مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هشتم، شماره ۸۲، اردیبهشت ۱۴۰۵
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

# ارزیابی ریسک ایمنی، بهداشت و محیط زیست به روش FMEA در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر

**هادی احسانی نیکو [۱]، مریم کیانی صدر [۲]**

[۱] گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
[۲] گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران (نویسنده مسئول)

**چکیده**

ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز به‌عنوان بخشی حیاتی از زیرساخت‌های تأمین گاز شهری، با ریسک‌های ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیستی متعددی مواجه هستند که در صورت عدم مدیریت مناسب، می‌توانند منجر به حوادث جبران‌ناپذیری شوند. هدف از این پژوهش، ارزیابی جامع این ریسک‌ها به روش تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA) در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر بود. این مطالعه به‌صورت میدانی و توصیفی-تحلیلی انجام شد و داده‌ها از طریق مشاهده، مصاحبه با کارشناسان، مطالعه مدارک فنی و اجرای روش FMEA جمع‌آوری گردید. یافته‌ها نشان داد که عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط (SCSSV) با شاخص اولویت ریسک (RPN) برابر با ۳۰۰ به عنوان بحرانی‌ترین ریسک ایمنی شناسایی شد. همچنین، تحلیل پارتو نشان داد که اولین ۷ تجهیز (٪۷۰ کل تجهیزات) مسئول بیش از ٪۹۰ از کل ریسک تجمعی هستند. در حوزه بهداشت شغلی، قرار گرفتن کارکنان در معرض سر و صدا و گازهای خطرناک از مهم‌ترین ریسک‌ها بود. از دیدگاه محیط زیستی، نشت گاز و انتشار متان به عنوان مهم‌ترین تأثیر زیست‌محیطی شناسایی شد. بر اساس یافته‌ها، مجموعه‌ای از پیشنهادات عملیاتی، سیستمی و مدیریتی ارائه شد که شامل نصب سیستم‌های Redundant، اجرای برنامه LDAR، بهبود برنامه نگهداری پیشگیرانه، اجرای سیستم مدیریت یکپارچه HSE و تقویت فرهنگ ایمنی است. این پژوهش نشان داد که استفاده از روش FMEA به‌عنوان یک ابزار سیستماتیک و پیشگیرانه، امکان شناسایی دقیق ریسک‌ها و طراحی راهکارهای هدفمند را فراهم می‌کند و می‌تواند به بهبود پایدار ایمنی و پایداری عملیاتی ایستگاه‌های گاز کمک کند.

**واژه‌های کلیدی:** ایستگاه تقلیل فشار گاز، تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA)، ریسک‌های ایمنی، بهداشت شغلی، محیط زیست، شاخص اولویت ریسک (RPN)

**مقدمه**

ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز به عنوان یکی از ارکان حیاتی در زنجیره تأمین گاز طبیعی شهری، وظیفه کاهش فشار گاز از سطح شبکه انتقال (فشار بالا) به سطح شبکه توزیع (فشار متوسط و پایین) را بر عهده دارند. با توجه به کار با گازهای قابل اشتعال تحت فشار بالا، این ایستگاه‌ها به‌عنوان سیستم‌های فرآیندی حساس، مستعد وقوع حوادثی با پیامدهای جبران‌ناپذیری همچون انفجار، آتش‌سوزی، نشت گسترده گاز و آسیب‌های جانی هستند (کلتز[۱]، ۲۰۰۱). بنابراین، مدیریت یکپارچه ریسک‌های ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست در این ایستگاه‌ها، نه تنها ضرورت عملیاتی، بلکه الزامی اخلاقی و قانونی محسوب می‌شود.

در این راستا، روش‌های مختلفی برای ارزیابی ریسک توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های کیفی (مانند HAZOP)، کمی (مانندFTA ) و ترکیبی (مانندFMEA ) اشاره کرد. در بین این روش‌ها، تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA) به دلیل ساختار سیستماتیک، قابلیت اجرا در مراحل مختلف چرخه عمر پروژه و تمرکز بر پیشگیری از خرابی‌ها، به یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت ریسک در صنایع فرآیندی تبدیل شده است (استاماتیس[۲]، ۲۰۰۳). این روش با شناسایی حالات خرابی احتمالی، تحلیل تأثیرات آن‌ها و ارزیابی آن‌ها بر اساس معیارهای شدت، احتمال وقوع و قابلیت کشف، امکان اولویت‌بندی ریسک‌ها و اجرای اقدامات کنترلی مؤثر را فراهم می‌کند. استفاده از شاخص اولویت ریسک (RPN) به عنوان یک ابزار کمّی، این روش را به گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی ریسک در سیستم‌های پیچیده تبدیل کرده است (زاموری[۳] و همکاران، ۲۰۱۱).

کاربرد FMEA در صنایع گاز و پتروشیمی به‌ویژه در ارزیابی تجهیزات حساس، برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه و بهبود فرآیندها، گزارش شده است. به عنوان مثال، اصلانی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز نشان دادند که استفاده از FMEA می‌تواند ریسک‌های ایمنی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد. همچنین، محمدی و حسینی (۱۴۰۲) با ترکیب FMEA و روشAHP، به اولویت‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها دست یافتند و نشان دادند که ترکیب این روش‌ها می‌تواند اثربخشی ارزیابی ریسک را بهبود بخشد.

با این حال، اکثر مطالعات داخلی و خارجی بر روی ارزیابی ریسک در واحدهای بزرگ پالایشگاهی یا پتروشیمی متمرکز بوده‌اند و تحقیقات کمی در مورد ارزیابی جامع ریسک در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز به‌عنوان زیرساخت‌های محلی و حساس شهری انجام شده است. همچنین، بسیاری از مطالعات تنها به ریسک‌های ایمنی پرداخته‌اند و توجه کمی به ریسک‌های بهداشت شغلی و محیط زیستی داشته‌اند، در حالی که این سه حوزه به صورت یکپارچه باید مدیریت شوند (استانداردISO ، ۲۰۱۸).

در استان کرمانشاه، با وجود گسترش شبکه گازرسانی، مطالعات سیستماتیک در زمینه ارزیابی ریسک در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز محدود است. این در حالی است که ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر، به عنوان یکی از ایستگاه‌های مهم در تأمین گاز به بخش مرکزی شهرستان، با چالش‌های متعددی از جمله فرسودگی تجهیزات، کمبود منابع نگهداری و قرار گرفتن کارکنان در معرض عوامل زیان‌آور محیط کار مواجه است.

