

# شناسایی مخاطرات فرایندی و تحلیل دینامیک ریسک در تأسیسات بحرانی یک ایستگاه تقویت فشار گاز

فاطمه رشیدی، سروش برادران\*، محمدامین ثباتی

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

**چکیده:** در این مطالعه روشی نظام‌مند و دینامیک جهت پیاده‌سازی یک‌روند شناسایی مخاطره و ارزیابی ریسک ویژه رویدادهای فرایندی با رویکرد توجه به خرابی تجهیزات فرایندی، کنترلی و ابزاردقیقی، با استفاده از مطالعه موردی در ایستگاه منتخب تقویت فشار گاز پیاده‌سازی شده است. برای این منظور نخست با انتخاب تأسیسات کلیدی، مطالعه شناسایی مخاطرات فرایندی با بهره‌گیری از روش تحلیل HAZOP صورت گرفته و سپس به منظور ارزیابی ریسک حاصل از سناریوهای شاخص، تحلیل بوتای که شامل درخت خطا و درخت رویداد است، انجام پذیرفته است. روش‌های کلاسیک ارزیابی ریسک دارای محدودیت‌هایی از جمله عدم قطعیت در مدل‌سازی روابط علی بین اجزا و ماهیت کاملاً استاتیک می‌باشند، لذا در این مطالعه با استفاده از شبکه بیزین یک رویکرد دینامیک و کمی جهت ارزیابی ریسک ایمنی ایستگاه تقویت فشار گاز پیشنهاد گردیده است و پس از به‌روزرسانی احتمال وقوع رویداد اصلی با استفاده از آنالیز حساسیت، نقاط بحرانی واحد شناسایی شد. نتایج HAZOP نشان می‌دهد که گره شامل کمپرسور، پتانسیل بالایی جهت وقوع سناریوهایی که منجر به رهاش مواد و یا خرابی کمپرسور می‌گردد، دارد. در صورت رهاش مواد باتوجه به حضور کمپرسور و منبع جرقه رویداد انفجار و اشتعال بسیار محتمل است. به همین منظور پس از مطالعه کیفی HAZOP و شناسایی رویداد اصلی با استفاده از روش درخت خطا و درخت رویداد به بررسی علل وقوع رویداد نامطلوب در واحد و عواملی که مانع از تشدید پیامد رویدادهای نامطلوب می‌گردد، پرداخته شد. نکته قابل توجه در این مطالعه توجه به نقش اپراتورها در کنترل فرایند و خطاهای انسانی است. نتایج آنالیز درخت خطا نشان می‌دهد احتمال آسیب به کمپرسور در اثر وقوع پدیده سرچ برابر با  $10^{-3} \times 2/163$  می‌باشد و احتمال وقوع آتش‌فروانی، آتش ناگهانی و انتشار ابر گاز ناشی از آن به ترتیب برابر با  $10^{-6} \times 1/51$ ،  $10^{-6} \times 9/58$  و  $10^{-3} \times 2/152$  است. سپس با نگاشت آنالیز بوتای به شبکه بیزین، ارزیابی ریسک دینامیک انجام گرفت و پس از وارد نمودن شواهد جدید، احتمال وقوع رویدادهای میانی و رویدادهای پایه به‌روزرسانی گردید. تحلیل حساسیت مبتنی بر داده‌های بروز رسانی شده نشان می‌دهد خرابی سیستم حفاظت کمپرسور، خرابی شیر کنترل جریان آنتی سرچ، عدم ارسال سیگنال از نمایشگر اخلاف فشار فیلتر کمپرسور (PDIT) به علت خرابی و خطای انسانی در عدم توجه به PDIT مهم‌ترین علل بروز سرچ کمپرسور می‌باشند. پیشنهادهای نیز جهت اصلاح واحد مورد بررسی و کاهش ریسک آن ارائه گردید.

**واژه‌های کلیدی:** شناسایی مخاطرات فرایندی، ارزیابی ریسک کمی، شبکه بیزین، تقویت فشار گاز، روش HAZOP

آنالیز درخت خطا (FTA)

**KEYWORD:** Process Hazard Identification, Quantitative risk assessment, Bayesian Networks, Gas Compressor Station, HAZOP, Fault Tree Analysis

## مقدمه

پیشرفت اقتصاد کشورها وابستگی جبران ناپذیر به مساله تامین پایدار انرژی دارد. از همین رو مصرف سوخت‌های فسیلی جهت تولیدات مورد نیاز بشر با سرعت در حال افزایش است و این مهم منجر به افزایش شدید آلودگی‌های زیست محیطی شده است. امروزه ۶۰٪ از منابع انرژی در دنیا را نفت و گاز تشکیل می‌دهد. حمل و نقل نفت خام و محصولات آن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که از این میان بیشترین سهم انتقال، بر عهده لوله‌های انتقال می‌باشد [۱]. گاز طبیعی از جمله منابعی است که به علت تولید اندک آلودگی‌های زیست محیطی همواره مورد توجه است. از این رو انتقال گاز طبیعی در سراسر جهان بسیار حائز اهمیت است. در طی انتقال گاز طبیعی به علت اصطکاک لوله‌ها و شرایط محیطی، گاز دچار افت فشار شده و مصرف کنندگان، گاز طبیعی را با فشار مطلوب دریافت نمی‌کنند. به همین منظور ایستگاه‌های تقویت فشار گاز (GCS<sup>۱</sup>) ایجاد شده‌اند. با توجه به حضور گاز اشتعال آمیز و پر فشار، این ایستگاه‌ها همواره بستر حوادث ناگوار بودند [۲]. در ۶ دسامبر سال ۲۰۱۲ یک ایستگاه کمپرسور در ایالت وایومینگ آمریکا [۳] و در سال ۲۰۱۳ لوله‌کشی مربوط به یک ایستگاه کمپرسور در ایالت میشیگان دچار انفجار و آتش‌سوزی شدند [۴]. ویلیامز یک شرکت انرژی مستقر در تولسا اوکیانا است که در ۱۰ سال گذشته خطوط لوله و ایستگاه‌های کمپرسور آن ۱۰ بار منفجر شده و یا آتش گرفته است [۵]. در ژوئن سال ۲۰۲۲ نیز یک پایانه انتقال گاز طبیعی در ایالت تگزاس در آمریکا منفجر و دچار آتش‌سوزی شد به دنبال آن قیمت گاز اروپا ۲۰ درصد افزایش یافت [۶]. بنابراین جهت پیشگیری از وقوع این حوادث، یا کاهش پیامدهای ناشی از آن، شناسایی مخاطرات و ارزیابی ریسک در ایستگاه‌های تقویت فشار مورد توجه قرار گرفته است.

در خصوص ایستگاه‌های تقویت فشار گاز به منظور بررسی و افزایش سطح ایمنی و اطمینان‌پذیری این تاسیسات حیاتی تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از ابزار متفاوت صورت گرفته است. چوراسیا<sup>۲</sup> و پاتانکار<sup>۳</sup> در یک مطالعه مروری بر روی ۲۰ واحد تقویت فشار گاز با استفاده از آنالیز تخلیه که یک تحلیل مبتنی بر سیستم می‌باشد،

به شناسایی سیستم‌های محافظت نشده در برابر فشار بیش از اندازه پرداختند. در این آنالیز ۴ مرحله‌ای پس از تجزیه و تحلیل احتمالی، نرخ جریان مورد نیاز سناریوی فشار بیش از حد و ظرفیت تخلیه تجهیز، تفکیک آماری سناریوها نشان داد که آتش سوزی خارجی و خروجی مسدود شده رایج‌ترین سناریوهای فشار بیش از حد هستند [۷]. در مطالعه دیگر کولیناس<sup>۴</sup> و همکاران با استفاده از روش AHP<sup>۵</sup> به رده‌بندی ریسک‌های ساخت‌وساز یک ایستگاه تقویت فشار گاز در کشور یونان پرداختند. رویکرد پیشنهادی از توانایی بکارگیری تجربه، دانش و شهود شخصی که هنگام تعیین وزن عناصر تصمیم می‌گیرد، سود می‌برد اما ذهنی بودن فرآیند مدل‌سازی، نقص اساسی این رویکرد است [۸]. در پژوهشی دیگر، پیتمن<sup>۶</sup> و همکاران با استفاده از نگاهت مخاطرات فرایندی توسط نرم‌افزار HazMap3D آشکار ساز یک ایستگاه کمپرسور را ارزیابی و بهینه‌سازی نمودند. در این رویکرد نمراتی را به تجهیزات خطرناک حاوی هیدروکربن‌های قابل اشتعال اختصاص داده و یک طرح آشکار ساز پایه بر اساس فلسفه حفاظت از آتش و گاز تاسیسات منتخب ایجاد شد و تغییراتی برای بهینه‌سازی و کاهش هم‌افزونی بیش از حد در سیستم‌های آشکار ساز پیشنهاد شد [۹]. دنجی ژو<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ با توسعه روش RCM<sup>۸</sup> یک روش تعمیر و نگهداری دینامیک مبتنی بر قابلیت اطمینان<sup>۹</sup> (DRCM) برای کمپرسورهای ایستگاه تقویت فشار گاز طبیعی ارائه کرده‌اند. این روش یک راه‌حل مناسب جهت پوشش معایب RCM که تمرکز بر روی پدیده‌های عملیاتی بجای حالات خرابی و همچنین توجه به یک جز بدون در نظر گرفتن تاثیرات آن بر روی سیستم است، می‌باشد و با در نظر گرفتن حالات خرابی می‌تواند توصیه‌های تعمیر و نگهداری اصلاحی، دقیق و کمی را با کمک فناوری‌های تشخیصی و پیش‌آگاهانه ارائه دهد [۱۰]. ژو<sup>۱۰</sup> و همکاران نیز با تمرکز بر کمپرسورهای گریز از مرکز که از حیاتی‌ترین تجهیزات در ایستگاه تقویت فشار گاز می‌باشد، مدل آنالیز اثرات و حالات خرابی<sup>۱۱</sup> (FMEA) مبتنی بر استدلال فازی را جهت مورد استفاده قرار دادند [۱۱]. جینفنگ ژو<sup>۱۲</sup> نیز با استفاده از آنالیز درخت خطا احتمال خرابی کمپرسور گریز از مرکز و حداقل برش آن را محاسبه نمود [۱۲]. در مطالعه اکتون<sup>۱۳</sup> و همکاران یک بسته نرم‌افزاری جهت ارزیابی

