد	۱	۱	۰/۹	۰/۸

سپس با استفاده از فرمول‌های زیر ارزیابی وزنی خبرگان، مرحله فازی‌سازی (اعداد فازی ذوزنقه‌ای در جدول ۱) و ارزیابی ذهنی خبرگان، اجماع نظرات، دیفازی کردن و تبدیل اعداد امکانی به احتمال وقوع نقص استفاده شد (Pouyakian *et al*., 2023) که در ادامه مراحل تشریح می‌گردد. بنابراین، پس از بدست آمدن اعداد فازی مربوطه برای هر ترم زبانی، لازم است تا نظرات خبرگان با توجه به رویدادهای پایه شناسایی شده در قالب یک نظر مجتمع گردد (رابطه ۲).

$$M_i = \sum_{i=1}^{m} W_j A_{ij}, j = 1,2,\dots,n \qquad (۲)$$

در اینجا M_i عدد فازی اجماع یافته برای رویدادهای پایه، wj بیانگر وزن خبره j، A_{ij} نیز مربوط به اعداد فازی رویداد پایه i با توجه به خبره j.

مقادیر حاصله از مرحله اجماع نظرات باید تبدیل به یک عدد قطعی گردد. به منظور دیفازی کردن در این مطالعه از رابطه ۳ استفاده شد.

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x)\, x dx}{\int \mu_i(x)} \qquad (۳)$$

همچنین رابطه بالا به صورت زیر (رابطه ۴) نیز برای دیفازی کردن یک عدد فازی ذوزنقه ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تبدیل نتایج گام قبلی به احتمال وقوع نقص (FP) نیز از رابطه Onisawa استفاده شد (روابط ۵ و ۶). با استفاده از این رابطه خروجی به صورت احتمال در می‌آید.

$$\mu_{\sim A}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, a_1 \le x \le a_2 \\ 1, a_2 \le x \le a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3}, a_3 \le x \le a_4 \\ 0, x > a_4 \end{cases} \quad X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} \qquad (۴)$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{(a_4+a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4+a_3-a_1-a_2)}$$

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K}, FPS \neq 0 \\ 0, FPS = 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

$$K = \left[\left(\frac{1-FPS}{FPS}\right)^{1/3}\right] \times 2.301 \qquad (۶)$$

K در این رابطه یک متغیر حد واسط است که فقط تابع FPS می‌باشد. FPS نیز نتیجه حاصل از گام قبلی یعنی دیفازی کردن یـا قطعـی-سازی امکان وقوع نقص است. همچنین احتمال وقوع رویدادهای میانی واصلی با استفاده از روابط ۷ و ۸ با توجـه بـه نـوع دروازه مربوطـه (دروازه AND و OR) تخمین زده می‌شود که با توجه به اصول جبر بولی به دست می‌آیند (Laal *et al*., 2023).Pi احتمال وقوع رویـداد پایه در ساختار درخت خطا است.

$$P_{OR} = 1 - \Pi_{i=1}^{n}(1 - P_i) \qquad (۷)$$

$$P_{AND} = \Pi_{i=1}^{n} P_i \qquad (۸)$$

نتایج

با توجه به روش کار، در این مرحله مطابق جداول ۲ و ۳ ارزیابی ریسک به روش FMEA در فرآیند حفاری انجام شد و مطابق نتایج عدد اولویت ریسک متفاوتی نسبت به مراحل و فرایندهای مختلف در نظر گرفته شد. از نتایج FMEA و بررسی متون جامع انجام شده جهت بررسی انحرافات و شناسایی رویدادهای پایه در مرحله بعدی استفاده شد. نتایج FMEA نشان داد که غالب حالات شکست به پیامد سیلان منتهی می‌شود که در اثر فرآیندهایی از قبیل حفاری و لوله بالا اتفاق می‌افتد. همچنین اکثر ریسک‌ها RPN بالاتر از ۱۰۰ داشتند که با توجه به سطح اطمینان مطالعه غیرقابل قبول بوده و در زمره ریسک‌های ایمنی و بهداشتی و محیط زیستی با شدت بالا قرار گرفتند (جداول ۲ و ۳).

جدول ۲. شناسایی و ارزیابی ریسک‌های ایمنی و بهداشتی

نام فرایند: حفاری وضعیت: شناسایی و ارزیابی خطرات ایمنی و بهداشت تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۲

نام فعالیت	خطر: غیرعادی	خطر: اضطراری	خطر: عادی	علت	پیامد	کنترل‌های جاری	احتمال وقوع	احتمال کشف	شدت پیامد	امتیاز (RPN)	نتیجه: غیرقابل‌قبول	نتیجه: متوسط	نتیجه: قابل‌قبول
لوله بالا			v	عدم وزن مناسب گل خطای تجهیزات طراحی نامناسب وزن گل	فوران	آموزش‌های تخصصی کالیبراسیون تجهیزات	۶	۷	۱۰	۳۲۰	v		
حفاری			v	ترکیبات نامناسب گل سازندهای پرفشار	فوران	مطالعات زمین‌شناسی	۸	۵	۱۰	۴۰۰	v		
لوله بالا			v	سرعت زیاد حفاری	فوران	آموزش‌های تخصصی توجه به پارامترهای حفاری	۵	۶	۸	۲۴۰	v		
لوله پایین			v	سرعت کم حفاری	فوران	آموزش‌های تخصصی توجه به پارامترهای سیال حفاری	۶	۵	۹	۲۷۰	v		
حفاری			v	خطای انسانی	فوران	آموزش‌های تخصصی انتخاب نفرات ذی‌صلاح	۵	۵	۸	۲۰۰	v		
حفاری			v	نقص پمپ گل	فوران	تعمیر و نگهداری پیگیرانه نظارت محیطی	۵	۵	۱۰	۲۵۰	v		
حفاری			v	نقص تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای حفاری	فوران	تعمیر و نگهداری پیشگیرانه	۵	۵	۱۰	۲۵۰	v		