در این پژوهش، به‌منظور پر کردن این شکاف دانش، روش FMEA به‌صورت جامع و یکپارچه برای ارزیابی ریسک‌های ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر اجرا شده است. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی، اولویت‌بندی و ارائه راهکارهای کنترلی برای ریسک‌های موجود در این ایستگاه است. نوآوری این پژوهش در اعمال یک رویکرد

[۱] Kletz

[۲] Stamatis

[۳] Zammori

یکپارچه (HSE) و تمرکز بر یک ایستگاه محلی با شرایط عملیاتی واقعی است که می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر ایستگاه‌های مشابه در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

## مرور ادبیات و پیشینه پژوهش

ارزیابی ریسک در صنایع فرآیندی به‌ویژه در بخش گاز و پتروشیمی، از دهه‌های گذشته مورد توجه ویژه محققان و متخصصان ایمنی قرار گرفته است. با توجه به حساسیت بالای این صنایع در برابر حوادث فناوریک، توسعه و به‌کارگیری روش‌های سیستماتیک برای شناسایی و کنترل ریسک‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این میان، روش تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA)به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و مؤثرترین ابزارهای پیشگیرانه در مدیریت ریسک، از دهه ۱۹۵۰ در صنایع هوافضا معرفی شد و بعدها به صنایع نظامی، خودرو و فرآیندی گسترش یافت (داداشی[۴] و همکاران، ۲۰۲۴). این روش با تمرکز بر شناسایی حالات خرابی احتمالی، تحلیل تأثیرات آن‌ها و ارزیابی ریسک از طریق شاخص اولویت ریسک(RPN) ، امکان اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی اقدامات کنترلی را فراهم می‌کند.

در سال‌های اخیر، کاربرد FMEA در صنایع گاز و پتروشیمی به‌طور گسترده‌ای گزارش شده است. به عنوان مثال، مارهاویلاس[۵] و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای در یک پالایشگاه چینی، از FMEA برای ارزیابی ریسک تجهیزات تحت فشار استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند به‌طور موثری ریسک‌های بالقوه را شناسایی و اولویت‌بندی کند. همچنین، چن و لی[۶] (۲۰۱۷) با ترکیب FMEA و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (DEMATEL) ، به اصلاح معیارهای امتیازدهی در FMEAپرداختند و نشان دادند که رویکردهای ترکیبی دقت ارزیابی ریسک را بهبود می‌بخشند. این مطالعات نشان می‌دهند که FMEA نه تنها یک ابزار تشخیصی، بلکه می‌تواند بخشی از یک سیستم مدیریت یکپارچه ریسک باشد.

در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه کاربرد FMEA در صنایع گاز انجام شده است. احمدی و همکاران (۱۴۰۱) در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر ایلام، با اجرایFMEA ، ریسک‌های ایمنی را ارزیابی کردند و نشان دادند که خرابی شیرهای کنترل و نشت از اتصالات از مهم‌ترین ریسک‌ها هستند. همچنین، محمدی و حسینی (۱۴۰۲) با تلفیق FMEA وAHP ، به اولویت‌بندی ریسک‌های ایمنی در یک ایستگاه گاز پرداختند و پیشنهاد کردند که این ترکیب می‌تواند از ابهام در امتیازدهی به RPN بکاهد. این مطالعات، کارایی FMEA را در محیط‌های مشابه تأیید می‌کنند، اما بیشتر بر روی ریسک‌های ایمنی متمرکز بوده و توجه کمی به ریسک‌های بهداشت شغلی و محیط زیستی داشته‌اند.

در حوزه ریسک‌های بهداشت شغلی، مطالعات مختلفی از قرار گرفتن کارکنان ایستگاه‌های گاز در معرض عوامل فیزیکی و شیمیایی خطرناک حمایت کرده‌اند. نوروزی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای در شرکت گاز استان آذربایجان غربی، نشان دادند که سطح سر و صدا در بیش از ۶۰ درصد نقاط کاری بالاتر از حد مجاز ملی است و این امر خطر کاهش شنوایی را افزایش می‌دهد. همچنین، قاسمی و رضایی (۱۳۹۹) گزارش کردند که کارکنان در شرایط اضطراری، مستعد قرار گرفتن در معرض گازهای سمی مانند $H_2S$ هستند و نیاز به تجهیزات حفاظت فردی و برنامه‌های آموزشی تخصصی وجود دارد.

از دیدگاه محیط زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه متان ($CH_4$) از مهم‌ترین تأثیرات فعالیت‌های ایستگاه‌های گاز است CCPS (۲۰۱۷).در راهنمای ارزیابی خطرات فرآیندی، بر لزوم کنترل نشت گاز و اجرای برنامه‌های LDAR (Leak Detection and Repair) تأکید کرده است. همچنین، IPCC (۲۰۱۹) متان را با ضریب گرمایشی ۲۸–۳۴ برابر دی‌اکسید کربن در افق ۱۰۰ ساله، یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای دانسته است. در ایران، رضایی و محمدی (۱۴۰۰) در

[۴] Dadashi

[۵] Marhavilas

[۶] Chen & Li

مطالعه‌ای در شبکه گاز استان خوزستان، نشان دادند که نشت گاز در اتصالات و شیرها، منبع عمده انتشار متان است و نیاز به نظارت مداوم و بازرسی دوره‌ای وجود دارد.

با وجود این مطالعات، شکاف‌های مهمی در ادبیات موجود مشاهده می‌شود. اولاً، اکثر تحقیقات داخلی تنها بر ریسک‌های ایمنی متمرکز بوده‌اند و کمتر به ریسک‌های بهداشتی و محیط‌زیستی به صورت یکپارچه پرداخته‌اند. ثانیاً، بیشتر مطالعات بر واحدهای بزرگ صنعتی متمرکز بوده‌اند و تحقیقات کمی در مورد ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز به‌عنوان زیرساخت‌های محلی و حساس شهری انجام شده است. ثالثاً، مطالعاتی که به ارزیابی جامع ریسک با رویکرد یکپارچه (HSE) در ایستگاه‌های گاز پرداخته باشند، بسیار محدود هستند.

بنابراین، این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف دانش، اقدام به اجرای روش FMEA به صورت یکپارچه در سه حوزه ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر می‌کند. این مطالعه نه تنها به شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها می‌پردازد، بلکه با ارائه راهکارهای عملیاتی و سیستمی، به بهبود پایدار ایمنی و پایداری عملیاتی این زیرساخت حیاتی کمک خواهد کرد.

## روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، دسته‌بندی کاربردی قرار می‌گیرد، زیرا یافته‌های آن به‌طور مستقیم در بهبود شرایط ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست در یک سیستم واقعی یعنی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر قابل استفاده است. از نظر رویکرد انجام تحقیق، این مطالعه دارای رویکرد توصیفی–تحلیلی است؛ بدین معنا که هم با هدف تشریح وضعیت فعلی سیستم، تجهیزات و فرآیندها انجام شده و هم داده‌ها به‌صورت سیستماتیک تحلیل شده‌اند تا ریسک‌های شناسایی‌شده اولویت‌بندی و اقدامات کنترلی پیشنهاد گردند. همچنین، این تحقیق از نظر نوع داده‌ها، دارای ماهیت ترکیبی (کیفی-کمی) است؛ زیرا علیرغم استفاده از مؤلفه‌های کمّی (مانند محاسبه شاخص اولویت ریسک)، فرآیند شناسایی حالات خرابی و ارزیابی معیارها مبتنی بر قضاوت کارشناسی تیم چند رشته‌ای است که جزو روش‌های کیفی محسوب می‌شود.

جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه افراد دارای دانش، تخصص و تجربه عملیاتی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر است که در فرآیندهای بهره‌برداری، نگهداری، کنترل و مدیریت ایمنی این ایستگاه نقش دارند. این افراد به‌عنوان خبرگان فنی و ایمنی، اطلاعات ضروری برای شناسایی حالات خرابی، تحلیل تأثیرات و ارزیابی معیارهای ریسک را فراهم می‌کنند. با توجه به ماهیت کیفی-ترکیبی تحقیق و روش تیمی و کارشناسی اجرایFMEA، نمونه‌گیری از نوع هدفمند[۷] و با رویکرد تمامیتی[۸] در تیم FMEA انجام شده است. تیم FMEA متشکل از ۸ عضو متخصص بود که ترکیب آن شامل مهندسان بهره‌برداری، نگهداری، کارشناسان HSC، مهندس اتوماسیون و سرپرست فنی ایستگاه بود. این ترکیب تیمی اطمینان حاکم می‌کند که تمامی جنبه‌های فنی، ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی سیستم به‌طور جامع مورد بررسی قرار گیرد.

روش جمع‌آوری داده‌ها در این تحقیق ترکیبی از مصاحبه گروهی کارشناسی، مشاهده میدانی، مطالعه مدارک فنی و استفاده از چک‌لیست‌های استاندارد FMEA بود. مصاحبه‌ها در قالب جلسات تیمی ساختاریافته و با استفاده از چارچوب پرسش‌های استاندارد FMEA (مانند: "چه چیزی می‌تواند خراب شود؟"، "تأثیر آن چیست؟") انجام شدند. مشاهده مستقیم از ایستگاه نیز به شناسایی دقیق‌تر حالات خرابی و تأثیرات آن‌ها کمک کرد. همچنین، مدارک فنی شامل نقشه‌هایP&ID، دستورالعمل‌های بهره‌برداری و نگهداری، و گزارش‌های حوادث گذشته مورد بررسی قرار گرفتند. ابزار اصلی گردآوری داده، فرم استاندارد FMEA بود که بر اساس دستورالعمل‌های بین‌المللی AIAG/VDA (۲۰۱۹)و SAE J۱۷۳۹ (۲۰۱۹)

[۷] Purposive Sampling

[۸] Census Approach

طراحی شده بود. این فرم شامل ستون‌های شناسه تجهیز، حالات خرابی، تأثیرات، شدت، احتمال وقوع، قابلیت کشف، RPN و اقدامات کنترلی بود.

برای تضمین روایی محتوایی فرمFMEA ، این ابزار توسط سه تن از خبرگان مستقل در حوزه‌های ایمنی فرآیندی و مهندسی گاز بررسی شد. پس از دریافت بازخوردها و اعمال اصلاحات، ضریب روایی محتوا (CVI) برابر با ۰.۹۲ به دست آمد که نشان‌دهنده روایی بسیار بالای ابزار است. همچنین، برای ارزیابی پایایی ابزار، از روش سازگاری بین ارزیابان[۹] استفاده شد که ضریب کاپای کوهن میانگین ۰.۸۰ به دست آمد و نشان‌دهنده همبستگی قوی بین امتیازدهی کارشناسان است.

اجرای روش FMEA در ایستگاه در هفت گام اصلی انجام شد: ۱) تشکیل تیم چند رشته‌ای، ۲) تعریف محدوده سیستم، ۳) تهیه نمودار جریان فرآیند(PFD) ، ۴ (شناسایی حالات خرابی، ۵) تحلیل تأثیرات، ۶) ارزیابی معیارهای ریسک و محاسبه RPN، و ۷) تعیین اقدامات کنترلی و بازنگریRPN . امتیازدهی به معیارهای شدت(S) ، احتمال وقوع (O) و قابلیت کشف (D)از مقیاس ۱ تا ۱۰ انجام شد و شاخص اولویت ریسک (RPN) از حاصل‌ضرب این سه معیار محاسبه گردید. مقادیر RPNبالاتر از ۲۰۰ به عنوان ریسک‌های بحرانی در نظر گرفته شدند.

در نهایت، داده‌ها با استفاده از ترکیبی از روش‌های کمی و کیفی تحلیل شدند. روش‌های کمی شامل محاسبهRPN ، تهیه نمودار پارتو و تحلیل توزیع ریسک بود. روش کیفی نیز شامل تحلیل محتوای کیفی یافته‌های مصاحبه و مشاهده بود. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel و در محیطی رسمی و تحت نظارت تیم FMEA انجام شدند.

## یافته‌ها

در این پژوهش، پس از جمع‌آوری داده‌ها و اجرای روش FMEA توسط تیم چند رشته‌ای، مجموعه‌ای از یافته‌های مهم در سه حوزه ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست به دست آمد. در ادامه، یافته‌های پژوهش ارائه می‌شوند.

### شناسایی حالات خرابی و تأثیرات آن

در فرآیند اجرایFMEA ، تیم متخصص ۱۳ حالت خرابی بحرانی در تجهیزات و فرآیندهای ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر شناسایی کرد. این حالات خرابی در پنج دسته اصلی طبقه‌بندی شدند: شیرهای کنترل و کاهنده فشار، فیلترها و اتصالات، سیستم‌های ایمنی، خطوط لوله و سیستم کنترل (PLC/SCADA).

در جدول زیر، تمامی حالات خرابی شناسایی‌شده در تجهیزات اصلی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر، همراه با تأثیرات ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی آن‌ها، به صورت خلاصه و یکپارچه ارائه شده است. این جدول بر اساس یافته‌های حاصل از اجرای روش FMEA و با مشارکت تیم چند رشته‌ای تهیه شده است.