(۱) Gas Compressor station

(۳) Patankar

(۵) Analytical Hierarchy process

(۷) Zhou, D

(۹) Dynamic Reliability-Centered Maintenance

(۱۱) Failure and Mode Effect Analysis

(۱۳) Acton

(۲) Chaurasia

(۴) Koulinas

(۶) Fawcett

(۸) Reliability-Centered Maintenance

(۱۰) Zhu, X.P

(۱۲) Zhu, J.F

شکست و اثرات<sup>۶</sup> (FMEA)، آنالیز درخت خطا، آنالیز درخت رویداد<sup>۷</sup> (ETA) و تحلیل بوتای<sup>۸</sup> (BT). HAZOP یکی از ساختار یافته‌ترین تکنیک‌ها برای مطالعه خطرات و مشکلات عملکردی است که منشا آن در دهه ۱۹۷۰ است و توسط صنایع شیمیایی امپریال<sup>۹</sup> (ICI) توسعه یافت، اما پس از انفجار در یک کارخانه شیمیایی تولید ناپلون در بریتانیا به یک استاندارد تبدیل شد و به طور گسترده جهت شناسایی مخاطرات در صنایع مورد استفاده قرار گرفت<sup>۱۰</sup> [۱۷]. جولیان<sup>۱۰</sup> و همکاران با استفاده از روش‌های HAZOP، آنالیز لایه‌های حفاظتی<sup>۱۱</sup> (LOPA) و ارزیابی سطح عملکرد ایمنی<sup>۱۲</sup> (SIL) خطرات واحد آلکیلاسیون در یک پالایشگاه واقع در آمریکای لاتین را مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر بندیب<sup>۱۳</sup> و همکاران از یک روش مبتنی بر HAZOP و بوتای برای ارزیابی ریسک یک واحد LPG در پالایشگاه گاز بهره‌گرفتند [۱۹]. مطالعات گسترده‌ی بسیاری نیز در زمینه استفاده از روش‌های کمی FTA و ETA در ارزیابی ریسک صنایع فرایندی و شیمیایی صورت گرفته است [۲۰-۲۳]. بررسی نتایج این مطالعات نشان می‌دهد تلفیق چندین روش در شناسایی خطرات و تجزیه و تحلیل آن‌ها منجر به همپوشانی نواقص یکدیگر و ارائه نتیجه نتیجه مطلوب می‌شود [۲۴]. روش‌های کمی و کیفی دو جنبه مهم ارزیابی ریسک در صنایع شیمیایی هستند. روش‌های مرسوم ارزیابی کمی ریسک<sup>۱۴</sup> (QRA) (مانند FTA، FMEA، ...) در ارائه نتایج دقیق به دلیل معیبهی مانند استاتیک بودن (ناتوانی در به روز رسانی احتمال رویدادها)، استفاده از داده‌های شکست عمومی (عدم قطعیت داده) [۲۵] و ناتوانی در در نظر گرفتن وابستگی‌های پیچیده بین اجزای سیستم مورد انتقاد قرار گرفته اند [۲۶]. جهت غلبه بر این مشکلات تلاش‌های زیادی در سال‌های اخیر صورت گرفته است که از جمله آن می‌توان بکارگیری تئوری فازی جهت مقابله با عدم قطعیت داده‌ها و شبکه بیزین جهت مقابله ایستایی مدل و روش‌های دیگری مانند مدل‌های مونت کارلو و مارکوف را ذکر کرد [۲۷]. تجزیه و تحلیل سناریو تصادف با به‌روزرسانی احتمال، کلید تجزیه و تحلیل ایمنی دینامیک است. شبکه بیزین<sup>۱۵</sup> (BN) یک تکنیک جایگزین برای روش‌های استاتیک با پتانسیل فراوان در تحلیل ایمنی است.

پیامدهای مختلف ناشی از انتشار گاز در تاسیسات سطح الارضی مرتبط با خطوط لوله انتقال گاز طبیعی به کار گرفته شده است [۱۳]. آن‌ها با اجرای این مدل ریاضی بر روی یک مخزن تحت فشار و محفظه کمپرسور ریسک‌های فردی و میزان تلفات بر روی افراد را محاسبه کرده‌اند اما از آن جایی که این مدل بسیار زمان‌بر است شبکه ملی انتقال گاز و برق (National Grid) یک بسته نرم‌افزاری ارزیابی ریسک به نام CompCab را به طور خاص برای تاسیسات فشرده‌سازی گاز طبیعی و تاسیسات سطح الارضی گاز طبیعی را تأمین مالی کرد. کلیور<sup>۱</sup> و همکاران در مطالعه خود در مورد چگونگی استفاده از خروجی این مدل که شامل رتبه‌بندی ریسک در تعدادی از سایت‌ها، ارزیابی تدارکات اطفاء حریق در یک واحد یا بررسی تاثیر تغییرات جانمایی در یک واحد می‌باشد، بحث کرده‌اند. در این مدل ورودی‌ها برای تاسیسات سطح الارضی انتقال گاز به نرم‌فزار داده شده است و این امر موجب می‌شود زمان کلی راه‌اندازی یک سایت را در مقایسه با جایگزینی روش‌های سنتی، به نصف کاهش یابد [۱۴]. مطالعات محدودی نیز در زمینه ارزیابی ریسک کمی ریسک ایستگاه تقویت فشار صورت گرفته است. /صفهانی در مطالعه‌ای با استفاده از آنالیز درخت خطا<sup>۲</sup> (FTA) توقف ناگهانی کمپرسور دوم تقویت فشار گاز، بر اثر بالا رفتن سطح مایع در استوانه جذب احتمال وقوع توقف فرایند و عدد ریسک مربوط به آن را محاسبه نمودند [۱۵]. ختمی فیروزآبادی و خرم روز نیز با استفاده پیاده سازی تحلیل درخت خطا بر روی هر یک از شیرهای گاز، نقاط حساس به نشتی را در یک ایستگاه تقویت فشار گاز شناسایی نمودند [۱۶]. نکته حائز اهمیت در پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه مطالعات ایمنی فرایندی و ارزیابی ریسک در ارتباط با ایستگاه‌های تقویت فشار، ضعف یک نگاه ساختارمند کمی است به نحوی که دربرگیرنده مراحل شناسایی، ارزیابی و کمی‌سازی ریسک بر اساس رویدادهای ایمنی فرایندی<sup>۳</sup> (PSE) باشد و جزئیات خرابی تجهیزات را مورد بررسی قرار دهد. در دهه‌های گذشته چندین روش تجزیه و تحلیل مخاطرات فرایندی ساختاریافته<sup>۴</sup> (PHA) توسعه داده شده است: تجزیه و تحلیل مخاطره و راهبرد عملیات<sup>۵</sup> (HAZOP) تجزیه و تحلیل حالت‌های

(۱) Cleaver

(۳) Process Safety Event

(۵) Hazard and Operability

(۷) Evenr Tree Analysis

(۹) Imperial Chemical Industries

(۱۱) Layer Of Protection Analysis

(۱۳) Bendib

(۱۵) Bayesian Netwok

(۲) Fualt Tree Analysis

(۴) Process Hazard Analysis

(۶) Failure and Mode Effect Analysis

(۸) Bow-Tie

(۱۰) Juliana

(۱۲) Safety Integrity Level

(۱۴) Quantitative Risk Assessment

حوادث بزرگ مرتبط با یک تأسیسات و چگونگی به کارگیری موانع و کنترل‌های تخریب برای جلوگیری یا کاهش این خطرات است [۳۰]. اما در تحقیقات اخیر، به عنوان ترکیبی از FTA و ETA تعریف شده است [۳۱]. آنالیز درخت خطا باتوجه به منطق استنباطی خود، ابزاری مناسب جهت آزمودن شرایط و حالات مختلف مؤثر بر روی وقوع یک رخداد نامطلوب موسوم به رویداد اصلی در فرایندهای پیچیده است. در ارزیابی کمی درخت خطا، از روی داده‌های نرخ خرابی<sup>۲</sup> رویدادهای پایه<sup>۳</sup> و استفاده از قواعد جبر بول، احتمال رخداد واقعه رأس محاسبه می‌شود [۳۲]. به‌طور کلی، می‌توان از سه منبع مختلف برای تخمین کمی پارامترهای ورودی استفاده کرد: ۱- داده‌های عمومی، ۲- داده‌های متناسب واحد مورد بررسی، ۳- قضاوت تخصصی یا ذهنی [۳۳]. داده‌های قابلیت اطمینان معمولاً از منابع عمومی مانند<sup>۴</sup> OREDA،<sup>۵</sup> CCPS بدست می‌آیند. در مطالعه حاضر به علت عدم دسترسی به داده‌های متناسب واحد از داده‌های عمومی OREDA [۳۴] برای تخمین احتمال وقوع رویدادهای فرایندی پایه استفاده شده است. با توجه به این که خطاهای انسانی نیز اهمیت ویژه‌ای در وقوع رویدادهای فرایندی دارند و در تمامی مراحل طراحی، تولید، ساخت و بهره‌برداری سیستم که یک اپراتور نقش پایش فرایندهای صورت گرفته توسط سیستم را بر عهده دارد ممکن است اتفاق بیفتند. در مطالعه حاضر خطاهای انسانی که منجر به وقوع خرابی کمپرسور می‌شوند نیز مورد بررسی قرار گرفته و از داده‌های مربوط به کتابچه راهنمای قابلیت اطمینان انسانی NUREG/CR- 1278 [۳۵] جهت تخمین احتمال وقوع رویدادهای پایه مبتنی بر خطای انسانی استفاده شد. پس از محاسبه احتمال وقوع سناریوی بحرانی که خرابی کمپرسور در اثر افت جریان ورودی می‌باشد، با استفاده از روش تحلیل درخت رویداد که یک ابزار کلاسیک، به‌منظور محاسبه احتمال پیامدها است، احتمال وقوع پیامدهای مختلف ناشی از خرابی کمپرسور به طور کمی محاسبه گردید [۳۶]. پس از انجام تحلیل درخت خطا و درخت رویداد، نمودار بوتای حاصل شده، به شبکه بی‌زین نگاشته شد و برای این منظور نرم افزار GeNIe مورد استفاده قرار گرفت. پس از استدلال استقرایی و قیاسی در مرحله آخر، تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از معیار نسبت تغییرات<sup>۶</sup> (RoV) انجام شد و رویدادهای بحرانی شناسایی شدند. سپس با استفاده از معیار اهمیت برنام<sup>۷</sup> (BIM) آنالیز بحرانیّت مورد صحت سنجی قرار گرفت.

شبکه‌های بی‌زین از بسیاری جهات شباهت زیادی به آنالیز درخت خطا دارند. با این حال، مزایای مشخصی که آن‌ها را نسبت به آنالیز درختان خطا مناسب‌تر می‌کند، توانایی آن‌ها در نمایش صریح وابستگی رویدادها، به روز رسانی احتمالات، و مقابله با عدم قطعیت‌ها است [۲۸]. به همین علت در مطالعه حاضر از روش شبکه بی‌زین جهت به‌روزرسانی احتمال وقوع خرابی در کمپرسور یک ایستگاه تقویت فشار گاز استفاده شده است. بنابراین با توجه به اهمیت ایستگاه تقویت فشار گاز و نبود یک روش جامع و توسعه‌یافته برای ارزیابی ریسک این واحد، در این پژوهش با هدف مرتفع نمودن این خلاء تحقیقاتی نخست با هدف تعیین تأسیسات کلیدی ایستگاه، شناسایی مخاطرات فرآیندی با روش تحلیل HAZOP صورت گرفت و سپس آنالیز درخت خطا و درخت رویداد جهت بررسی کمی احتمالات وقوع رویداد نامطلوب در واحد و عواملی بازدارنده از تشدید پیامدها به‌کار گرفته شد. در مرحله بعد با استفاده از شبکه بی‌زین احتمال وقوع رویداد اصلی<sup>۱</sup> و پیامدهای ناشی از آن به‌روزرسانی گردید و نقاط بحرانی واحد شناسایی شد.