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

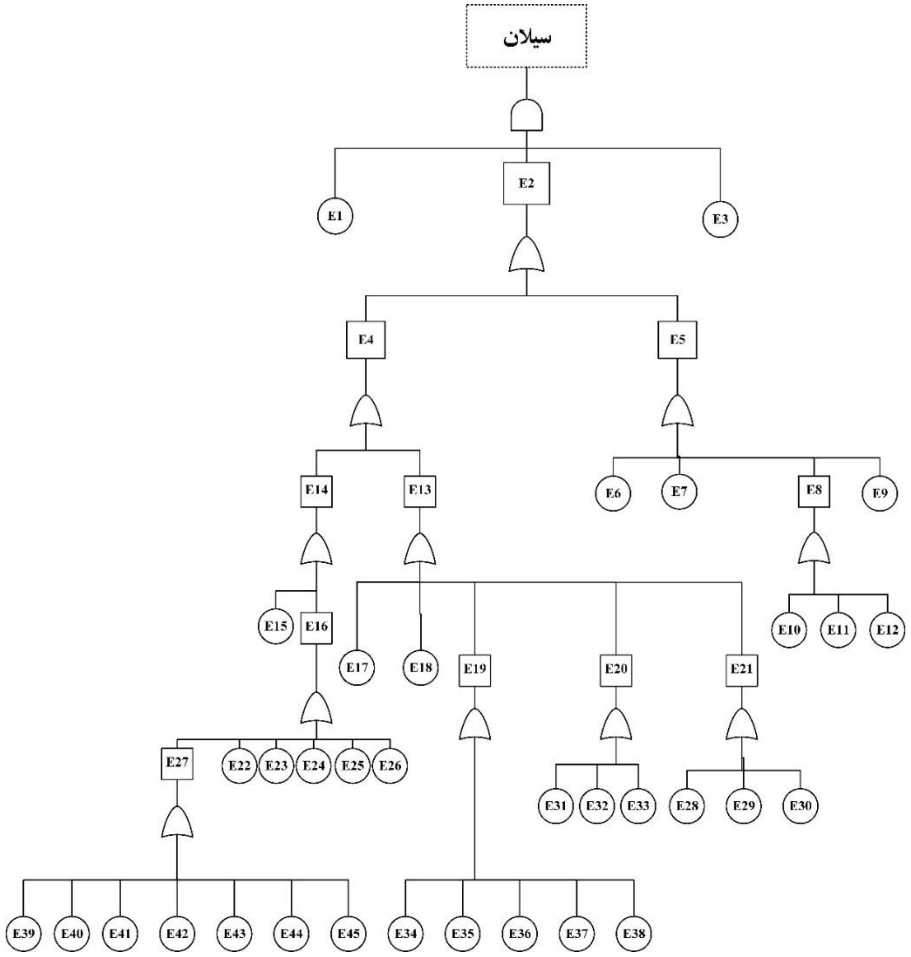
جدول ۳: شناسایی و ارزیابی جنبه و پیامدهای زیست محیطی

نام فرایند: حفاری وضعیت: شناسایی و ارزیابی جنبه و پیامدهای زیست محیطی تاریخ ارزیابی:۱۴۰۲

نام فعالیت	خطر: عادی	خطر: غیرعادی	خطر: اضطراری	علت	پیامد	کنترل‌های جاری	احتمال وقوع	احتمال کشف	شدت پیامد	امتیاز (RPN)	نتیجه: غیرقابل‌قبول	نتیجه: متوسط	نتیجه: قابل‌قبول
لوله بالا	v		سیلان	پایش نادرست پیمایش لوله‌ها	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور	۵	۵	۷	۱۷۵	v		
حفاری	v		سیلان	هرزروی گل	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور توجه به پارامترهای سیال حفاری	۸	۶	۹	۴۳۲	v		
حفاری	v		سیلان	ماسه حاوی گاز در عمق	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور توجه به پارامترهای سیال حفاری	۵	۴	۷	۱۴۰	v		
حفاری	v		سیلان	برخورد با چاه‌های مجاور	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور توجه به پارامترهای سیال حفاری	۳	۵	۵	۷۵			v
حفاری	v		سیلان	کاهش وزن گل در اثر ورود گاز سازند	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور توجه به پارامترهای سیال حفاری	۶	۶	۸	۲۸۸	v		
حفاری	v		سیلان	کاهش وزن گل در اثر ورود آب و نفت	فوران	آموزش‌های تخصصی به اپراتور توجه به پارامترهای سیال حفاری افزایش وزن گل	۶	۵	۷	۲۱۰	v		