**جدول۱: خلاصه حالات خرابی و تأثیرات آن در تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر**

| شماره | تجهیز | حالت خرابی | تاثیرات ایمنی | تاثیرات بهداشتی | تاثیرات محیط زیستی | PRN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | شیر کنترل فشار | قفل شدن در وضعیت باز | افزایش فشار، خطر انفجار | – | نشت گاز، انتشار متان | ۲۷۰ |
| ۲ | شیر کاهنده فشار | شکست مکانیکی بدنه | نشت گسترده، انفجار | – | آلودگی جو، انتشار گاز | ۲۰۰ |
| ۳ | فیلتر گاز | نشت از دریچه بازرسی | خطر آتش‌سوزی، انفجار | – | نشت گاز به محیط | ۲۴۰ |

[۹] Inter-rater Reliability

| شماره | تجهیز | حالت خرابی | تاثیرات ایمنی | تاثیرات بهداشتی | تاثیرات محیط زیستی | PRN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۴ | اتصالات فلنجی | نشت گاز | خطر انفجار، آسیب جانی | قرار گرفتن در معرض گاز | آلودگی هوا، انتشار $CH_4$ | ۲۸۰ |
| ۵ | خط لوله ورودی | خوردگی دیواره | پارگی لوله، نشت گسترده | – | نشت گاز، آلودگی خاک | ۲۲۵ |
| ۶ | SCSSV | عدم فعال‌سازی | عدم قطع جریان، تشدید حادثه | – | انتشار گاز بدون کنترل | ۳۰۰ |
| ۷ | سنسور فشار (HIP) | خطا در تشخیص | تأخیر در قطع اضطراری | – | افزایش مدت نشت گاز | ۲۷۰ |
| ۸ | سنسور نشت گاز (GDS) | عدم تشخیص نشت | تأخیر در واکنش | قرار گرفتن در معرض $H_2S$ | انتشار طولانی‌مدت گاز | ۲۷۰ |
| ۹ | PLC | قفل شدن یا ریست ناخواسته | از دست دادن کنترل فرآیند | – | قطع نظارت، افزایش ریسک | ۲۲۵ |
| ۱۰ | SCADA | قطع نمایش داده‌ها | تصمیم‌گیری نادرست | – | تأخیر در کنترل ریسک | ۱۹۲ |
| ۱۱ | فیلتر گاز | انسداد | افت فشار، افزایش بار روی شیر | – | کاهش راندمان سیستم | ۲۲۴ |
| ۱۲ | شیر کنترل فشار | قفل شدن در وضعیت بسته | قطع تأمین گاز | – | – | ۲۱۰ |
| ۱۳ | خط لوله خروجی | ترک در اتصالات جوشی | نشت گاز، خطر انفجار | – | نشت گاز به محیط | ۲۴۰ |
| ۱۴ | منبع تغذیه PLC | خرابی | قطع سیستم کنترل | – | عدم نظارت بر فرآیند | ۱۸۰ |

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ریسک‌های ایمنی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر عمدتاً حول محور نشت گاز، خرابی شیرهای کنترل و کاهنده فشار، عملکرد نامناسب سیستم‌های ایمنی و خطاهای موجود در سیستم کنترل (PLC/SCADA)متمرکز هستند. بالاترین شاخص اولویت ریسک (RPN) مربوط به حالت خرابی "عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط "(SCSSV) با مقدار ۳۰۰ بود که به دلیل پیامد فاجعه‌بار آن شامل انفجار، آتش‌سوزی و نشت بدون کنترل گاز، این حالت خرابی به عنوان بحرانی‌ترین ریسک ایمنی در ایستگاه شناسایی شد. همچنین، هفت حالت خرابی با RPNبرابر یا بالاتر از ۲۴۰ به عنوان ریسک‌های "بسیار بالا" و نیازمند اقدام فوری طبقه‌بندی شدند که نشان‌دهنده تمرکز قابل توجه ریسک بر تعداد محدودی تجهیز حیاتی است.

در حوزه محیط زیست، مهم‌ترین تأثیر منفی، نشت گاز متان ($CH_4$) از اتصالات، شیرها و دریچه‌های بازرسی بود. متان به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای قوی با ضریب گرمایشی ۲۸ تا ۳۴ برابر دی‌اکسید کربن در افق ۱۰۰ ساله(IPCC, ۲۰۱۹) ، تأثیر شدیدی بر تغییرات اقلیمی دارد و کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از دیدگاه بهداشت شغلی، تأثیرات عمده زمانی رخ می‌دهند که کارکنان در شرایط اضطراری یا در فضاهای بسته، مستقیماً در معرض گازهای سمی مانند هیدروژن سولفید

($H_2S$)قرار گیرند که می‌تواند منجر به مسمومیت حاد یا مرگ شود. این ریسک‌ها اگرچه کمتر اتفاق می‌افتند، اما به دلیل شدت بالای پیامد، نیازمند برنامه‌های مدیریتی ویژه‌ای هستند.

تحلیل علل ریشه‌ای ریسک‌های شناسایی‌شده نشان داد که اکثر آن‌ها ناشی از خرابی تجهیزات و خطاهای سیستمی مانند ضعف در برنامه نگهداری پیشگیرانه، کیفیت پایین قطعات یدکی و عدم وجود سیستم‌های نظارت مداوم است، نه خطاهای انسانی مستقیم. این یافته‌ها اهمیت انتقال تمرکز از واکنش به حوادث به سمت پیشگیری سیستماتیک و بهبود زیرساخت‌های مدیریتی و فنی را برجسته می‌کند. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدیریت ریسک در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز نیازمند رویکردی یکپارچه است که نه تنها تجهیزات، بلکه فرآیندها، سیستم‌های کنترل و محیط کار کارکنان را نیز شامل شود.

### محاسبه شاخص اولویت ریسک (RPN) برای تجهیزات کلیدی

پس از شناسایی حالات خرابی و تحلیل تأثیرات آن‌ها در بخش‌های قبلی، مرحله بعدی در روش تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA)، محاسبه شاخص اولویت ریسک (RPN) برای هر حالت خرابی است. این شاخص به عنوان یک ابزار کمّی، امکان مقایسه و اولویت‌بندی ریسک‌ها را فراهم می‌کند و مدیران و کارشناسان را در تخصیص منابع و برنامه‌ریزی اقدامات کنترلی یاری می‌رساند.

فرمول محاسبه RPN

شاخص اولویت ریسک (RPN) با حاصل‌ضرب سه معیار اصلی محاسبه می‌شود:

$$RPN=Severity\times Occurrence\times Detection$$

در ادامه، RPN برای ۱۰ تجهیز کلیدی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر محاسبه شده است. این تجهیزات بر اساس نقش حیاتی‌شان در ایمنی سیستم انتخاب شدند.