## روش کار

روند حرکت ساختاری پیشنهاد شده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. این مراحل ابتدا با مطالعه واحد فرایندی و شناخت کلان از تأسیسات کلیدی آغاز می‌گردد. در گام بعدی تعیین محدوده مدیریت ریسک اتفاق افتاده است و با توجه به اهمیت مقوله ایمنی فرایندی، دایره حرکت به ریسک‌های ناظر به وقوع این دسته رویدادهای اصلی معطوف شده است؛ لذا ابزار متناسب با این هدف با عنوان تحلیل HAZOP انتخاب گردیده است. این مطالعه توسط تیم خبره HAZOP که شامل کارشناس فرایند، کارشناس عملیات و بهره‌برداری کارشناس ابزار دقیق و کارشناس ایمنی فرایند می‌باشد انجام شده است [۲۹]. با توجه به این که رویکرد کیفی HAZOP در شناسایی رویدادهای اصلی خیلی توانمند نیست، پس از شناخت سناریوهای ایمنی فرایندی، سناریوهای رخداد با استفاده از نمودار بوتای مدل‌سازی می‌شود. این مدل برای نشان دادن بهتر رابطه علت و معلولی با اتصال مدل‌های FTA و ETA به رویداد اصلی ایجاد می‌شود. نمودار بوتای در واقع یک ساختار کیفی سیستماتیک برای درک خطرات

(۱) Top Event

(۳) Basic Event

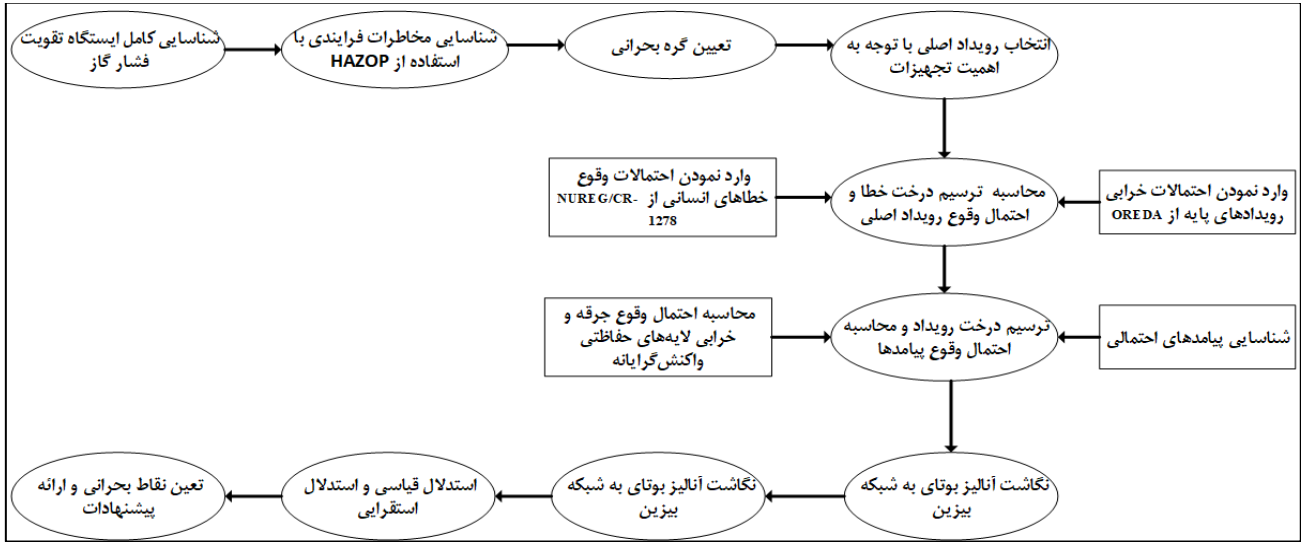
(۵) Off shore Reliability Data bank

(۷) Birnbaum Importance Measure

(۲) Failure Rate

(۴) Center for Chemical Process Safety

(۶) Rate Of Variation



شکل ۱- ساختار کلی مطالعه انجام شده

## آنالیز شبکه بیزین

توزیع احتمال مشترک مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی با استفاده از قانون زنجیره‌ای به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Pr(X_1, X_2, X_3 \dots X_{n-1}, X_n) = \prod_{i=1}^n \Pr(X_i | \text{Parent}(X_i)) \quad (1)$$

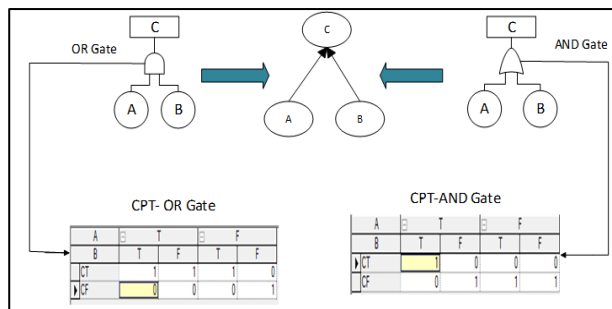
شبکه بیزین تحت شرایط عدم قطعیت، یک روش احتمالی قوی برای استدلال ارائه می‌دهند. مدل شبکه بیزین، می‌تواند هر دو تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده (استقرایی) و تشخیصی (قیاسی) را انجام دهد. تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده مدل بیزین، از اطلاعات مربوط به علت رویدادها برای به‌دست‌آوردن شواهد جدید در مورد اثرات استفاده می‌شود. از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل عقب‌گرد مدل BN با دنبال کردن در جهت مخالف آرک‌ها، یعنی استفاده از اطلاعات مربوط به اثرات رویدادها، برای به‌دست‌آوردن علل آن‌ها انجام می‌شود. در واقع یکی از کاربردهای شناخته شده شبکه بیزین به‌روزرسانی احتمال خرابی قبلی رویدادهای مشخص شده، با توجه به اطلاعات جدید در قالب شواهد و مدارک است. تجزیه و تحلیل شبکه بیزین مبتنی بر قانون احتمال بیز است. طبق قضیه بیز، اگر A و B دو رویداد تصادفی هستند و مشخص است که B رخ داده است، بنابراین احتمال پسین وقوع رویداد A با توجه به وقوع B را می‌توان با استفاده از معادله زیر تعیین نمود.

$$\Pr(A | B) = \frac{\Pr(B | A) \Pr(A)}{\Pr(B)} \quad (2)$$

که P(A) احتمال قبلی معلول، P(B|A) احتمال درست‌نمایی یا احتمال علت به شرط وقوع معلول و P(B) احتمال کل علت است.

امروزه به دلیل ماهیت دینامیکی متغیرهای موثر بر ریسک حوادث فرایندی و اهمیت بالای ایمنی در این صنایع، روش‌های موجود نیز باید این قابلیت را داشته باشند و بتوانند حوادث را به صورت دینامیک مورد بررسی قرار دهند [۳۷]. شبکه بیزین یکی از روش‌های مورد قبول ارزیابی ریسک دینامیک است که برتری آن‌ها نسبت به روش‌های مرسوم QRA در بسیاری از مطالعات قبلی به خوبی ثابت شده است [۲۵]. همچنین در برآورد احتمال وقوع رویداد در سیستم‌های پیچیده، ویژگی‌های مختلف مانند وابستگی عملکردی بین اجزا، رفتار وابسته به زمان سیستم‌ها، حالت‌های خرابی چندگانه و عدم قطعیت در رفتار سیستم و داده‌های خرابی باید مورد توجه قرار گیرد. متأسفانه رویکردهای کلاسیک قادر به پوشش این جنبه‌ها نیستند [۳۸]. شبکه بیزین یک گراف جهت‌دار غیرحلقوی است که شامل یک بخش کیفی و یک بخش کمی است. بخش کیفی یک گراف جهت‌دار غیرحلقوی است و قسمت کمی شامل احتمالات قبلی و احتمالات شرطی گره‌های شبکه است. در گراف غیرحلقوی، گره‌ها متغیرهای تصادفی را نشان می‌دهند و به صورت دایره نشان داده می‌شوند. از سوی دیگر، آرک‌های جهت‌دار نشان‌دهنده وابستگی‌ها یا روابط علت و معلولی بین گره‌ها هستند. در یک شبکه بیزین، اگر یک آرک از گره X به گره Y وجود داشته باشد، گره X والد گره Y است. گره‌های والد تأثیر مستقیمی بر گره‌های فرزند خود دارند و هر یک از گره‌های فرزند Xi دارای توزیع احتمال شرطی است که به صورت  $\Pr\{X_i | \text{Parent}(X_i)\}$  بیان می‌شوند و تأثیر والدین بر گره کودک را کمی می‌کند. با استفاده از مفروضات استقلال شرطی در شبکه بیزین،

به کمپرسور ارسال می‌شود تا فشار آن به ۱۲۵ بار افزایش یابد. جهت جلوگیری از ورود ذرات جامد و مایع به کمپرسور، یک اسکرابر که شامل یک قطره گیر نیز می‌باشد، و یک فیلتر قبل از کمپرسور قرار دارد. به علت این که فشار گاز خروجی از کمپرسور بسیار بالاست، دما گاز نیز افزایش می‌یابد. جریان گاز خروجی از کمپرسور وارد یک خنک‌کننده می‌شود و پس از آن برای مصارف صنعتی پایین دست ارسال می‌گردد. پس از انجام مطالعات HAZOP، باتوجه به اهمیت فراوان کمپرسور در واحد تقویت فشار گاز و احتمال نشستی گاز اشتعال‌پذیر از قسمت‌های مختلف اطراف آن، گره مربوط به کمپرسور به عنوان گره اصلی انتخاب شد. تجهیزات موجود در گره شامل اسکرابر و کمپرسور و خنک‌کننده گاز می‌باشد. این تأسیسات دارای سه ردیف کمپرسور و تجهیزات همراه آن هستند. کمپرسورها از نوع سانتریفیوژ و از لحاظ مقدار بار در معرض پدیده سرچ قرار دارند. هر ردیف از کمپرسورها به طور جداگانه مجهز به سیستم آنتی-سرچ می‌باشند و همچنین یک سیستم Spill Back جهت حفاظت در برابر افت جریان‌های ورودی است. شکل ۳ و ۴ نمودار جریانی واحد مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. سیستم‌های ابزاردقیق این واحد، سیستم کنترل فرایند پایه‌ای<sup>۲</sup> و سیستم ابزاردقیقی ایمنی<sup>۳</sup> (SIS) می‌باشد. سیستم کنترل فرایند پایه‌ای سیستمی است که به تمامی پیغام‌های ورودی از فرایند و تجهیزات مرتبط با آن پاسخ می‌دهد و پیغام‌های خروجی را به گونه‌ای ارسال می‌کند که فرایند و تجهیزات مرتبط با آن در جهت مطلوبی عمل نمایند. سیستم ابزاردقیقی ایمنی عبارت است از یک سیستم مبتنی بر ابزاردقیق که برای پیاده‌سازی یک یا چند عملکرد ابزاردقیقی ایمنی<sup>۴</sup> (SIF) استفاده می‌شود. یک سیستم کنترلی دارای سه جز اصلی می‌باشد: المان دریافت‌کننده یا حسگر<sup>۵</sup>، پردازنده سیستم کنترل<sup>۶</sup> (DCS) و عملگر نهایی<sup>۷</sup> (مانند شیر کنترل). یک سیستم ابزاردقیقی ایمنی نیز یک مجموعه از ترکیب حسگر، تحلیل‌گر منطقی<sup>۸</sup> و عملگر نهایی می‌باشد [۳۲]. همان‌طور که در شکل نمودارهای جریانی مشاهده می‌شود کنترل فشار، دما، جریان و سطح توسط المان‌های سیستم کنترل فرایند پایه کنترل می‌شوند و زمانی که هر کدام از المان‌های این سیستم به هر علتی دچار مشکل شوند واحد فرایندی توسط سیستم ابزار دقیق ایمنی با فعال سازی ESD0 و ESD1 متوقف می‌شود.