در این مطالعه درخت خطای سیلان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مطابق نتایج، فوران از مهم‌ترین پیامدهای فاجعه‌بار در نتیجه سیلان بود. برای تعیین احتمالات رویدادهای پایه در این مطالعه از نظرات خبرگان و منطق فازی استفاده شد. شکل ۱ درخت خطای فازی سیلان را نشان می‌دهد. ۴۵ رویداد مختلف شامل رویدادهای میانی و پایه در وقوع سیلان مطابق شکل ۱ و جدول ۴ شناسایی شد. سپس احتمالات رویدادهای مختلف محاسبه گردید. برای مثال، محاسبات مربوط به رویداد لوله بالا با سرعت زیاد مطابق روش کار تشریح شد. ابتدا نظرات خبرگان با عبارات کلامی جدول ۱ اخذ گردید. سپس اعداد فازی ذوزنقه‌ای متناظر با هر عبارت کلامی جهت اجماع نظرات ارایه شد. پس از دریافت نظرات خبرگان اعداد فازی مربوطه در قالب اجماع نظرات خبرگان (۰/۸۶۴، ۰/۶۸۲۵، ۰/۶۹، ۰/۵۲۸) مجتمع گردید. در مرحله بعد دیفازی انجام شد (۰/۶۹۲۸۲) و سپس با استفاده از رابطه ۵ و ۶ مقدار k یا متغیر حد واسط (۱/۷۵۴۵۷۲) و FP (۰/۰۱۷۵۹۷) به دست آمد. بر این اساس سایر احتمالات رویدادهای پایه و میانی محاسبه شد که نتایج ان در جدول ۴ آمده است.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]



شکل ۱. درخت خطای سیلان

جدول ۴. احتمال وقوع رویدادهای پایه و میانی سیلان با منطق فازی

رویداد	توصیف	احتمال	رویداد	توصیف	احتمال
E1	تشکیل هیدروکربن کارآمد	۰/۰۰۵۵	E24	تلفات حلقوی	۰/۰۰۵۵
E2	فشار پراش منفی	۰/۲۵۱۸	E25	سیمان‌کاری بد	۰/۰۰۵۵۰۵
E3	نفوذپذیری کافی	۰/۰۲۹۲۹۶	E26	شکست کیسینگ	۰/۰۰۵۵۰۵
E4	فشار هیدرواستاتیک پایین	۰/۰۰۰۳۹	E27	اثر پیستون موج‌دار	۰/۰۲۹
E5	افت فشار حلقوی (APL) کم و ازدست‌رفته	E-02۲/۴۹	E28	خرابی در سانتریفیوژ	۰/۰۰۰۳۸۸
E6	شکست خط سطحی	۰/۰۰۴۲۹۳	E29	شکست در گاززدایی	۰/۰۰۱۵۵
E7	قطع برق	۰/۰۰۵۵۰۵	E30	تجهیزات گل پاک‌کن در تنظیم	۰/۰۰۰۶۹۹
E8	خرابی پمپ	۰/۰۱۰۸	E31	قطع برق	۰/۰۰۵۵۰۵
E9	عدم توجه اپراتور به تنظیم	۰/۰۰۴۴۹۳	E32	خرابی همزن یا میکسر	۰/۰۰۰۱۸۸
E10	خرابی کنترل پمپ	۰/۰۰۵۵۰۵	E33	ته‌نشینی ماده با وزن گل	۰/۰۰۶۱۵۶
E11	نشتی از سمت سیال پمپ	۰/۰۰۳۳۴	E34	کشیدن لوله با سرعت زیاد	۰/۰۱۷۵۹۷
E12	دمیدن	۰/۰۰۱۹۳۳	E35	استفاده از گل با ویسکوزیته بالا و استحکام ژل بالا	۰/۰۰۹۰۴۲
E13	کاهش تراکم	۰/۱۶۲۶	E36	کمی توپ زدن	۰/۰۱۶۶۱۲
E14	کاهش حجم	۰/۰۰۲۴	E37	داشتن کیک دیواری ضخیم	۰/۰۰۸۵۱۳
E15	سوراخ ناکافی پرشده است	۰/۰۴۴۵۹۳	E38	داشتن فاصله کمی بین رشته و سوراخ	۰/۰۱۲۷۵۶
E16	گل از دست رفت	۰/۰۵۶	E39	دارای رشته مته و وصل شده	۰/۰۰۱۰۳