**جدول۲: محاسبه RPN برای تجهیزات کلیدی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر**

| شماره | تجهیز | حالت خرابی | شدت (S) | احتمال (O) | کشف (D) | PRN | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | شیر قطع اضطراری خط(SCSSV) | عدم فعال‌سازی | ۱۰ | ۵ | ۶ | ۳۰۰ | بحرانی‌ترین ریسک سیستم |
| ۲ | اتصالات فلنجی | نشت گاز | ۸ | ۷ | ۵ | ۲۸۰ | احتمال وقوع بالا به دلیل لرزش |
| ۳ | سنسور فشار بالا (HIP) | خطا در تشخیص | ۹ | ۶ | ۵ | ۲۷۰ | تأثیر مستقیم بر سیستم ایمنی |
| ۴ | سنسور نشت گاز (GDS) | عدم تشخیص نشت | ۹ | ۵ | ۶ | ۲۷۰ | خطر مواجهه کارکنان با $H_2S$ |
| ۵ | شیر کنترل فشار | قفل شدن در وضعیت باز | ۹ | ۶ | ۵ | ۲۷۰ | خطر افزایش فشار و انفجار |
| ۶ | خط لوله ورودی | خوردگی دیواره | ۹ | ۵ | ۵ | ۲۲۵ | نیاز به بازرسی دوره‌ای |
| ۷ | PLC | قفل شدن یا ریست ناخواسته | ۹ | ۵ | ۵ | ۲۲۵ | تأثیر بر کل سیستم کنترل |

| شماره | تجهیز | حالت خرابی | شدت (S) | احتمال (O) | کشف (D) | PRN | توضیحات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۸ | فیلتر گاز | نشت از دریچه بازرسی | ۸ | ۶ | ۵ | ۲۴۰ | نیاز به بازرسی و گشتاورسنجی |
| ۹ | خط لوله خروجی | ترک در اتصالات جوشی | ۱۰ | ۴ | ۶ | ۲۴۰ | پیامد فاجعه‌بار، احتمال پایین |
| ۱۰ | شیر کاهنده فشار | شکست مکانیکی بدنه | ۱۰ | ۴ | ۵ | ۲۰۰ | نیاز به بازرسی فراصوتی |

بالاترین RPN مربوط به "عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط (SCSSV)" با مقدار ۳۰۰ است. این حالت خرابی به دلیل شدت حداکثر (۱۰) ناشی از عدم قطع جریان در شرایط اضطراری و احتمال وقوع متوسط (۵)، به عنوان بحرانی‌ترین ریسک ایمنی در ایستگاه شناسایی شد.

هفت ریسک دارای RPN ≥۲۴۰ هستند که نشان‌دهنده نیاز فوری به اقدامات کنترلی است.

سه تجهیز (SCSSV، اتصالات فلنجی، HIP، GDS و شیر کنترل) مسئول ۶۸٪ از کل RPN بالای ۲۴۰ هستند، که نشان می‌دهد تمرکز اقدامات بر روی این تجهیزات، بیشترین تأثیر را در کاهش ریسک کلی خواهد داشت.

علیرغم شدت بالا در برخی خرابی‌ها (مانند شکست بدنه شیر کاهنده فشار)، احتمال وقوع پایین (۴) باعث شده است که RPN آن‌ها در مرز بالا قرار گیرد، نه بسیار بالا.

### ۴-۴-۳- آستانه‌های RPN و دسته‌بندی ریسک

بر اساس استاندارد AIAG/VDA و با تطبیق شرایط ایستگاه، RPNها به سه دسته تقسیم شدند:

**جدول ۳: آستانه‌های RPN**

| محدوده PRN | سطح ریسک | اقدام مورد نیاز |
|---|---|---|
| ۳۰۰–۲۴۰ | بسیار بالا | اقدام فوری و الزامی |
| ۲۳۹–۱۸۰ | بالا | اقدام سریع و برنامه‌ریزی‌شده |
| ۱۷۹–۱ | متوسط/پایین | نظارت و بازنگری دوره‌ای |

بر این اساس، ۹ حالت خرابی در دسته بسیار بالا و بالا قرار دارند و نیازمند توجه ویژه هستند.

در نهایت، محاسبه RPN، اولین گام کمّی در اولویت‌بندی ریسک‌هاست. یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که ریسک‌های ایمنی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر عمدتاً حول محور سیستم‌های ایمنی، اتصالات تحت فشار و سیستم کنترل متمرکز هستند. در بخش بعدی، این داده‌ها با استفاده از نمودار پارتو تحلیل خواهند شد تا اصول ۲۰/۸۰ (یعنی ۲۰٪ تجهیزات که ۸۰٪ ریسک را ایجاد می‌کنند) شناسایی شوند.

### جدول اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی‌شده با RPN ≥ ۲۰۰

پس از محاسبه شاخص اولویت ریسک (RPN) برای تمامی حالات خرابی شناسایی‌شده، مرحله بعدی، اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی بر اساس مقدار RPN است. در این پژوهش، آستانه RPN ≥۲۰۰به عنوان مرز ریسک‌های "نیازمند اقدام فوری یا سریع" تعیین شد. این آستانه با توجه به استانداردهای صنعتی، شدت پیامدها و سطح تحمل ریسک در ایستگاه‌های گاز تعیین گردید.

در جدول زیر، تمامی حالات خرابی با RPN برابر یا بیش از ۲۰۰، به ترتیب نزولی RPN مرتب شده‌اند. این جدول به عنوان اسناد تصمیم‌گیری برای مدیریت ایستگاه و برنامه‌ریزی اقدامات کنترلی عمل می‌کند.

**جدول ۴: اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی‌شده با RPN ≥ ۲۰۰**

| رتبه | تجهیز | حالت خرابی | شدت (S) | احتمال (O) | کشف (D) | PRN | سطح ریسک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | شیر قطع اضطراری خط (SCSSV) | عدم فعال‌سازی در شرایط اضطراری | ۱۰ | ۵ | ۶ | ۳۰۰ | بسیار بالا |
| ۲ | اتصالات فلنجی (فشار بالا) | نشت گاز | ۸ | ۷ | ۵ | ۲۸۰ | بسیار بالا |
| ۳ | سنسور فشار بالا (HIP) | خطا در تشخیص (عدم تشخیص یا هشدار کاذب) | ۹ | ۶ | ۵ | ۲۷۰ | بسیار بالا |
| ۴ | سنسور نشت گاز (GDS) | عدم تشخیص نشت | ۹ | ۵ | ۶ | ۲۷۰ | بسیار بالا |
| ۵ | شیر کنترل فشار | قفل شدن در وضعیت باز | ۹ | ۶ | ۵ | ۲۷۰ | بسیار بالا |
| ۶ | خط لوله خروجی | ترک در اتصالات جوشی | ۱۰ | ۴ | ۶ | ۲۴۰ | بسیار بالا |
| ۷ | فیلتر گاز (ورودی) | نشت از دریچه بازرسی | ۸ | ۶ | ۵ | ۲۴۰ | بسیار بالا |
| ۸ | خط لوله ورودی | خوردگی دیواره داخلی | ۹ | ۵ | ۵ | ۲۲۵ | بالا |
| ۹ | PLC | قفل شدن یا ریست ناخواسته | ۹ | ۵ | ۵ | ۲۲۵ | بالا |
| ۱۰ | شیر کنترل فشار | قفل شدن در وضعیت بسته | ۷ | ۶ | ۵ | ۲۱۰ | بالا |
| ۱۱ | فیلتر گاز (ورودی) | انسداد شدید | ۷ | ۸ | ۴ | ۲۲۴ | بالا |
| ۱۲ | شیر کاهنده فشار | شکست مکانیکی بدنه | ۱۰ | ۴ | ۵ | ۲۰۰ | بالا |
| ۱۳ | منبع تغذیهPLC | خرابی | ۹ | ۴ | ۵ | ۱۸۰ | بالا* |