شکل ۲- جداول شرطی مربوط به نگاشت درخت خطا به شبکه بی‌زین

### نگاشت درخت خطا به شبکه بی‌زین

شبکه بی‌زین و درخت خطا هر دو دارای جنبه‌های احتمالی هستند. این دو ابزار در زمینه تشخیص عیوب و بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌ها نقشی مؤثر ایفا می‌کنند. هر درخت خطا یک شبکه بی‌زین مربوط به خود را دارد. نگاشت درخت خطا به شبکه بی‌زین رویدادهای اساسی، رویدادهای میانی و رویداد راس در درخت خطا به ترتیب به گره‌های ریشه، گره‌های میانی و گره برگ در شبکه بی‌زین مربوطه منتقل می‌شوند. در نگاشت عددی، احتمال وقوع پایه رویدادها به عنوان احتمالات قبلی به گره‌های ریشه مربوطه اختصاص داده می‌شوند، درحالی که برای گره‌های میانی و همچنین گره‌های برگ (رویدادهای اصلی) جداول احتمال شرطی<sup>۱</sup> (CPT) بر اساس نوع گیت که در شکل ۲ نشان داده شده است، پر می‌شوند و احتمال شرطی وقوع گره میانی که دارای دو والد است مطابق معادله ۳ محاسبه می‌شود [۳۹].

$$\begin{aligned}
 P(C = T) &= P(C = T | A = T, B = T)P(A = T)P(B = T) + \\
 &P(C = T | A = T, B = F)P(A = T)P(B = F) + \\
 &P(C = T | A = F, B = T)P(A = F)P(B = T) + \\
 &P(C = T | A = F, B = F)P(A = F)P(B = F) \quad (3)
 \end{aligned}$$

### تأسیسات مورد مطالعه

در این مطالعه به ارزیابی ریسک کمی قسمت بحرانی ایستگاه تقویت فشار گاز پرداخته می‌شود. این ایستگاه جریان سیال سه‌فازی خروجی از چاه نفت را دریافت می‌کند و پس از عبور از لخته‌گیر جهت جداسازی مایع از جریان گاز، جریان گاز به کمپرسور و مایع جدا شده به جداکننده سه‌فازی ارسال می‌شود. گاز خروجی از لخته‌گیر نیز

(۱) Conditional Probability Table

(۳) Safety Instrumented System

(۵) Sensor

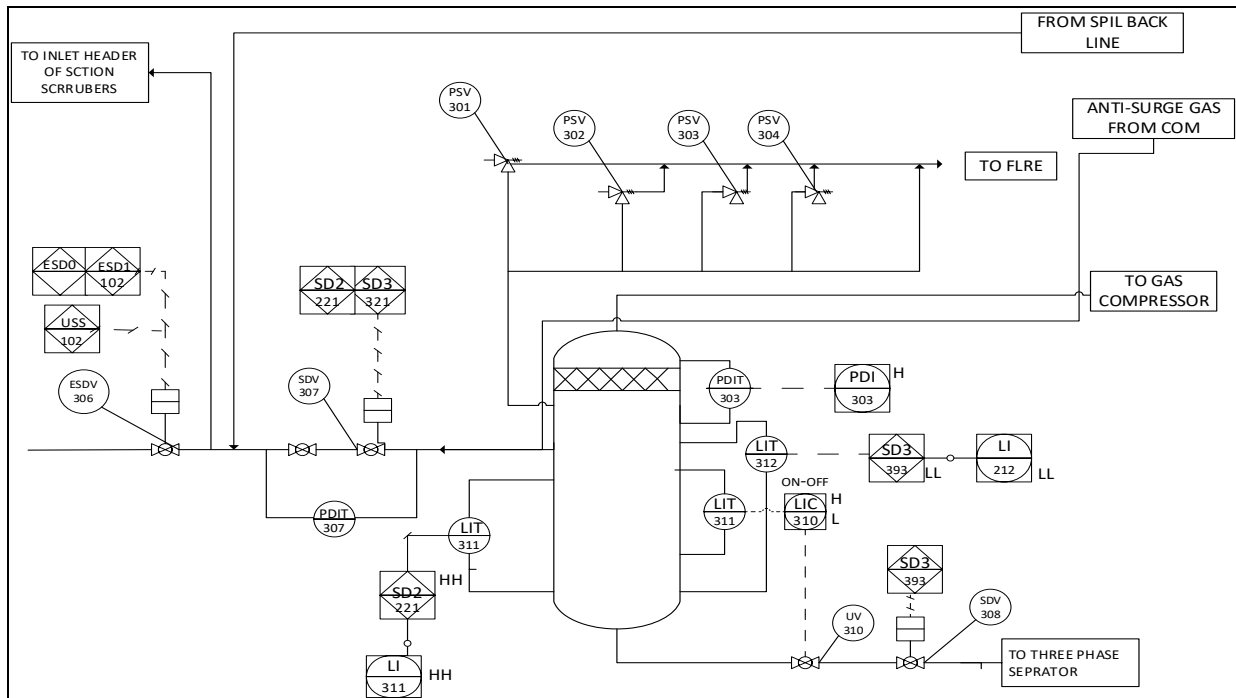
(۷) Final Element

(۲) Basic Process Control System

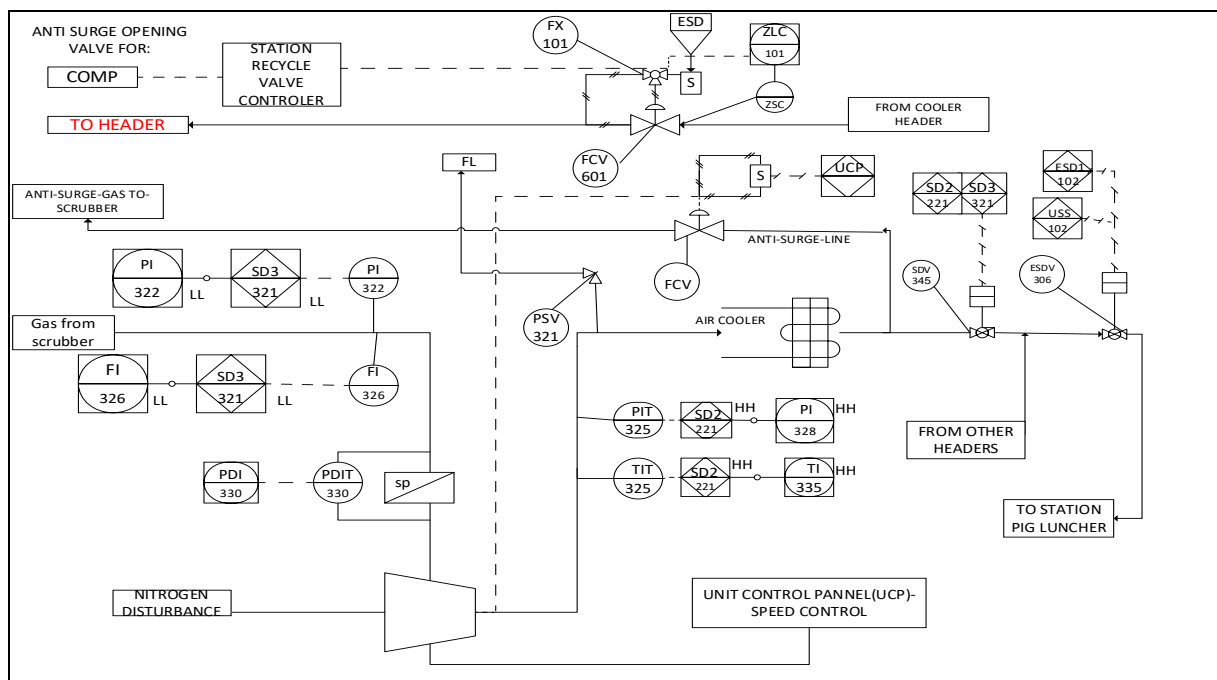
(۴) Safety Instrument Function

(۶) Distributed Control System

(۸) Logic Solver



شکل ۳- نمودار جریان‌ی ناحیه مربوط به اسکرابر



شکل ۴- نمودار جریان‌ی ناحیه کمپرسور

### نتیجه‌ها و بحث

#### شناسایی مخاطرات فرایندی

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، از جمله کاربردی‌ترین روش‌های شناسایی مخاطرات فرایندی، روش HAZOP می‌باشد [۲۹].

پس از اجرای مطالعات HAZOP نتایج مربوط به گره بحرانی در جداول ۱-۵ ارائه شده است. پس از بررسی تمام انحرافات موجود، مشاهده شد که کاهش یا قطع جریان ورودی به کمپرسور بیشترین علل وقوع را به خود اختصاص داده است و سیستم کنترل جریان

جدول ۱- مطالعه HAZOP مربوط به انحراف کاهش / قطع جریان

انحراف: قطع / کاهش جریان		
علت	پیامد	لايه حفاظتی
۱. بسته شدن ناگهانی ESDV-306 به علت خرابی	۱.۱. ازدست رفتن فشار ورودی به کمپرسور	۱.۱.۱. کنترل PIT بعد از SDV-307 توسط اپراتور
۲. بسته شدن ناگهانی SDV-306 به علت خرابی	۲.۱. ازدست رفتن فشار ورودی به کمپرسور	۲.۱.۱. هشدار PIAL-322A و فعال سازی هشدار ۲.۱.۲. فعال سازی سیستم آنتی سرچ و باز شدن FCV601
۳. گرفتگی فیلتر کمپرسور	۳.۱. کاهش فشار ورودی به کمپرسور	۳.۱.۱. هشدار PIAL-322A و به فعال سازی SD-321 ۳.۱.۲. PDI-330A
۴. بسته شدن ناگهانی SDV-345 به علت خرابی یا خطای انسانی	۴.۱. افزایش فشار در خط خروجی کمپرسور و آسیب به آن	۴.۱.۱. PIRH-327A و PIRHH-327A از UCP کمپرسور ۴.۱.۲. PIAHH-328A و فعال سازی SD2-221 ۴.۱.۳. PSV-321
۵. بسته شدن FCV-601A در اثر خرابی مکانیکی شیر یا هریک از اجزای سیستم کنترل	۵.۱. ناکارآمدی سیستم حفاظت از کمپرسور به هنگام افت جریان ورودی به کمپرسور	۵.۱.۱. هشدار PIAL-322 و فعال سازی SD2-221
۶. بسته شدن FCV (Spill Back) در اثر خرابی مکانیکی شیر یا هریک از اجزای سیستم کنترل	۶.۱. عدم عملکرد مناسب کمپرسور در مواقع کارکرد با ظرفیت پایین تر	۶.۱.۱. شیر آنتی سرچ در هر کمپرسور ۶.۱.۲. هشدار PIAL-322A و فعال سازی SD-321

جدول ۲- مطالعه HAZOP مربوط به انحراف برای جریان معکوس

انحراف: جریان معکوس		
علت	پیامد	لايه حفاظتی
۱. باز شدن بیش از اندازه FCV-601A به علت خرابی	۱.۱. ازدست رفتن انرژی و افزایش بار روی کمپرسور که منجر به افزایش دما می شود	۱.۱.۱. سیگنال های خروجی از FCV ۱.۱.۲. TIAHH-335A و فعال سازی SD2-221

جدول ۳- مطالعه HAZOP مربوط به انحراف فشار بالا

انحراف: افزایش فشار		
علت	پیامد	لايه حفاظتی
۱. عملکرد نامناسب سیستم اصلی کنترل فشار (شامل PIC-345)	۱.۱. افزایش فشار خطوط که منجر به آسیب به آنها می شود.	۱.۱.۱. فرمان PIRH-327A از UCP ۲.۱.۱. هشدار PIAHH-328A و فعال سازی SD2-221 ۳.۱.۱. PSV-3321
۲. افزایش فشار در پکیج کمپرسور	۱.۲. آسیب به تأسیسات پایین دست کمپرسور	۴.۱.۱. هشدار TIAHH-335A و فعال سازی SD2-221 سیستم کنترل فشار روی خط خروجی و یا روی کمپرسور

جدول ۴- مطالعه HAZOP مربوط به انحراف سطح زیاد

انحراف: سطح زیاد		
علت	پیامد	لايه حفاظتی
۱. بسته شدن UV-310A در زمان مورد نیاز در اثر خرابی	۱.۱. پاشیدن قطره گیر و ورود مایع به کمپرسور	۱.۱.۱. هشدار LIAHH-311 و فعال سازی SD2-221
۲. بسته شدن ناگهانی SDV-308A در اثر خرابی	۱.۲. پاشیدن قطره گیر و ورود مایع به کمپرسور	۱.۱.۲. هشدار LIAHH-311 و فعال سازی SD2-221

جدول ۵- مطالعه HAZOP مربوط به انحراف سطح کم

انحراف: سطح خیلی کم		
علت	پیامد	لايه حفاظتی
۱. بازماندن UV-310 در اثر خرابی یا خطای انسانی	۱.۱. ازدست دادن سطح مایع در قطره گیر و همراه بری گاز با جریان مایع به جداکننده سه فاز که باعث آسیب به آن می شود.	۱.۱.۱. LIAHH-311 و فعال سازی SD2-221 ۱.۱.۲. ویژگی های طراحی ۱.۱.۳. وجود RO-308 ۱.۱.۴. هشدار LALL-312 و فعال سازی SD3-301