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

E17	گل بریده گاز	۰/۰۳۹۵	E40	دویدن داخل منفذ به‌صورت خیلی سریع	۰/۰۰۴۹۶۱
E18	اندازه فشار غیرطبیعی	۰/۰۴۴۵۹۳	E41	استفاده از گل با ویسکوزیته بالا و استحکام ژل بالا	۰/۰۰۶۷۶۳
E19	سواب زدن در حین زمین خوردن	۰/۰۶۳	E42	توپ زدن	۰/۰۰۵۵۰۵
E20	کاهش وزن گل	۰۹E-۶/۳۷	E43	داشتن کیک دیواری ضخیم	۰/۰۰۰۴۷۱
E21	نقص در تجهیزات تصفیه گل	۰/۰۲۶۲	E44	داشتن فاصله کمی بین رشته و سوراخ	۰/۰۰۹۰۹۵
E22	شکل‌گیری	۰/۰۰۵۵۶	E45	با استفاده از شیر شناور / شیر اطمینان بدون بازگشت	۰/۰۰۱۹۳۳
E23	افزایش وزن گل (MW)	۰/۰۰۵۸۹۷			

مطابق نتایج در واقعه سیلان بیشترین احتمالات مربوط به رویداد میانی فشار پراش منفی و نفوذپذیری کافی، می‌باشد. با تمرکز بر روش مطالعه، بهره‌گیری از منطق فازی، قواعد جبر بولین و نوع گیت ورودی احتمال شکست رویداد اصلی یا سیلان برابر با $۲/۵۳\times۱۰^{-۲}$ آمد. همچنین نرخ نقص خطای اپراتور در عملیات کشیدن لوله با سرعت به سمت بالا (خطای اپراتور در وقوع سیلان) تأثیر مهمی در رویداد نهایی داشت.

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی و تحلیل احتمالات ناشی از سیلان چاه نفت با بهره‌گیری از تکنیک‌های FMEA و FFTA انجام شد. تحلیل FMEA نشان داد که اکثر ریسک‌ها با توجه به سطح اطمینان مطالعه غیرقابل قبول بوده و مهم‌ترین پیامد احتمالی نیز فوران بود. بر این اساس احتمال شکست سیلان $۲/۵۳\times۱۰^{-۲}$ به‌دست آمد. یکی از مهم‌ترین مراحل در ارزیابی و مدیریت ریسک صنایع فرآیندی، شناسایی مخاطرات احتمالی در این صنایع است که روزبه‌روز با توجه به پیشرفت صنایع و تکنولوژی بر اهمیت آن افزوده‌شده و حجم فعالیت‌های مربوط به آن افزایش می‌یابد، بنابراین اگر مخاطرات به درستی شناسایی نگردند، مقدمات لازم برای ارزیابی ریسکی مناسب فراهم نخواهد شد. یکی از راهکارهای شناسایی بهتر خطرات مرور حوادث و شبه حوادث گذشته است. در این مطالعه جهت شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های مختلف ایمنی و بهداشتی علاوه بر بررسی مطالعات گذشته، از روش FMEA نیز استفاده شد. FMEA یک روش شناسایی و ارزیابی ریسک معتبر و پرکاربرد است که برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی خطرات در صنایع مختلف و در تعامل با خیلی از رویکردهای دیگر از آن استفاده می‌شود (Ceylan *et al*., 2023; Fallah *et al*., 2018; Testik and Unlu, 2023)؛ بنابراین می‌توان گفت در ارزیابی ریسک‌های ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی معتبر بوده و دارای روایی بالایی می‌باشد. از جمله موارد کاربرد این روش، در مطالعات معتبر می‌توان به Radsa و همکاران (۲۰۲۴) و Zhe Kan و همکاران (۲۰۲۴) در صنایع فرآیندی اشاره کرد. Radsa در مطالعه‌ای نشان داد که ۸۰ درصد ریسک‌های محیط زیستی دارای سطح ریسک خیلی بالایی بوده‌اند. بر مبنای نتایج به‌دست آمده فوران چاه بالاترین عدد ریسک را به خود اختصاص داد (Radsa *et al*., 2024)؛ بنابراین در مطالعه حاضر نیز به دلیل اعتبار بالای آن، جهت تجزیه و تحلیل و شناسایی بهتر مخاطرات از FMEA استفاده شد.

نتایج مطالعه حاضر در فازهای اولیه نشان داد که بیشتر حالت‌های شکست به سیلان منتهی می‌شود که بیشتر در اثر فرآیندهایی از قبیل حفاری و بالا کشیدن لوله اتفاق می‌افتد. همچنین اکثر ریسک‌ها RPN بالاتر از ۱۰۰ داشتند که با توجه به سطح اطمینان مطالعه غیرقابل قبول بوده و در زمره ریسک‌های ایمنی و بهداشتی نیازمند مداخله قرار گرفتند. در مطالعات مختلف از روش‌های متنوعی در این زمینه استفاده شده است. مثلاً برخی از مطالعات جهت شناسایی رویدادها و انحرافات فرایندی از روش‌های Hazop فرآیندی و انسانی نیز استفاده کرده‌اند (Laal *et al*., 2023; Lilli *et al*., 2024; Pouyakian *et al*., 2021). بنابراین بر اساس مطالعات برای شناسایی انحرافات فرآیندی، انسانی و سازمانی و شکست‌های سیستمی می‌توان از روش‌هایی از قبیل Hazop و FMEA استفاده کرد (Fallah *et al*., 2018; Fallah *et al*., 2020) و از نتایج این قسمت برای علل احتمالی انحرافات، پیامدهای ممکن، سیستم‌های ایمنی موجود درروش پاپیونی استفاده کرد. بنابراین استفاده از روش‌هایی از قبیل FMEA و HAZOP گامی در جهت شناسایی و اولویت‌بندی بهتر علل احتمالی و پیامدهای ممکن خواهد بود. در مطالعه Liu و همکاران نتایج نشان داد که عوامل محیطی بیشترین تأثیر را بر ریسک