***ریسک شماره ۱۳ با RPN=180 در مرز بالا قرار دارد و به دلیل اهمیت سیستم کنترل، در این لیست گنجانده شده است.***

در میان تمامی حالات خرابی شناسایی‌شده، حالت "عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط (SCSSV)" با شاخص اولویت ریسک (RPN) برابر با ۳۰۰ به عنوان بحرانی‌ترین ریسک ایمنی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر شناسایی شد. این ریسک به دلیل پیامد فاجعه‌بار آن — شامل انفجار، آتش‌سوزی و نشت بدون کنترل گاز — و همچنین قابلیت کشف پایین (امتیاز ۶)، نیازمند اقدام فوری و اجرای کنترل‌های مهندسی ضروری است. عدم عملکرد این شیر در شرایط اضطراری، به معنای عدم وجود آخرین خط دفاعی در برابر حوادث بزرگ است که می‌تواند منجر به تخریب گسترده و آسیب‌های جانی شود.

تحلیل ریسک‌های بحرانی نشان می‌دهد که پنج ریسک اول با RPN ≥ ۲۷۰ مسئول حدود ۴۰ درصد از کل ریسک تجمعی در دسته ریسک‌های بسیار بالا هستند. این تمرکز ریسک، اهمیت توجه ویژه به این تجهیزات کلیدی را برجسته می‌کند. به‌عنوان مثال، اتصالات فلنجی با RPN=۲۸۰ و امتیاز احتمال وقوع بالا (۷) نشان‌دهنده ضعف در برنامه نگهداری پیشگیرانه و عدم اجرای منظم گشتاورسنجی پیچ‌ها است. این موضوع بیانگر آن است که علیرغم اهمیت این اتصالات، بازرسی‌ها و تنظیمات لازم به‌طور سیستماتیک انجام نمی‌شود و این امر خود می‌تواند به منبع ریسک تبدیل شود.

همچنین، شناسایی سنسورهای فشار بالا (HIP) و سنسورهای نشت گاز (GDS) با RPN=۲۷۰ ، نشان می‌دهد که حتی سیستم‌های نظارتی و ایمنی که برای کاهش ریسک طراحی شده‌اند، در صورت خرابی یا کالیبراسیون نادرست، می‌توانند به

منبع ریسک تبدیل شوند. این یافته تأکید می‌کند که مدیریت ریسک نباید تنها به تجهیزات اصلی محدود شود، بلکه باید شامل تمامی اجزای سیستم ایمنی و نظارتی نیز باشد.

علاوه بر این، انسداد شدید فیلتر گاز با RPN=۲۲٤ و امتیاز احتمال وقوع بسیار بالا (۸) نشان‌دهنده مشکلات عملیاتی در زنجیره تأمین کارتریج‌های فیلتر و عدم رعایت برنامه تعویض منظم است. این ریسک که ممکن است در نگاه اول جزئی به نظر برسد، می‌تواند منجر به افت فشار، افزایش بار روی شیرهای کنترل و در نهایت اختلال در تأمین گاز به مشترکین شود. بنابراین، این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدیریت ریسک باید فراتر از تجهیزات حیاتی به فرآیندهای عملیاتی و لجستیکی نیز توجه کند.

**جدول ۵: توزیع ریسک بر اساس سیستم**

| سیستم | تعداد ریسکهای با RPN ≥ ۲۰۰ | درصد کل |
|---|---|---|
| سیستم‌های ایمنی | ۴ (SCSSV, HIP, GDS) | ۳۰/۸٪ |
| اتصالات و لوله‌ها | ۳ (فلنج، جوش، خط لوله) | ۲۳/۱٪ |
| شیرهای کنترل و کاهنده | ۴ | ۳۰/۸٪ |
| سیستم کنترل | ۲ (PLC, PSU) | ۱۵/۴٪ |
| جمع | ۱۳ | ۱۰۰٪ |

این توزیع نشان می‌دهد که سیستم‌های ایمنی و شیرها بیشترین سهم را در ریسک‌های بحرانی دارند.

جدول اولویت‌بندی ریسک‌ها با RPN ≥ ۲۰۰، امکان تمرکز منابع و اقدامات کنترلی را بر روی بالاترین ریسک‌های سیستم فراهم می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که ریسک‌های ایمنی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر عمدتاً حول محور خرابی تجهیزات حیاتی، نشت از اتصالات و خطا در سیستم‌های ایمنی و کنترل متمرکز هستند.

### تحلیل علل ریشه‌ای ریسک‌های با RPN بالا

شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها تنها مرحله اول مدیریت ریسک است. برای کاهش پایدار ریسک، لازم است علل بنیادین[۱۰] این ریسک‌ها شناسایی شوند. در این بخش، علل ریشه‌ای ریسک‌های با RPN ≥ ۲٤۰ (ریسک‌های بسیار بالا) با استفاده از روش‌های تحلیل Why ۵ و نمودار علت و معلول[۱۱] مورد بررسی قرار گرفتند. این تحلیل‌ها توسط تیم FMEA و با استناد به داده‌های عملیاتی، گزارش‌های نگهداری و مصاحبه با کارشناسان انجام شد.

ریسک‌های با RPN ≥ ۲٤۰ شامل موارد زیر هستند:

- عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری (SCSSV)
- نشت از اتصالات فلنجی
- خطا در سنسور فشار بالا (HIP)
- عدم تشخیص نشت توسط سنسور GDS
- قفل شدن شیر کنترل فشار در وضعیت باز
- نشت از دریچه بازرسی فیلتر
- ترک در اتصالات جوشی خط لوله خروجی

در ادامه، علل ریشه‌ای این ریسک‌ها در پنج دسته اصلی طبقه‌بندی شده‌اند.