سوم و چهارم نقش خطاهای انسانی نیز مشهود می‌باشد. پس از رسم درخت خطا، آنالیز درخت رویداد جهت محاسبه احتمال وقوع پیامدهای مختلف نیز انجام شد [۳۶]. افت جریان ورودی کمپرسور موجب سرج و خرابی کمپرسور و بروز نشتی می‌شود. با توجه به ماهیت اشتعال‌پذیر گاز طبیعی در صورت وجود منبع جرقه در نزدیک محل نشت گاز، آتش سوزی و یا انفجار رخ خواهد داد. در آنالیز درخت رویداد احتمال اثر بخشی لایه‌های حفاظتی در صورت وجود منبع جرقه مورد بررسی قرار گرفت. احتمال شکست لایه‌های حفاظتی با استفاده از نظر کارشناسان و احتمال جرقه آبی و جرقه دیر هنگام با استفاده از مدل<sup>۱</sup> MISO<sup>۱</sup> محاسبه گردید [۴۰]. بر اساس این مدل احتمال جرقه فوری در واحدهای فرایندی که دارای تجهیزاتی دوار می‌باشند، مستقل از نرخ نشتی و برای هر نوع از نشتی برابر با  $0.0007$  می‌باشد و احتمال جرقه دیر هنگام به ازای هر تجهیز دوار برابر با  $10^{-3} \times 7/3$  می‌باشد. با توجه به این که در واحد مورد بررسی سه ردیف کمپرسور موجود است، احتمال جرقه دیر هنگام برابر با  $10^{-3} \times 21/9$  می‌باشد. بعد وقوع رویداد اصلی که وقوع پدیده سرج در کمپرسور و نشتی از آن می‌باشد، عملکرد موانع ایمنی که شامل جرقه آبی و دیر هنگام، دکتورهای شناسایی نشتی و سیستم توقف اضطراری فرایند می‌باشند، منجر به وقوع سه پیامد مختلف آتش فورانی، آتش ناگهانی و انتشار ابر گاز خواهد شد. بر اساس نتایج آنالیز درخت رویداد نیز، احتمال وقوع آتش فورانی برابر با  $10^{-6} \times 1/51$ ، آتش ناگهانی  $10^{-6} \times 9/58$  و انتشار ابر گاز برابر با  $10^{-3} \times 2/152$  می‌باشد.

### نتایج آنالیز شبکه بیزین

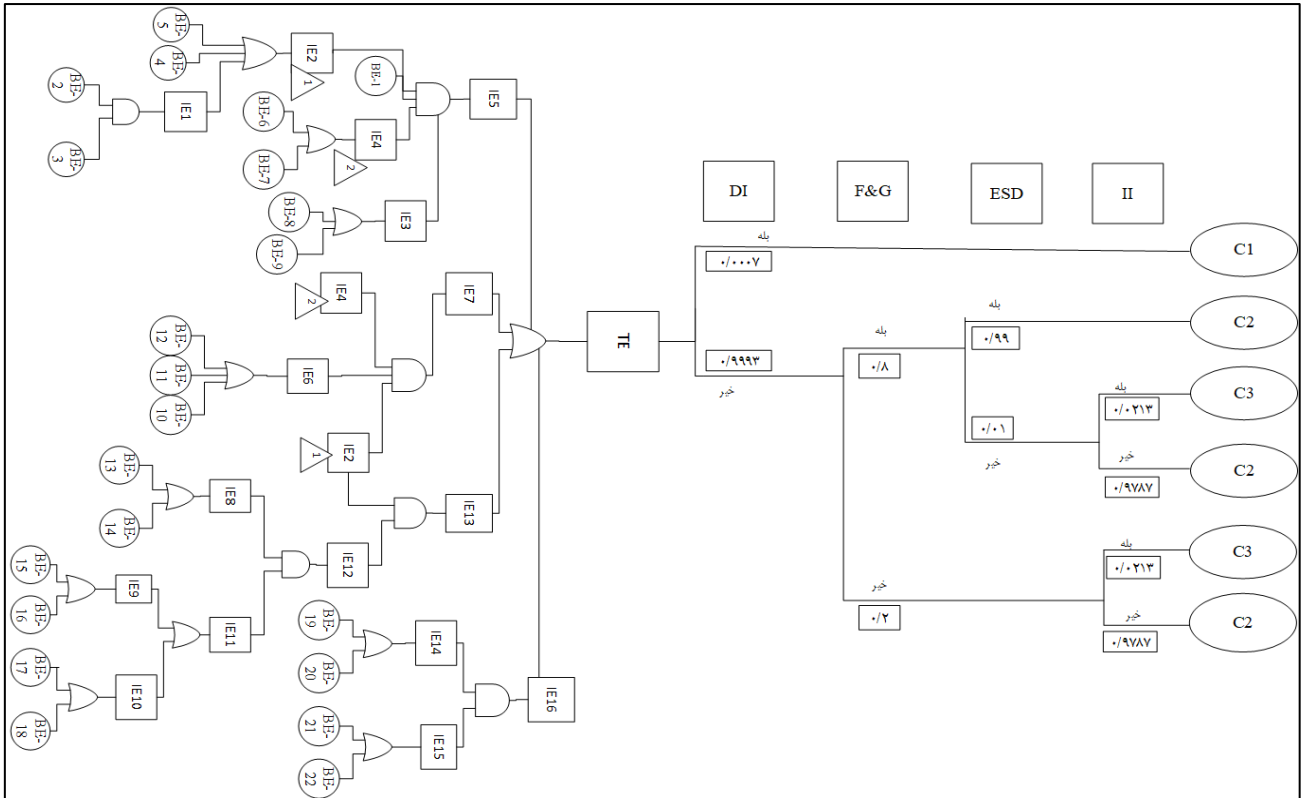
ماهیت استاتیک آنالیز بوتای، باعث می‌شود تغییرات فرایند که تقریباً همیشه در طی عملیات یک فرایند رخ می‌دهد در تحلیل ریسک نادیده گرفته شود. این آنالیز قادر به پوشش وابستگی‌های مشروط میان رویدادهای پایه و رویدادهای میانی نیست و تنها اطلاعات موجود در مراحل اولیه تحلیل یا طراحی سیستم بدون توجه به تفاوت‌های احتمالی ناشی از شرایط عملیاتی و محیطی سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهد و این امر منجر به عدم قطعیت را در تجزیه و تحلیل می‌شود؛ بنابراین برای غلبه بر این نوع عدم قطعیت پس از آنالیز بوتای، نمودار بوتای به شبکه بیزین نگاشته شد که در شکل ۶ نمایش داده شده است. با وارد نمودن احتمال وقوع رویدادهای پایه از پایگاه‌های داده عمومی به‌عنوان باور قبلی، احتمال پیشین وقوع رویدادهای میانی، رویداد اصلی و پیامدها با استفاده از استدلال استقرایی

که در ورودی کمپرسور قرار دارد، سیستم آنتی‌سرج و SPILL BACK از جمله مهم‌ترین لایه‌های حفاظتی برای این انحراف است. لازم به ذکر است عللی که منجر به انحراف افزایش جریان می‌شوند، مشابه با علل مربوط به انحراف فشار بالا هستند و به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار نگرفتند. در اثر باز ماندن شیر کنترل جریان (FCV-601) در خط آنتی‌سرج، جریان اضافی شروع به گردش در فرایند می‌کند و منجر به افزایش دما و خرابی کمپرسور گردد. انحراف فشار بالا یکی از مهم‌ترین انحرافات است. فشار ورودی به هر ایستگاه توسط یک سیستم کنترل فشار اصلی که شامل PIC-345 است، کنترل می‌شود. همان‌طور که در جدول ۳ نمایش داده شده است، اگر این سیستم کنترل دچار عملکرد نادرست شود، خطوط لوله آسیب جدی می‌بینند. وجود سیستم کنترل فشار در کمپرسور، سیستم کنترل فشار و کنترل دما بر روی خط خروجی کمپرسور و شیر اطمینان به‌عنوان لایه حفاظتی می‌تواند مانع نشتی شود. بسته‌شدن ناگهانی شیرهای خروجی اسکرابر، یعنی UV-310 و یا SDV-308 مانع از خروج مایع جمع شده در پایین اسکرابر می‌شود و منجر به افزایش سطح مایع در اسکرابر و آسیب جدی به کمپرسور می‌شود؛ بنابراین اگر سطح مایع از حد مطلوب فراتر رود با فعال‌سازی آلارم سطح خیلی بالا (LAHH) سیستم توقف فرایند (SD2-221) تمام ردیف کمپرسور موردنظر را از سرویس خارج می‌کند.

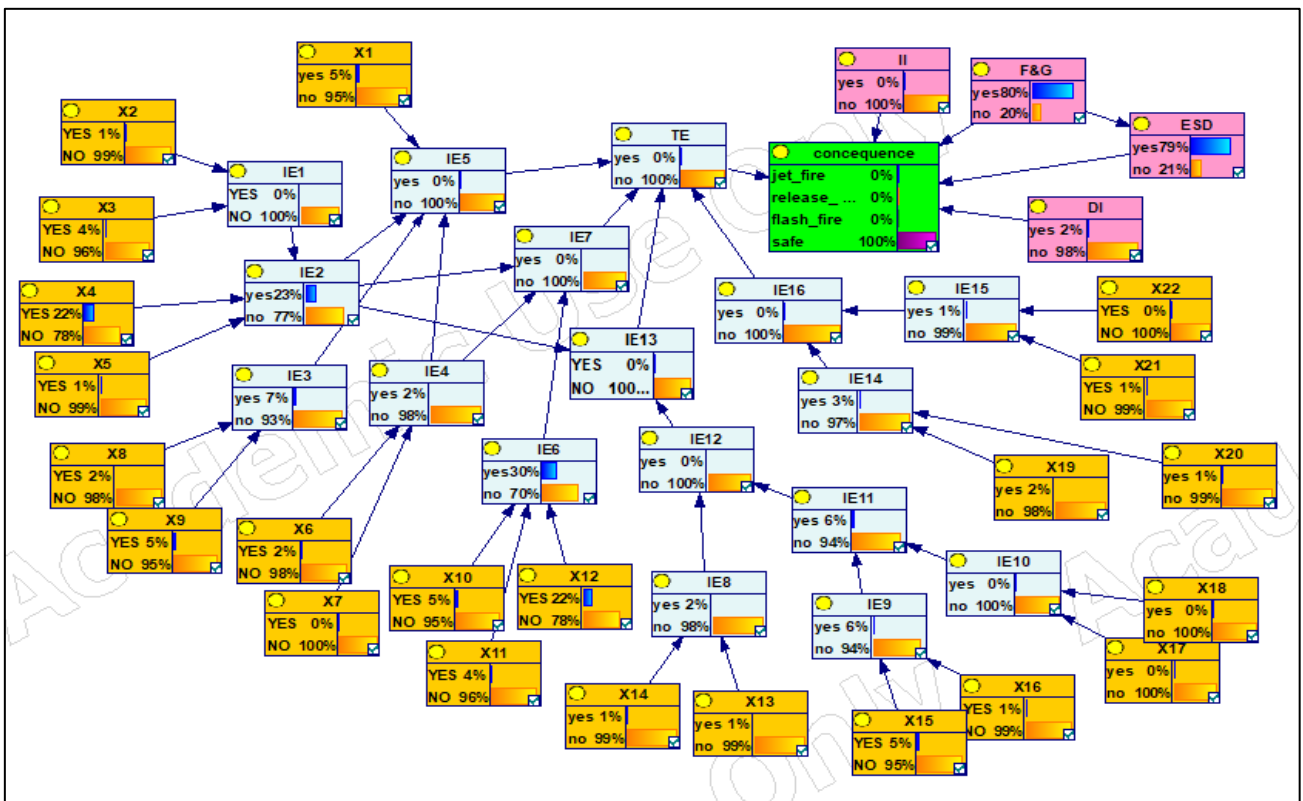
### نتایج آنالیز بوتای

پس از انجام مطالعات HAZOP نتایج نشان می‌دهند کمپرسور در انتقال گاز نقشی بسیار کلیدی دارد و خرابی آن منجر به توقف تولید می‌گردد؛ بنابراین کاهش یا قطع جریان ورودی به کمپرسور مورد ارزیابی کمی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز درخت خطا نشان می‌دهد احتمال وقوع سرج به علت افت فشار جریان ورودی برابر با  $10^{-3} \times 2/163$  می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وقوع افت فشار جریان ورودی به کمپرسور در قالب سناریوهای مختلفی می‌تواند رخ دهد. سناریو اول بسته‌شدن ناگهانی شیر توقف اضطراری (ESDV-306) به همراه از کارافتادن تمام سیستم‌های توقف فرایند، سیستم آنتی‌سرج و SPILL BACK می‌باشد. سناریو دوم بسته‌شدن ناگهانی شیر ورودی (SDV-307) و هم‌زمان از کارافتادن سیستم‌های توقف و آنتی‌سرج علت افت جریان می‌باشد. سناریو سوم و چهارم به ترتیب گرفتگی قطره‌گیر و از کارافتادن سیستم کنترل فشار و جریان و گرفتگی فیلتر قبل از کمپرسور می‌باشد. در سناریو