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

کنترل کل چاه حفاری در سازند داشتند. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پارامترها انجام شد و مشخص شد که تنش‌های درجا بیشترین تأثیر را بر روی فروپاشی و شکست دارند (Liu *et al*., 2022). در مطالعه بهوندی و همکاران، ۲۲ درصد از ریسک‌های شناسایی شده دارای رتبه ۴ که نشان دهنده سطح قابل قبول ریسک می‌باشد، بود. همچنین ۵۰ درصد ریسک‌ها دارای رتبه ۳ و سطح قابل قبول به شرط کنترل شدن، ۱۸ درصد ریسک‌ها دارای رتبه ۲ و سطح نامطلوب و ۱۰ درصد ریسک‌ها نیز دارای سطح غیر قابل قبول بود (بهوندی وهمکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه گرگین پور و همکاران نیز نتایج FMEA نشان داد که بالاترین مقدار ریسک، مربوط به Hopper با RPN ۲۹۴ و پایین‌ترین خطر، سقوط با RPN برابر با ۷۲ بود (گرگین پور و امینی نسب، ۱۳۹۹).

روش FMEA می‌تواند نقص‌ها یا شکست‌های تک جز را به خوبی شناسایی نماید (Fallah *et al*., 2020)، ولی جهت بررسی تعامل این نقص‌ها و محاسبه احتمال با هدف کاهش عدم قطعیت باید از سایر رویکردها مانند شبکه بیزین، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی و ... استفاده کرد (Huang *et al*., 2021; Laal *et al*., 2023; Laal *et al*., 2024; Laal *et al*., 2023; Mitrakas *et al*., 2025) که در این مطالعه از منطق فازی استفاده شد. در واقع عدم وجود بانک داده‌ای برای شکست‌های مختلف و تفاوت‌های متعدد باعث عدم قطعیت می‌شود (Jabbari *et al*., 2022; Laal *et al*., 2023). بنابراین به‌کارگیری منطق فازی در محاسبه نرخ شکست سیلان می‌تواند به کاهش عدم قطعیت کمک نماید (Pouyakian *et al*., 2021). بنابراین در این مطالعه از داده‌های کیفی و منطق فازی برای ارزیابی کمی مولفه‌های ریسک استفاده شد. با توجه به اینکه در مورد بسیاری از تجهیزات نرخ نقایصی وجود ندارد و درصورت وجود، نیز به دلیل تفاوت‌های متعدد (مثلاً در مورد خطاهای انسانی و مدیریتی: تفاوت‌های فرهنگی و اجتماعی و در مورد خطاهای فنی: جنس تجهیز و خصوصیات متفاوت آن) همواره با عدم قطعیت روبه‌رو هستیم که در مطالعه حاضر همانند بسیاری از مطالعات مشابه (Ericson, 2015; Hosseini *et al*., 2020) از منطق فازی جهت کاهش عدم قطعیت استفاده شد.

در مطالعه Konstandinidou و همکاران (۲۰۰۶) از منطق فازی و روش CREAM جهت تحلیل قابلیت اطمینان انسانی استفاده شد (Konstandinidou *et al*., 2006). Zhou و همکاران (۲۰۱۸) نیز از این روش برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان استفاده کردند. در مطالعه Feng و همکاران (۲۰۲۰) که با هدف ارزیابی شکست خطوط لوله گاز انجام شد نیز توصیه گردید که می‌توان از نظرات خبرگان یا اطلاعات گذشته و پایگاه‌های داده برای این منظور استفاده کرد. علی‌آبادی و همکاران در مطالعه‌ای تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای فوران چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری را انجام دادند. سیلان به عنوان رویداد اصلی شناسایی شد و با استفاده از تکنیک بوتای و شبکه بیزین احتمال وقوع پیامدهای فوران نیز مورد بررسی قرار گرفت (Mirzaie Aliabadi and Mohammadfam, 2018). Shafiee و همکاران در مطالعه‌ای جهت ارزیابی ریسک تجهیزات پیشگیری‌کننده فوران زیر آب از مدل ترکیبی FMEA و FTA استفاده نمودند (Shafiee *et al*., 2019). برای تعیین نرخ نقص رویدادهای پایه، پایگاه‌های داده و مطالعات مختلف مانند OREDA (Handbook, 2002)، CCPS ((CCPS). 1989)، Lee (FP, 1996)، اطلاعاتی را ارایه کرده‌اند که متناسب با جنس تجهیزات و فرهنگ‌های مختلف متفاوت خواهد بود و همچنین ممکن است این داده‌ها به روز نباشند و بنابراین از عدم قطعیت بالایی برخوردارند. لیست جامعی از این نوع عدم قطعیت‌ها در ایمنی فرآیند در مطالعه Markowski و همکاران (۲۰۱۰) اشاره شده است. در واقع در مطالعه حاضر سعی گردید یکی از منابع اصلی عدم‌قطعیت در FTA یعنی تعیین میزان خرابی تجهیزات و خطاهای انسانی به حداقل برسد. رویدادهای بحرانی مطالعه مطابق FTA ترسیم شده و محاسبه احتمالات و نقش گیت ورودی مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس در سناریوی اصلی سیلان، بیشترین احتمالات مربوط به رویداد میانی E2 (فشار پراش منفی) و E3 (نفوذپذیری کافی) است. با بررسی مسیرهای بحرانی و میزان تأثیر رویدادهای اولیه و میانی در ایجاد رویداد نهایی سیلان می‌توان نتیجه گرفت نرخ نقص خطای اپراتور در عملیات کشیدن لوله با سرعت به سمت بالا (خطای اپراتور در وقوع سیلان) تأثیر مهمی در رویداد نهایی دارد و با اصلاحات و کاهش نرخ نقص آن‌ها، احتمال وقوع سیلان کاسته می‌شود. در مطالعه‌ای که به وسیله Liu و همکاران انجام شد تغییر خاصیت گل به عنوان یکی از علل وقوع نقص در شناسایی سیلان گزارش گردید (Liu *et al*., 2022). بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که در عملیات حفاری، نظارت دقیق‌تری بر پارامترهای حفاری انجام شود، آموزش‌های لازم به پرسنل ارایه گردد و تجهیزات کنترل چاه به‌روز شوند. بنابراین نتایج حاصل