[۱۰] Root Causes

[۱۱] Fishbone

**جدول ۶: تحلیل علل ریشه‌ای ریسک‌های با RPN ≥ ۲۴۰**

| ریسک | علت مستقیم | علت ریشه‌ای (Why ۵) |
|---|---|---|
| عدم فعال‌سازی SCSSV | خرابی سولنوئید یا گیرکردن مکانیکی | -عدم تست جزئی (PST) به صورت دوره‌ای<br>-عدم وجود سیستمRedundant<br>-کیفیت پایین قطعات یدکی |
| نشت از اتصالات فلنجی | گسست واشر یا از دست دادن گشتاور | -عدم گشتاورسنجی منظم<br>-استفاده از واشرهای غیراصولی<br>-تنش‌های حرارتی و لرزش |
| خطا در سنسور فشار (HIP) | کالیبراسیون نادرست یا آلودگی | -کمبود دستگاه کالیبراسیون قابل حمل<br>-عدم آموزش کافی کارکنان<br>-فاصله زیاد بین بازدیدها |
| عدم تشخیص نشت توسطGDS | فرسودگی حسگر یا پوشش آلاینده | -عدم جایگزینی به‌موقع حسگر (بیش از ۳ سال)<br>-عدم تست ماهانه با گاز مصنوعی<br>-قرارگیری در محیط گرد و غبار |
| قفل شدن شیر کنترل در وضعیت باز | خوردگی میله یا گیرکردن دیافراگم | -کیفیت پایین گاز ورودی) وجود($H_2S$)<br>-عدم بازرسی داخلی دوره‌ای<br>-استفاده از قطعات جایگزین غیراستاندارد |
| نشت از دریچه بازرسی فیلتر | گسست واشر یا سفت‌نبودن پیچ | -عدم بازرسی ماهانه<br>-استفاده از واشرهای نامرغوب<br>-عدم رعایت گشتاور پیچ‌ها |
| ترک در اتصالات جوشی | ضعف در کیفیت جوش اولیه | -جوش‌های اولیه با استاندارد پایین<br>-عدم بازرسی رادیوگرافیک پس از نصب<br>-تنش‌های حرارتی مکرر |

علل ریشه‌ای شناسایی‌شده در پنج دسته اصلی طبقه‌بندی شدند:

**جدول ۷: دسته‌بندی علل ریشه‌ای**

| دسته علت | مثال‌ها | تعداد ریسکهای تحت تاثیر |
|---|---|---|
| ۱ .نگهداری ناکافی | عدم گشتاورسنجی، عدم کالیبراسیون، عدم بازرسی دوره‌ای | ۶ از ۷ |
| ۲ .کیفیت پایین قطعات یدکی | استفاده از واشرهای غیراصولی، قطعات جایگزین غیراستاندارد | ۴ از ۷ |
| ۳ .کمبود آموزش کارکنان | عدم آموزش بر روی تست سنسورها، کالیبراسیون | ۳ از ۷ |
| ۴ .طراحی یا نصب اولیه نامناسب | کیفیت پایین جوش‌های اولیه، عدم وجود سیستمRedundant | ۲ از ۷ |
| ۵ .کمبود منابع و تجهیزات | کمبود دستگاه کالیبراسیون، کمبود قطعات یدکی | ۳ از ۷ |

با استفاده از نمودار علت و معلول (به روش M۶)، علل ریسک‌های بحرانی در شش دسته دسته‌بندی شدند:

Man (انسان): خطای انسانی، عدم آموزش

Machine (ماشین): خرابی تجهیزات، کیفیت پایین قطعات

Method (روش): عدم رعایت دستورالعمل، برنامه نگهداری ناکافی

Material (متریال): کیفیت پایین واشرها، لوله‌ها و قطعات یدکی

Measurement (اندازه‌گیری): کالیبراسیون نادرست، خطای سنسورها

Mother Nature (محیط): خوردگی ناشی از رطوبت و $H_2S$، لرزش و دما

این تحلیل نشان می‌دهد که بیشترین علل ریشه‌ای در دسته‌های "روش" و "متریال" قرار دارند، که نشان‌دهنده ضعف در سیستم نگهداری و زنجیره تأمین قطعات است.

بنابراین تحلیل علل ریشه‌ای نشان می‌دهد که ریسک‌های بحرانی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر عمدتاً ناشی از ضعف در برنامه نگهداری پیشگیرانه، استفاده از قطعات غیراستاندارد و کمبود آموزش کارکنان هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که اقدامات کنترلی باید فراتر از تعمیر تجهیزات باشد و شامل بازنگری در فرآیندها، بهبود کیفیت قطعات، و تقویت آموزش‌های تخصصی باشد.

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با اجرای روش تحلیل حالات خرابی و تأثیرات آن (FMEA)، ریسک‌های ایمنی، بهداشت و محیط زیست در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر به‌صورت سیستماتیک شناسایی و ارزیابی شدند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهند که ریسک‌های ایمنی در این ایستگاه عمدتاً حول محور تجهیزات تحت فشار، سیستم‌های کنترل و ایمنی و اتصالات حیاتی متمرکز هستند. مهم‌ترین حالات خرابی شامل عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط (SCSSV)، نشت گاز از اتصالات فلنجی و دریچه‌های بازرسی، قفل شدن شیر کنترل فشار در وضعیت باز یا بسته، و خطا در عملکرد سنسورهای فشار و نشت گاز است. این خرابی‌ها در صورت وقوع می‌توانند منجر به حوادث جبران‌ناپذیری مانند انفجار، آتش‌سوزی و قطع تأمین گاز به مشترکین شوند. این ریسک‌ها نه تنها ناشی از خرابی تجهیزات هستند، بلکه اغلب ریشه در عوامل سیستمی مانند کیفیت پایین قطعات یدکی، ضعف در برنامه نگهداری پیشگیرانه و کمبود آموزش کارکنان دارند.

برای اولویت‌بندی این ریسک‌ها، از شاخص اولویت ریسک (RPN) به عنوان ابزاری کمّی استفاده شد. نتایج نشان داد که عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط با RPN=۳۰۰ به عنوان بحرانی‌ترین ریسک ایمنی ایستگاه شناسایی شد. همچنین، تحلیل پارتو نشان داد که اولین ۷ تجهیز (۷۰ درصد کل تجهیزات) مسئول بیش از ۹۰ درصد از کل ریسک تجمعی هستند که این امر اهمیت تمرکز منابع بر روی تجهیزات کلیدی را برجسته می‌کند. این اولویت‌بندی، امکان طراحی اقدامات کنترلی هدفمند و اثربخش را فراهم کرد و نشان داد که مدیریت ریسک باید فراتر از واکنش به خرابی‌ها باشد و به بهبود سیستم‌های مدیریتی و نگهداری توجه کند.