(1) Modelling of ignition sources on offshore oil and gas facilities



شکل ۵- آنالیز بوتای مربوط به خرابی کمپرسور



شکل ۶- آنالیز شبکه بیزین مربوط به افت جریان ورودی به کمپرسور و خرابی آن

جدول ۶- نتایج به روزرسانی رویدادهای پایه و موانع ایمنی

رویداد	توصیف	احتمال پیشین			رویداد	توصیف	احتمال پسین		
		BN <sub>PR</sub>	BT	BN <sub>POS</sub>			BN <sub>POS</sub>	BN <sub>PR</sub>	BT
X1	بسته شدن ESDV-306 در اثر خرابی	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۵۳۲	X12	خرابی سیستم حلگر منطقی منتج به ارسال دستور اشتباه از SD2-221	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۶۲۰۹
X2	خرابی PIT-322	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۰۳	X13	ورود آلودگی از بالادست به قطره گیر	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۸۷	۰/۰۶۱۷
X3	خرابی FIT-326	۰/۰۴۳۴	۰/۰۴۳۴	۰/۰۴۴۵	X14	خرابی مکانیکی قطره گیر	۰/۰۴۳۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۶۱۷
X4	خرابی SD3-321	۰/۰۲۲۰۹	۰/۰۲۲۰۹	۰/۰۸۶۱۹	X15	خرابی اجزا حلقه سیستم کنترلی	۰/۰۲۲۰۹	۰/۰۴۷۲	۰/۱۳۱۳
X5	عدم توقف کمپرسور به هنگام نیاز	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۳۷	۰/۰۵۳۶	X16	عدم ارسال سیگنال توسط PDIT-303 به علت خرابی	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۹۱	۰/۰۲۵۴
X6	خرابی FCV-601	۰/۰۲۳۴	۰/۰۲۳۴	۰/۰۷۶۷۸	X17	Commission	۰/۰۲۳۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲۷
X7	خرابی UCP	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵۷	X18	Omission	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲
X8	خرابی FCV-spill back	۰/۰۲۳۴	۰/۰۲۳۴	۰/۰۲۵۳۴	X19	خرابی مکانیکی فیلتر کمپرسور	۰/۰۲۳۴	۰/۰۱۷۳	۰/۰۹۸۰
X9	خرابی سیستم کنترل spill back	۰/۰۴۷۳	۰/۰۴۷۳	۰/۰۵۱۰۷	X20	ورود آلودگی از بالادست به فیلتر	۰/۰۴۷۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۴۹۱
X10	خرابی مکانیکی شیر توقف فرایند (SDV-306)	۰/۰۵۴۶	۰/۰۵۴۶	۰/۱۵۳۵	X21	عدم ارسال سیگنال توسط PDIT-330 به علت خرابی	۰/۰۵۴۶	۰/۰۰۹۱	۰/۱۱۹۵
X11	خرابی LIT-311 منتج به ارسال دستور اشتباه از SD2-221	۰/۰۴۳۴	۰/۰۴۳۴	۰/۱۲۲۱	X22	خطای انسانی و عدم توجه به نمایشگر PDIT	۰/۰۴۳۴	۰/۰۰۱	۰/۱۳۰۶

شبکه با استفاده از استدلال قیاسی انجام خواهد شد و احتمال پسین رویدادهای پایه و میانی<sup>۲</sup> به دست خواهد آمد ( $P_{BE|P_{TE}}=1$ ). نتایج آنالیز شبکه بیزین نشان می‌دهد مطابق با احتمالات پیشین بیشترین احتمال خرابی مربوط به X4، X12 و X10 است در حالی که نتایج احتمال پسین ترتیب X4، X6 و X12 را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین علت خرابی پیشین در رویدادهای میانی مربوط به بسته شدن SDV-306 و خرابی سیستم توقف فرایند است؛ اما نتایج احتمال پسین عکس این موارد را نشان می‌دهد. به روزرسانی شبکه تأثیری بر روی موانع ایمنی نداشته است چرا که رابطه علی مستقیم میان رویداد اصلی و موانع وجود ندارد؛ اما اثر آن بر روی پیامدها مشهود است؛ بنابراین با ایجاد یک مدل دینامیک می‌توان بر اساس شرایط خاص واحد مقدار ریسک محاسبه شده را به روزرسانی نمود. احتمالات پسین بر خلاف احتمالات پیشین که عمدتاً مبتنی بر داده‌های عمومی و دانش تخصصی هستند، بیشتر مختص حادثه مورد مطالعه هستند و ویژگی‌های واحد مورد بررسی را بهتر منعکس می‌کنند.

محاسبه گردید. باتوجه به نتایج ارزیابی ریسک دینامیک و آنالیز بوتای در جداول ۶-۸، مشاهده می‌شود که در بعضی از مقادیر احتمال محاسبه شده با استفاده از شبکه بیزین کمی متفاوت از مقادیر بوتای هستند که در مطالعه حاضر به علت دقت بیشتر شبکه بیزین در محاسبات می‌باشد. شایان ذکر است که شبکه بیزین قادر به تحلیل وابستگی میان رویدادهای پایه می‌باشد؛ اما در طول تجزیه و تحلیل استقراری برای محاسبه احتمال وقوع سناریو، یعنی قبل از به روزرسانی، تا زمانی که رویدادهای اولیه مستقل از یکدیگر هستند شبکه بیزین نتایج مشابهی با نتایج بوتای ارائه می‌دهد [۲۸]. فقط وابستگی بین رویدادهای پایه تحت شرایطی که رابطه بین آنها به گونه‌ای باشد که رخداد هر دو باهم منجر به بروز رویداد میانی بالادستی شود، یا حذف برخی رویدادهای میانی به علت قابلیت در نظر گرفتن علل مشترک احتمال وقوع در شبکه بیزین، منجر به تغییر نتایج استدلال استقراری در شبکه بیزین در مقایسه با آنالیز بوتای خواهد شد. پس از استدلال استقراری با وارد نمودن شواهد<sup>۱</sup> ( $P_{TE}=1$ ) به روزرسانی

(۱) Set Evidence

(۲) Intermediate Event

جدول ۷- نتایج به روزرسانی رویدادهای میانی و پیامدها

رویداد	توصیف	احتمال پیشین			رویداد	توصیف	احتمال پسین		
		BN <sub>PR</sub>	BT	BN <sub>POS</sub>			BN <sub>PR</sub>	BT	BN <sub>POS</sub>
IE1	خرابی حسگرها	$3/97 \times 10^{-4}$	$1/01 \times 10^{-3}$	$3/05 \times 10^{-3}$	IE10	بروز خطای انسانی	$1/55 \times 10^{-3}$	$3/97 \times 10^{-4}$	$3/05 \times 10^{-3}$
IE2	خرابی سیستم توقف فرایند	$2/32 \times 10^{-1}$	$2/32 \times 10^{-1}$	$1/58 \times 10^{-1}$	IE11	اقدام نامناسب اپراتور هنگام گرفتگی قطره گیر	$9/05 \times 10^{-1}$	$2/32 \times 10^{-1}$	$1/58 \times 10^{-1}$
IE3	خرابی سیستم back Spill	$6/96 \times 10^{-2}$	$1/14 \times 10^{-3}$	$1/08 \times 10^{-1}$	IE12	گرفتگی قطره گیر	$7/52 \times 10^{-2}$	$6/96 \times 10^{-2}$	$1/08 \times 10^{-1}$
IE4	خرابی سیستم آنتی سرچ	$2/36 \times 10^{-2}$	$2/64 \times 10^{-4}$	$1/08 \times 10^{-1}$	IE13	عدم عبور جریان از قطره گیر	$7/73 \times 10^{-1}$	$2/36 \times 10^{-2}$	$1/08 \times 10^{-1}$
IE5	قطع جریان ورودی به کل ردیفها	$1/81 \times 10^{-5}$	$1/81 \times 10^{-5}$	$1/64 \times 10^{-1}$	IE14	خرابی فیلتر کمپرسور	$8/53 \times 10^{-3}$	$1/81 \times 10^{-5}$	$1/64 \times 10^{-1}$
IE6	بسته شدن SDV-306	$2/95 \times 10^{-1}$	$1/01 \times 10^{-2}$	$1/33 \times 10^{-1}$	IE15	اقدام نامناسب اپراتور هنگام گرفتگی فیلتر کمپرسور	$8/30 \times 10^{-1}$	$2/95 \times 10^{-1}$	$1/33 \times 10^{-1}$
IE7	قطع جریان ورودی به یک ردیف	$1/62 \times 10^{-3}$	$2/63 \times 10^{-4}$	$1/24 \times 10^{-1}$	IE16	گرفتگی فیلتر کمپرسور	$7/62 \times 10^{-1}$	$1/62 \times 10^{-3}$	$1/24 \times 10^{-1}$
IE8	بروز مشکل در قطره گیر	$1/74 \times 10^{-2}$	$2/21 \times 10^{-2}$	۱	TE	وقوع سرچ در کمپرسور	$1/23 \times 10^{-1}$	$1/74 \times 10^{-2}$	$1/74 \times 10^{-2}$
IE9	عدم صدور هشدار	$5/60 \times 10^{-2}$	$2/16 \times 10^{-3}$				$1/56 \times 10^{-1}$	$5/60 \times 10^{-2}$	$5/60 \times 10^{-2}$

جدول ۸- نتایج به روزرسانی موانع ایمنی و پیامدها

رویداد	توصیف	احتمال پیشین			رویداد	توصیف	احتمال پسین		
		BN <sub>PR</sub>	BT	BN <sub>POS</sub>			BN <sub>PR</sub>	BT	BN <sub>POS</sub>
II	جرقه آبی	$7/00 \times 10^{-4}$	$1/51 \times 10^{-6}$	$7/00 \times 10^{-4}$	C1	آتش فورانی	$7/00 \times 10^{-4}$	$7/00 \times 10^{-4}$	$7/00 \times 10^{-4}$
F&G	تشخیص نشتی توسط گازسنجها	$8/00 \times 10^{-1}$	$2/15 \times 10^{-5}$	$9/95 \times 10^{-5}$	C2	انتشار گاز	$8/00 \times 10^{-1}$	$8/00 \times 10^{-1}$	$8/00 \times 10^{-1}$
ESD	سیستم توقف اضطراری فرایند	$9/90 \times 10^{-1}$	$9/58 \times 10^{-6}$	$4/43 \times 10^{-3}$	C3	آتش ناگهانی	$7/92 \times 10^{-1}$	$7/92 \times 10^{-1}$	$9/90 \times 10^{-1}$
DI	جرقه دیر هنگام	$2/13 \times 10^{-2}$	$9/98 \times 10^{-1}$	۰	C4	عدم نشت گاز	$8/53 \times 10^{-3}$	$2/13 \times 10^{-2}$	$2/13 \times 10^{-2}$

نمایش داده شده است.