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

از FTA امکان اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی را برای به حداقل رساندن احتمال شکست فراهم می‌آورد. همچنین، بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی و تحلیل‌های کمی می‌تواند به پیش‌بینی و مدیریت ریسک‌های حفاری کمک کند. نتایج FMEA در این مطالعه نشان داد که سیلان و متعاقباً فوران چاه نفت یکی از پارامترهای جدی در عملیات حفاری است که نیازمند شناسایی دقیق و ارزیابی جامع ریسک می‌باشد. با توجه به قابلیت های FMEA در تحلیل شکست‌های تک جز و FTA در بررسی تعاملات شکست‌های مختلف، استفاده از روش ترکیبی FMEA و FFTA کمک شایانی به تحلیل علل اصلی این پدیده و برآورد دقیق‌تر احتمال وقوع آن می‌کند. مطابق نتایج فشار پراش منفی و نفوذپذیری کافی سازند از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز سیلان هستند. همچنین نتایج نشان داد که با بررسی مسیرهای بحرانی و میزان تأثیر رویدادهای اولیه و میانی در ایجاد رویداد نهایی سیلان نرخ نقص خطای اپراتور در عملیات کشیدن لوله با سرعت به سمت بالا (خطای اپراتور در وقوع سیلان) تأثیر مهمی در رویداد نهایی دارد و با اصلاحات و کاهش نرخ نقص آن‌ها، احتمال وقوع سیلان کاسته خواهد شد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای تدوین راهبردهای پیشگیرانه برای کاهش احتمال فوران چاه و افزایش ایمنی عملیات حفاری باشد. عدم توجه به مخاطرات طبیعی نظیر سونامی، زلزله، رعد و برق و ... یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر بود که پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی مورد توجه محققان قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز (با کد رهگیری: ۱۶۲۳۴۴۳۲۸) و نیز تمامی افرادی که در انجام این مطالعه یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

آبادی, م. ع.، محمدفام، ا. و گهر، ا. (۲۰۱۹). تجزیه‌وتحلیل علل ریشه‌ای فوران (Blow out) چاه‌های نفت و گاز در صنعت حفاری با استفاده از روش پاپیونی (Bow-Tie). مجله سلامت کار ایران، ۱۵(۶)، ۱۶-۲۴.

بهوندی، ا.، دشتی، س. و ورشوساز، ک. (۱۳۹۶). ارزیابی ریسک زیست محیطی دکل های حفاری با روش *HAZAN* مطالعه موردی: میدان نفتی یاران جنوبی. چهارمین همایش ملی انرژی، محیط زیست، کشاورزی و معماری پایدار.

قاسمی، ش. و امینی نسب، آ. (۱۳۹۹). شناسایی و ارزیابی ریسک های شغلی دکل حفاری با استفاده از روش *JSA* مطالعه موردی چاه های نفت منطقه دهلران. یازدهمین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در علوم و مهندسی شیمی.

گرگین پور، آ. و امینی نسب، آ. (۱۳۹۹). شناسایی و ارزیابی ریسک دکل حفاری (چاه های نفت منطقه پایدار) با استفاده از روش *FMEA* یازدهمین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در علوم و مهندسی شیمی.

مسعود، ح.، سیدعلی، ج. و مژگان زعیم، د. (۱۳۹۵). ارزیابی ریسک محیط زیستی تجهیزات فوران گیر چاه های گازی به روش تجزیه و تحلیل درخت خطا (مطالعه موردی: چاه های گازی طرح توسعه فاز ۱۲ پارس جنوبی). چهاردهمین همایش ملی ارزیابی اثرات محیط زیستی ایران.