نتایج به دست آمده از نشان می دهد رویداد پایه شماره ۷، ۶، ۲۱ و ۲۲ (خرابی UCP، خرابی شیر کنترل جریان آنتی سرچ (FCV-610)، عدم ارسال سیگنال توسط PDIT-330 به علت خرابی و خطای انسانی و عدم توجه اپراتور به نمایشگر (PDIT) به ترتیب دارای بیشترین درجه بحرانی هستند. این امر نقش موثر سیستم آنتی سرچ در بروز خرابی کمپرسور را نمایش می دهد بنابراین افزایش قابلیت اطمینان سیستم آنتی سرچ و بازرسی دوره ای امری ضروری است. با توجه به این مسئله که لایه حفاظتی موثری جهت جلوگیری از وقوع سرچ به هنگام بروز گرفتگی فیلتر کمپرسور وجود ندارد نیز بحرانی رویدادها ی ۲۱ و ۲۲ قابل توجه است و پیشنهاد می شود با افزودن یک فیلتر ثانویه و تعریف هشدار بر روی PDIT-330، هنگام گرفتگی فیلتر اپراتور اقدام به تغییر فیلتر کند. این امر فرایند تقویت فشار گاز را استمرار می بخشد. اجرای بازرسی روزانه فیلتر نیز موثر می باشد. پس آنالیز حساسیت و تشخیص نقاط بحرانی، معیارهای اهمیت ریسک مانند اندازه گیری اهمیت برنامه (BIM)، ارزش دستیابی به ریسک<sup>۱</sup> (RAW) و ارزش کاهش ریسک<sup>۲</sup> (RRW) به طور گسترده در تحلیل های ایمنی احتمالی برای رتبه بندی رویدادهای اساسی

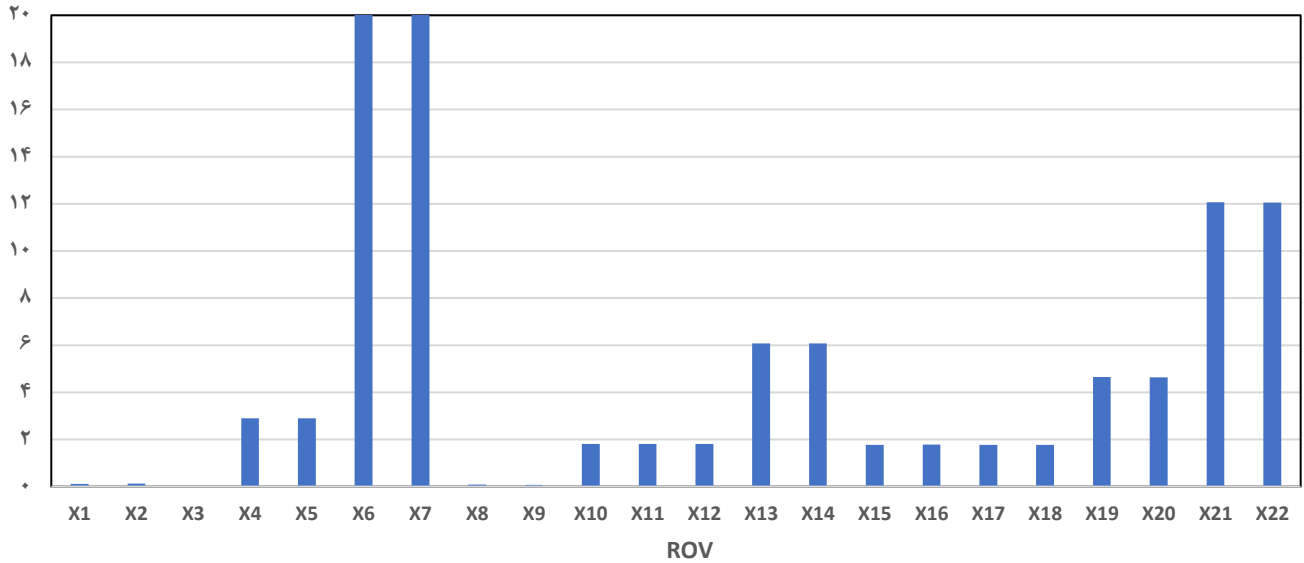
به عنوان یک گام حیاتی برای ارائه یک تصمیم گیری ایمنی مؤثر، تعیین بحرانی ترین رویدادهای پایه که در وقوع رویداد برتر نقش دارند، ضروری است. برای این منظور، تعیین احتمالات پسین رویدادهای اساسی با توجه به وقوع سناریو در بیشتر مطالعات قبلی مورداستفاده قرار گرفته است. با این حال، تحقیقات جدید بررسی کرده اند که تمرکز بر احتمالات پسین برای تعیین رویدادهای اساسی حیاتی ممکن است منجر به نتایج نادقیق شود. در عوض، ثابت شده است که نسبت تغییرات (RoV) معیاری قابل اعتمادتر برای اهمیت در تجزیه و تحلیل خرابی سیستم است. از این رو در مطالعه حاضر، RoV برای شناسایی بحرانی ترین رویدادهای ریشه ای که منجر به وقوع رویداد برتر می شود، استفاده شد. برای یک رویداد اساسی، از معادله ۴ مقدار RoV محاسبه شده است [۲۵].

$$ROV = \frac{P_{PO} - P_{PR}}{P_{PR}} \quad (4)$$

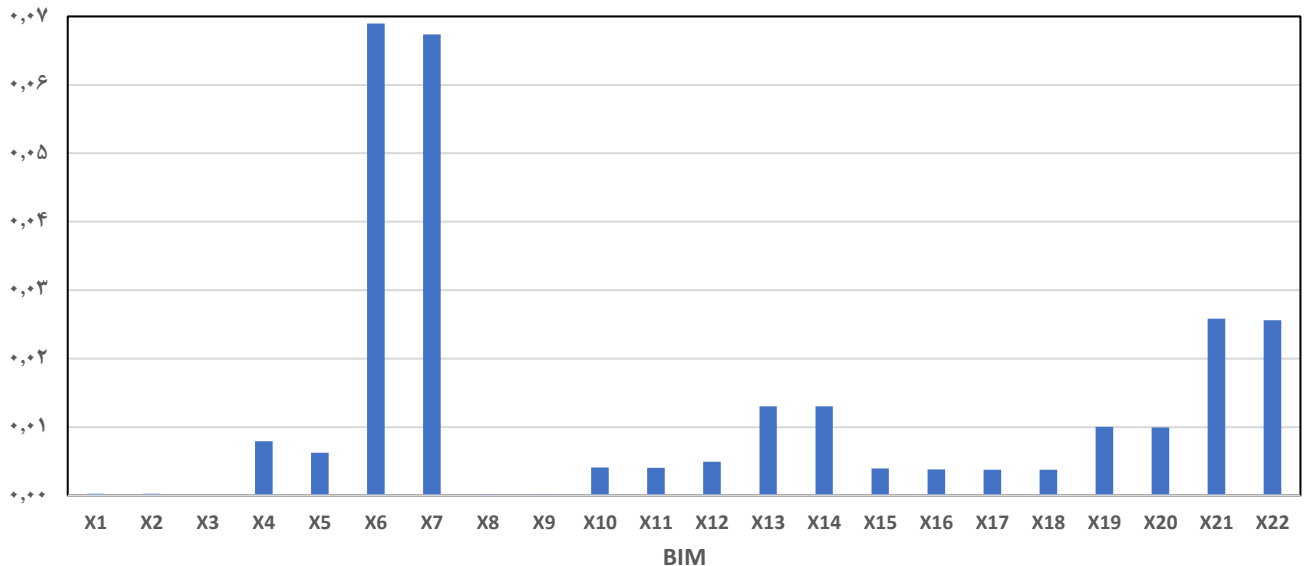
که در معادله فوق  $P_{PO}$  احتمال پسین رویداد پایه و  $P_{PR}$  احتمال پیشین می باشد. از این رو با انجام آنالیز حساسیت و محاسبه شاخص RoV رویدادهای بحرانی شناسایی شد. نتایج مربوط به آنالیز بحرانی در شکل ۷

(۱) Risk Achievement Worth

(۲) Risk reduction Worth



شکل ۷- نتایج آنالیز بحرانیت با استفاده از شبکه بیزین



شکل ۸- نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از معیار برنهام

مشروط رویداد اصلی با توجه به عملکرد درست و عملکرد نادرست  $X_i$  BIM را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد [۲۷].

$$BIM(X_i) = P(TE = fail | X_i = fail) \quad (5)$$

$$- P(TE = fail | X_i = work)$$

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نتایج محاسبه معیار برنهام املا مطابق با شاخص ROV می‌باشد و این تطابق نتایج مربوط به هر دو شاخص، نشان از صحت نتایج دارد و صحت نتایج دارد.

بر اساس سهم آنها در شکست سیستم استفاده می‌شود [۴۱]. در مطالعه حاضر، برای اعتبار سنجی کاربرد ROV در شناسایی رویدادهای اساسی حیاتی، از BIM برای شناسایی و رتبه بندی ترتیب بحرانی ترین رویدادهای اساسی که منجر به رهائش مواد از راکتور می‌گردد، استفاده می‌شود. این رویکرد در تحلیل حساسیت کلاسیک به خوبی شناخته شده است. با استفاده از BN می‌توان BIM رویدادهای پایه را به آسانی با تنظیم هر رویداد پایه به حالت‌های رخداد و عدم رخداد، در یک زمان، و محاسبه احتمال شکست شرطی رویداد اصلی محاسبه کرد. با داشتن احتمال خرابی

## نتیجه گیری

## فهرست نمادها

<b>PIRH</b>	Pressure Indicator Recorder High
<b>PIT</b>	Pressure Indicator Transmitter
<b>P<sub>PR</sub></b>	Prior Probability
<b>P<sub>PO</sub></b>	Posterior Probability
<b>PHA</b>	Preliminary Hazard Analysis
<b>PSV</b>	Pressure Safety Valve
<b>PT</b>	Pressure Transmitter
<b>QRA</b>	Quantitative Risk Assessment
<b>RO</b>	Restriction Orifice
<b>RoV</b>	Ratio of Variation
<b>RAW</b>	Risk Achievement Worth
<b>RRW</b>	Risk reduction Worth
<b>SD</b>	Shut Down
<b>SDV</b>	Shut Down Valve
<b>TIHH</b>	Temperature Indicator Alarm High High
<b>UCP</b>	Unit Control Panel
<b>PIT</b>	Pressure Indicator Transmitter
<b>BE</b>	Basic Event
<b>BIM</b>	Birnbaum Importance Measure
<b>BT</b>	Bow-tie
<b>BN</b>	Bayesian Network
<b>CCPS</b>	Center for Chemical Process Safety
<b>CPT</b>	Conditional Probability Table
<b>ESD</b>	Emergency Shut Down
<b>ESDV</b>	Emergency Shut Down Valve
<b>ETA</b>	Event Tree Analysis
<b>FCV</b>	Flow Control Valve
<b>FIT</b>	Flow Indicator Transmitter
<b>HAZOP</b>	Hazards and Operability Study
<b>IE</b>	Intermediate Event
<b>LIAHH</b>	Level Indicator Alarm High High
<b>OREDA</b>	Offshore and Onshore Reliability Database
<b>PDIT</b>	Pressure Differential Indicator Transmitter
<b>PIAHH</b>	Pressure Indicator Alarm High High
<b>PIC</b>	Pressure Indicator control