(CCPS)., C. f. C. P. S. (1989). Guidelines for process equipment reliability data with data tables. *New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE)*.

Abimbola, M., Khan, F., Garaniya, V., & Butt, S. (2015). *Failure analysis of the tripping operation and its impact on well control.* Paper presented at the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.

Abimbola, M., Khan, F., & Khakzad, N. (2014). Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 30*, 74-85.

Ataallahi, E., & Shadizadeh, S. R. (2015). Fuzzy consequence modeling of blowouts in Iranian drilling operations; HSE consideration. *Safety science, 77*, 152-159.

Ceylan, B. O., Akyar, D. A., & Celik, M. S. (2023). A novel FMEA approach for risk assessment of air pollution from ships. *Marine Policy, 150*, 105536.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

Chen, K., Wei, X., Li, H., Lin, H., & Khan, F. (2021). Operational risk analysis of blowout scenario in offshore drilling operation. *Process Safety and Environmental Protection, 149*, 422-431.

Chung, S., Kim, S., & Yang, Y. (2016). Use of hazardous event frequency to evaluate safety integrity level of subsea blowout preventer. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 8*(3), 262-276.

Ericson, C. A. (2015). *Hazard analysis techniques for system safety*: John Wiley & Sons.

FALLAH MADVARI, R., FALLAH MADVARI, A., MOSAFARKHANI, M., MOHAMMADIAN, Y., & **LAAL, F. (2018).** Risk Assessment by FMEA Method and the Impact of Deploying an Integrated Management System (IMS) Risk Priority Number (RPN). *Occupational Hygine and Health Promotion Journal, 2*(1), 32-39.

Fallah Madvary, R., Mohammadian, Y., Fallah Madvary, A., Najafi, K., Sarsangi, V., & Laal, F. (2020). The effect of integrated management system on risk priority number of environmental assessment by FMEA method in Yazd Persepolis tile factory. *Journal of Disaster and Emergency Research, 1*(1), 23-28.

Feng, X., Jiang, J.-c., & Wang, W.-f. (2020). Gas pipeline failure evaluation method based on a Noisy-OR gate bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 66*, 104175.

FP, L. (1996). loss prevention in the process industries. *2nd ed, Butterworth Heinemann, Oxford*.

Gorginpoor A, & AminiNasab A. (1399). *Identification and risk assessment of drilling rigs (stable zone oil wells) using the FMEA method*. Paper presented at the 11th National Conference on Modern Research in Chemical Sciences and Engineering. https://civilica.com/doc/1132959

Handbook, O. R. D. (2002). OREDA Participants. *OREDA, PO Box, 370*.

Hanifi, S. M., Laal, F., Ghashghaei, M., & Mandali, H. (2024). Providing a model to evaluate the spread of fire in a chemical warehouse using numerical simulation and Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection, 183*, 124-137.

Hosseini, N., Givehchi, S., & Maknoon, R. (2020). Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 63*, 104025.

Huang, F., Yong, M., & Jian, Z. (2021). *Genetic algorithm-based power system information security risk assessment method.* Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.

Ishikawa, A., Amagasa, M., Shiga, T., Tomizawa, G., Tatsuta, R., & Mieno, H. (1993). The max-min Delphi method and fuzzy Delphi method via fuzzy integration. *Fuzzy sets and systems, 55*(3), 241-253.

Jabbari, M., Babaei, M. M., Moradi Hanifi, S., Fallah Madvari, R., & Laal, F. (2022). Reliability Estimation of Low-Voltage Power Distribution Systems. *Mathematical problems in engineering, 2022*(1), 8914214.

Jafari, M. J., Pouyakian, M., Mozaffari, P., Laal, F., Mohamadi, H., Pour, M. T., & Hanifi, S. M. (2022). A new approach to chemicals warehouse risk analysis using computational fluid dynamics simulation and fuzzy Bayesian network. *Heliyon, 8*(12).

Kan, Z., Wei, Y., Zhao, T., & Cao, J. (2024). Risk evaluation of submarine pipelines in FMEA by combination of gray relation projection and VIKOR method. *Ocean Engineering, 302*, 117695.

Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Kiranoudis, C., & Markatos, N. (2006). A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety,* 91(6), 706-716.

Laal, F., Hanifi, S. M., Madvari, R. F., Khoshakhlagh, A. H., & Arefi, M. F. (2023). Providing an approach to analyze the risk of central oxygen tanks in hospitals during the COVID-19 pandemic. *Heliyon, 9*(8).

Laal, F., Khoshakhlagh, A., Moradi Hanifi, S., & Pouyakian, M. (2024). Prioritization of control measures in leakage scenario using Hendershot theory and FBWM-TOPSIS. *Plos one, 19*(4), e0298948.

Laal, F., Pouyakian, M., & Jafari, M. J. (2023). The Reliability Assessment of Firefighting Systems Using Fuzzy Bayesian Network in the Floating Roof Tanks of a Petrochemical Company. *Journal of Occupational Hygiene Engineering, 10*(1), 17-24.

Lilli, G., Sanavia, M., Oboe, R., Vianello, C., Manzolaro, M., De Ruvo, P. L., & Andrighetto, A. (2024). A semi-quantitative risk assessment of remote handling operations on the SPES Front-End based on HAZOP-LOPA. *Reliability Engineering & System Safety, 241*, 109609.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

Liu, Z., Ma, Q., Cai, B., Shi, X., Zheng, C., & Liu, Y. (2022). Risk coupling analysis of subsea blowout accidents based on dynamic Bayesian network and NK model. *Reliability Engineering & System Safety, 218*, 108160.

Liu, Z., Ma, Q., Shi, X., Chen, Q., Han, Z., Cai, B., & Liu, Y. (2022). A dynamic quantitative risk assessment method for drilling well control by integrating multi types of risk factors. *Process Safety and Environmental Protection, 167*, 162-172.

Markowski, A. S., Mannan, M. S., Kotynia, A., & Siuta, D. (2010). Uncertainty aspects in process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23*(3), 446-454.

Mirzaie Aliabadi, M., & Mohammadfam, I. (2018). Risk Assessment of Oil and Gas Exploration Well Blowout in Drilling Operations Using Bow Tie Analysis and Bayesian Network. *Journal of Occupational Hygiene Engineering, 4*(4), 59-69.

Mitrakas, C., Xanthopoulos, A., & Koulouriotis, D. (2025). Techniques and Models for Addressing Occupational Risk Using Fuzzy Logic, Neural Networks, Machine Learning, and Genetic Algorithms: A Review and Meta-Analysis. *Applied Sciences, 15*(4), 1909.

Omidvari, M., Lavasani, S., & Mirza, S. (2014). Presenting of failure probability assessment pattern by FTA in Fuzzy logic (case study: Distillation tower unit of oil refinery process). *Journal of Chemical Health & Safety, 21*(6), 14-22.

Pouyakian, M., Jafari, M. J., Laal, F., Nourai, F., & Zarei, E. (2021). A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection, 146*, 811-836.

Pouyakian, M., Laal, F., Jafari, M. J., Nourai, F., & Kabir, S. (2022). Fuzzy Bayesian estimation and consequence modeling of the domino effects of methanol storage tanks. *International journal of occupational safety and ergonomics, 28*(4), 2509-2519.

Radsa, M., Nowrouzi, M., & Rostami, Ů. (2024). Environmental risk assessment and management in offshore drilling rigs in the Persian Gulf using the EFMEA method. *Journal of Natural Environment, 77*(1), 29-41.

Shafiee, M., Enjema, E., & Kolios, A. (2019). An integrated FTA-FMEA model for risk analysis of engineering systems: a case study of subsea blowout preventers. *Applied Sciences, 9*(6), 1192.

Tamim, N., Laboureur, D. M., Mentzer, R. A., Hasan, A. R., & Mannan, M. S. (2017). A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents. *Process Safety and Environmental Protection, 106*, 256-262.

Testik, O. M., & Unlu, E. T. (2023). Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories. *Quality and Reliability Engineering International, 39*(2), 575-589.

Yazdi, M., Daneshvar, S., & Setareh, H. (2017). An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system. *Safety science, 98*, 113-123.

Zhou, Q., Wong, Y. D., Loh, H. S., & Yuen, K. F. (2018). A fuzzy and Bayesian network CREAM model for human reliability analysis–The case of tanker shipping. *Safety science, 105*, 149-157.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]

Risk Assessment of Oil Well Blowout in the Hoor-Al-Azim Wetland Using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)

Mostafa Satiarvand[1]
Katayoon Varshosaz[1*]
Neda Orak[1]
Elham Mobarak Hassan[1]

1. Department of Environment, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

***Corresponding author:**
k.varshosaz@iau.ac.ir

Received date: May/27/2025
Reception date: June/29/2025

Abstract

The oil and gas industry faces various safety challenges, among which oil well blowout is considered one of the most critical. Such incidents can lead to disastrous consequences, including explosions, environmental pollution, and financial losses. Therefore, the present study aims to assess the risk of blowout in an oil well located in the Hoor-Al-Azim Wetland using Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA), and Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). In this study, FMEA was used to identify potential hazards, while FFTA was applied to analyze the probability of a blowout event in 2024. A team of experts was assembled, and both field data and technical documentation were collected. The identified risks were then prioritized using the FMEA method. The findings showed that the probability of a blowout event was 2.5×10^{-2}. FMEA results indicated that most of the identified risks had a Risk Priority Number (RPN) greater than 100. The fuzzy fault tree analysis highlighted negative differential pressure and sufficient formation permeability as the most significant contributing factors to blowout incidents. This study introduced an integrated approach based on FMEA and FFTA to reduce uncertainty in risk assessment. The FMEA results indicated that blowout, and consequently oil well eruption, is one of the unacceptable hazards in drilling operations. This combined approach enables more precise identification of risks and a more accurate estimation of blowout probability by analyzing both single-point failures and their interactions. Furthermore, by addressing and reducing failure rates such as operator error, negative differential pressure, and formation permeability, the likelihood of blowout can be minimized. The findings of this research can therefore serve as a foundation for developing preventive strategies to reduce blowout risk and enhance drilling safety.

Keywords: Blowout, Oil Well, Risk Assessment, Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA), Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Hoor-Al-Azim Wetland

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-07-07]