در مطالعه حاضر با استفاده از شناسایی مخاطرات فرایندی به روش HAZOP در یک ایستگاه تقویت فشار گاز، گره شامل کمپرسور به عنوان گره بحرانی شناسایی شده و پس از شناسایی رویداد اصلی در این گره بحرانی با استفاده از آنالیز بوتای، ارزیابی ریسک کمی با رویکرد بررسی خرابی‌های تجهیزات فرایندی، کنترلی و ابزار دقیق صورت گرفت. همچنین باتوجه به نقش مؤثر اپراتورها در کنترل فرایند، خطاهای انسانی که منجر به بروز خرابی در سیستم می‌شوند مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به پیچیدگی روابط میان تجهیزات فرایندی، آنالیز بوتای که یک آنالیز قدرتمند کمی مناسب جهت تشخیص علل وقوع رویداد فرایندی و پیامدهای آن است، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج عددی حاصل از ارزیابی ریسک کمی نشان می‌دهد که احتمال خرابی کمپرسور در اثر افت جریان ورودی، برابر با  $10^{-3} \times 2/163$  و احتمال وقوع آتش فورانی، آتش ناگهانی و انتشار ابر گاز ناشی از آن به ترتیب برابر با  $10^{-6} \times 1/51$ ،  $10^{-6} \times 9/58$  و  $10^{-3} \times 2/152$  است. آنالیز بوتای به علت ماهیت استاتیک خود، سطوح ریسک را در تمامی ایستگاه‌های کمپرسور با تجهیزات مشخص، یکسان تخمین می‌زند درحالی که ریسک یک پدیده دینامیک است و در شرایط متفاوت، مقدار متفاوتی خواهد داشت؛ بنابراین با ایجاد یک مدل دینامیک با استفاده از شبکه بیزین که قابلیت ورود داده‌ها و اطلاعات جدید را دارد، احتمال وقوع رویدادها به روزرسانی گردید. مطابق با احتمالات پیشین بیشترین احتمال خرابی رویدادهای پایه مربوط به خرابی SD3-321، SD2-221 و خرابی شیر توقف فرایند است درحالی که نتایج احتمال پسین به ترتیب خرابی SD3-321، شیر توقف فرایند و SD2-221 را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین علت خرابی پیشین در رویدادهای میانی مربوط به بسته شدن SDV-306 و خرابی سیستم توقف فرایند است؛ اما نتایج احتمال پسین عکس این موارد را نشان می‌دهد. سپس با انجام آنالیز حساسیت، رویدادهای بحرانی مبتنی بر نسبت تغییرات احتمال پسین و پیشین (ROV) نیز مشخص گردید. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد خرابی UCP، خرابی شیر کنترل جریان آنتی سرچ (FCV-610)، عدم ارسال سیگنال توسط PDIT-330 به علت خرابی و خطای انسانی و عدم توجه اپراتور به نمایشگر PDIT مهم‌ترین علل بروز خرابی کمپرسور می‌باشند. با افزودن لایه حفاظتی مناسب هنگام گرفتگی فیلتر کمپرسور، احتمال وقوع سرچ در کمپرسور کاهش خواهد یافت. پس از انجام آنالیز حساسیت با استفاده از معیار ROV، صحت نتایج حاصل توسط معیار برنامه نیز مورد بررسی قرار گرفت. تطابق نتایج ROV و برنامه نشان‌دهنده دقت و صحت نتایج آنالیز حساسیت است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

## مراجع

- [۱] حیرانی پ.، بقایی علی.، ارزیابی ریسک خطوط لوله انتقال نفت و گاز بر مبنای روش بوتای فازی شده، نشریه بهداشت و ایمنی کار، (۱) ۶: ۵۹ تا ۷۰ (۱۳۹۵)
- [2] Fioravanti A., De Simone G., Carpignano A., Ruzzone A., Mortarino G., Piccini M., "Compressor Station Facility Failure Modes: Causes, Taxonomy and Effects". European Commission, Joint Research Centre (JRC), (2020)
- [4] [www.shaledirectories.com](http://www.shaledirectories.com)
- [5] [350brooklyne.org](http://350brooklyne.org)
- [6] [www.theguardian.com](http://www.theguardian.com)
- [7] Chaurasia K., Patankar A., Case Study of Relief Analysis of Compressor Stations, "Mary Kay O'Connor Process Safety Center. Int. Process. Saf. Symp", Octobr 25-27, College Station, TEX, (2016).
- [8] Koulinas G., K., Demesouka O.E., Bougelis G.G., Koulouriotis D.E., Risk Prioritization in a Natural Gas Compressor Station Construction Project Using the Analytical Hierarchy Process, *Sustainability*, **14(20)**: p13172 (2022).
- [9] Pittman W., Heaney C., Scoggins J., Hazard Mapping Case Study on a Compressor House, "Mary Kay O'Connor Process Safety Center. Int. Process. Saf. Symp", Octobr 25-27, College Station, TEX, (2018).
- [10] Zhou D., Zhang H., Li Y., Weng Sh., A Dynamic Reliability-Centered Maintenance Analysis Method for Natural Gas Compressor Station Based on Diagnostic and Prognostic Technology, *J. Eng. Gas Turb. Pow.*, **138(6)**: 061601 (2016).
- [11] Zhu X.-P., Liang W., Shi G., A Quantitative Comprehensive Safety Evaluation Method for Centrifugal Compressors Using FMEA-fuzzy Operations, "Int. Symp. Instr. Meas. Sens. Net. Aut.(IMSNA)", December 23-24, Toronto, ONT (2013).
- [12] Zhu J.F., Fault Tree Analysis of Centrifugal Compressor, *J. Key. Eng. Mat.*, **474(2)**: 1587-1590 (2011).
- [13] Acton M.R., Cleaver R.P., Baldwin P.J., McCollum D.J., Methods for Assessing Risks at Above Ground Installations. " ASME Int. Pip. Conf. ", October 4-8, Calgary, Alb ( 2004).
- [14] Cleaver R.P., Maycock K., Halford A.R., Potts S.J., McCollum D.J., Sadd A. W.T., Acton M.R. Risk Evaluation at Natural Gas Compressor Stations and Above Ground Installations, " ASME Int. Pip. Conf.", September 24-28, Calgary, Alb (2012).
- [۱۵] اصفهانی ح.، کاربرد تحلیل درخت خطا ۱ در یک واحد تقویت فشار گاز، "همایش ملی مهندسی ایمنی و مدیریت HSE"، هجدهم اسفند، تهران، ایران (۱۳۸۸).

- [۱۶] خاتمی فیروزآبادی س.ع.، خرم‌روز ع.، تعیین نقاط حساس نشستی در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز با استفاده از تحلیل درخت خطا، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی (۲۸): ۴۶ تا ۷۰ (۱۳۸۵).
- [17] Mocellin P., De Tommaso J., Vianello Ch., Maschio G., Saulnier-Bellemare Th., Virla L.D., Patience G.S., [Experimental Methods in Chemical Engineering: Hazard and Operability Analysis—HAZOP](#), *Chem. Eng.*, **100(12)**: 3450-3469 (2022).
- [18] Puello J., Gómez S., Ruiz I., Lombana S., Figueroa S., [Application of HAZOP, LOPA and SIL to an Alkylation Unit in a Refinery: A Case Study](#). *Chemical Engineering Transactions, Chem. Eng. Trasacation(CEt)*, **82**: 343-348 (2020).
- [19] Riad B., Elarkam M., Ilhem B., Hayett A., [Risk Asseessment For LPG Storage Tanks Area In Skikda Refinery-ALGERIA Using D-Higraph And Hazop Methods & Simulation Of Dangerous Scenarios Using ALOHA Software](#), "IEEE. Int. Conf. Ele.l Eng (ICEE)", September 25-27, Istanbul, Turk (2020).
- [20] Zerrouki H., [Risk Assessment of a Liquefied Natural Gas Process Facility Using Bow-Tie and Bayesian Networks](#), *AIChE. Process. Saf. Prog.*, **41(3)**: 480-491 (2022).
- [21] Hosseini N., Givhechi S., Maknoon R., [Cost-Based Fire Risk Assessment in Natural Gas Industry by Means of fuzzy FTA and ETA](#), *Int. J. Loss. Prev. Process. Ind.*, **63**: 104025 (2020).
- [22] Domínguez R., Gomez C., Cerezo O., [Risk Analysis Based on ETA, FTA and Bowtie Methodologies for the Bulk Coal Discharge Process](#). in *Advances in Safety Management and Human Performance*, "Springer. Int. Conf. Appl. Hum. Fact. Ergonom ( AHFE)", July 25-29, USA (2021)
- [23] Pirbalouti R.G., Karimi Dehkordi M.R., Mohammadpour J., Zarei E., Yazdi M., [An Advanced Framework for Leakage risk Assessment of Hydrogen Refueling Stations Using Interval-Valued Spherical Fuzzy Sets \(IV-SFS\)](#). *Int. J.Hyd. Enrg.* (2023).
- [۲۴] برقی پور ه.، منظمی تهرانی غ.، عباس‌زاده تهرانی ن.، نصیری لمر س.، نکویی اصفهانی آ.، محمد فام ا.، ارزیابی و مدیریت ریسک خطرات HSE واحد کلرژنی نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از روش‌های HAZOP و Bow-Tie، فصلنامه بهداشت کار و ارتقا سلامت، (۲۸): ۳ تا ۱۳۴ ۱۴۵ (۱۳۹۸).
- [25] Rostamabadi A., Jahangiri M., Zarei E., Kamalinia M., Alimohammadlou M., [A Novel Fuzzy Bayesian Network approach for safety analysis of process Systems; An Application of HFACS and SHIPP Methodology](#), *J.Clean. Prod.*, **244**: 118761 (2020).
- [26] Zarei E., Azadeh A., Mirzaei Aliabadi M., Mohammadfam I., [Dynamic Safety Risk Modeling of Process Systems Using Bayesian Network](#), *AIChE, Process. Saf. Prog.*, **36(4)**: 399-407 (2017).
- [27] Zarei E., Azadeh A., Kkakzad N., Mirzaei Aliabadi M., Mohammadfam I., [Dynamic Safety Assessment of Natural Gas Stations Using Bayesian Network](#), *J. hazard. mater.*, **321**: 830-840 (2017).
- [28] Khakzad N., Khan F., Amyotte P., [Safety Analysis in Process Facilities: Comparison of Fault Tree and Bayesian Network Approaches](#), *Reliab. Eng. Sys. Saf.*, **96(8)**: 925-932 (2011).
- [29] Macdonald D., "Practical Hazops, Trips and Alarms". Elsevier (2004)



- [30] CCPS., "Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety". Wiley-AIChE. New York (2018)
- [31] Ferdous R., Khan h.F., Sadiq R., Amyotte P., Veitch B., *Analyzing System Safety and Risks Under Uncertainty Using a Bow-Tie Diagram: An Innovative Approach*, *Process. Saf. Environ. Prot.*, **91(1-2)**: 1-18 (2013).
- [۳۲] مسعودی آشتیانی ا.، برادران س.، کاظمی آشتیانی ی.، فاتحی آ.، پولادی ب. نجومی ع.، همتمی م.، تعیین و ارزیابی سطح بی نقصی ایمنی، انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی تهران، ص. ۱۰۹ (۱۳۹۶).
- [33] Schüller J.C.H., Brinkman, J.L., Van Gestel P.J., van Otterloo R.W., "Methods for Determining and Processing Probabilities". Committee for Prevention of Disasters Second edition, The Hague. The Netherlands (2005)
- [34] SINTEF. "Offshore Reliability Data Handbook". OREDA participants (2015)
- [35] Swain A., Guttman H., "Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications". NUREG/CR-1278. USNRC Washington. (1983)
- [36] Domínguez R., Gomez C., Cerezo O., *Risk Analysis Based on ETA, FTA and Bowtie Methodologies for the Bulk Coal Discharge Process*, "Springer.Int. Conf. App. Hum. Fact. Ergon.(AHFF)", July 25-29, USA (2021).
- [37] Pouyakian M., Javad Jafari M., Laal F., Nourai F., Zarei E., *A Comprehensive Approach to Analyze the Risk of Floating Roof Storage Tanks*, *Process. Saf. Environ. Prot.*, **146**: 811-83 (2021).
- [38] Zarei E., Khakzad N., Cozzani V., Reniers G., *Safety Analysis of Process Systems Using Fuzzy Bayesian Network (FBN)*, *J. loss. prev. process indu.*, **57**: 7-16 (2019).
- [39] Malika M., Bouzaouit A., Lakhdar K., Bennis O., *Transformation of Fault Tree Into Bayesian Network Methodology for Fault Diagnosis*. *J. Mechanics.*, **23(6)**: 891-899 (2017).
- [40] International Association of Oil and Gas Producers. "Risk Assessment Data Directory–Ignition Probabilities". London, UK. (2010).
- [41] Rausand M., "Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications". John Wiley & Sons, University of Science and Technology Trondheim, Norway (2014).