در حوزه بهداشت شغلی، کارکنان ایستگاه با ریسک‌های قابل توجهی مواجه هستند که عمدتاً در بلندمدت تأثیر می‌گذارند. قرار گرفتن در معرض سر و صدا در سطوح بالاتر از حد مجاز (۸۵ تا ۹۲ دسی‌بل)، خطر کاهش شنوایی دائمی را افزایش می‌دهد. همچنین، در شرایط اضطراری، امکان قرار گرفتن در معرض گازهای سمی مانند هیدروژن سولفید ($H_2S$) و مونواکسید کربن (CO) وجود دارد که می‌تواند منجر به آسیب‌های شدید یا مرگ شود. علاوه بر این، تماس با روغن‌ها و مواد شیمیایی در فرآیند نگهداری و ارتعاش دست-بازو از طریق ابزارهای برقی، از دیگر ریسک‌های بهداشتی هستند. مدیریت این ریسک‌ها نیازمند ترکیبی از کنترل‌های مهندسی (مانند نصب پوشش‌های صوتی)، اداری (چرخش شغلی، برنامه نظارت شنوایی) و تجهیزات حفاظت فردی (PPE) است.

از دیدگاه محیط زیستی، فعالیت‌های ایستگاه تأثیرات منفی قابل توجهی بر محیط اطراف دارند. مهم‌ترین این تأثیرات، انتشار متان ($CH_4$) به عنوان یک گاز گلخانه‌ای قوی است که عمدتاً ناشی از نشت گاز در اتصالات، شیرها و دریچه‌های بازرسی می‌باشد. همچنین، ریزش روغن‌های روانکار و مواد شیمیایی به خاک و تولید پسماندهای خطرناک در فرآیندهای نگهداری، می‌تواند به اکوسیستم محلی و منابع آبی منطقه آسیب برساند. این اثرات در صورت عدم مدیریت مناسب، نه تنها بر محیط زیست، بلکه بر تصویر عمومی شرکت گاز و پایداری عملیاتی ایستگاه تأثیر منفی خواهند گذاشت.

در نهایت، بر اساس یافته‌های تحقیق، مجموعه‌ای از راهکارهای جامع برای کاهش مخاطرات ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی ارائه شده است. این راهکارها شامل اقدامات مهندسی (مانند نصب سیستم‌های Redundant، بهبود کنترل‌های ایمنی)، اقدامات اداری (بازنگری در برنامه نگهداری، اجرای برنامه آموزشی جامع)، و اقدامات مدیریتی (اجرای سیستم مدیریت یکپارچه) هستند. همچنین، پیشنهاد شده است که ایستگاه از برنامه‌های نظارتی منظم مانند LDAR (تشخیص و تعمیر نشت) استفاده کند و فرهنگ ایمنی در میان کارکنان تقویت گردد. این راهکارها نه تنها به کاهش ریسک‌های شناسایی‌شده کمک می‌کنند، بلکه زیرساختی برای بهبود مستمر ایمنی و پایداری عملیاتی ایستگاه فراهم می‌آورند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، چهار پیشنهاد کلیدی به‌منظور بهبود جامع ایمنی، بهداشت شغلی و محیط زیست در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهر سنقر ارائه می‌شود. نخستین پیشنهاد، اجرای سیستم‌های Redundant و نصب تجهیزات پشتیبان در بخش‌های حیاتی است. با توجه به بحرانی‌ترین ریسک شناسایی‌شده یعنی عدم فعال‌سازی شیر قطع اضطراری خط (SCSSV)با RPN=۳۰۰ ضروری است که سیستم‌های ایمنی دارای پشتیبان فنی باشند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود شیرهای قطع اضطراری و سیستم‌های کنترل (PLC) دارای واحد پشتیبان باشند و از فناوری تست جزئی (PST) برای نظارت دوره‌ای عملکرد شیرها بدون قطع جریان گاز استفاده شود.

دومین پیشنهاد، تقویت برنامه نگهداری پیشگیرانه و اجرای رویکردهای نوین نظارت فنی است. ضعف در بازرسی‌های دوره‌ای، گشتاورسنجی اتصالات فلنجی و کالیبراسیون سنسورها از عوامل اصلی افزایش ریسک است. لذا، پیشنهاد می‌شود برنامه نگهداری پیشگیرانه به‌روزرسانی شود و شامل بازرسی فراصوتی خطوط لوله، کالیبراسیون ماهانه سنسورهای HIP وGDS، و استفاده از شیرهای بدون نشت (Zero Emission Valves) در نقاط حساس باشد. همچنین، اجرای برنامه LDAR (تشخیص و تعمیر نشت) و نصب سیستم نظارت مداوم بر نشت گاز، می‌تواند انتشار متان به عنوان مهم‌ترین تأثیر زیست‌محیطی را تا حد قابل توجهی کاهش دهد.

سومین پیشنهاد، تقویت مدیریت بهداشت شغلی و حفاظت از کارکنان است. قرار گرفتن کارکنان در معرض سر و صدا، ارتعاش و گازهای سمی مانند$H_2S$ ، ریسک‌های بلندمدتی بر سلامت آن‌ها ایجاد می‌کند. برای کاهش این ریسک‌ها، پیشنهاد می‌شود برنامه نظارت شنوایی اجرا شود، از دستگاه‌های تشخیص شخصی گاز (PGM) استفاده گردد، و آموزش‌های تخصصی در زمینه واکنش به اضطراب و استفاده صحیح از تجهیزات حفاظت فردی (PPE) به صورت دوره‌ای برگزار شود. علاوه بر این، بهبود شرایط ارگونومیک و چرخش شغلی می‌تواند به کاهش فشار کاری و افزایش هوشیاری ایمنی کمک کند.

چهارمین و مهم‌ترین پیشنهاد، اجرای سیستم مدیریت یکپارچه بهداشت، ایمنی و محیط زیست (HSE-MS) مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی ISO ٤٥٠٠١ و ISO ١٤٠٠١ است. این سیستم، مدیریت ریسک را از یک فعالیت تک‌مرحله‌ای به یک فرآیند سیستماتیک، مستند و قابل نظارت تبدیل می‌کند. تشکیل تیم دائمیFMEA، به‌روزرسانی سیستم‌های کنترل به فناوری‌هایIIoT، تقویت فرهنگ ایمنی با سیستم گزارش‌دهی غیرانتقامی و ایجاد سامانه مستندسازی الکترونیکی از جمله اقدامات کلیدی در این چارچوب هستند. این رویکرد نه تنها به کاهش حوادث کمک می‌کند، بلکه به بهبود پایدار عملکرد عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و ارتقای تصویر سازمانی شرکت گاز منطقه‌ای منجر خواهد شد.

**منابع**

اصلانی، مجید؛ شریف روحانی، محسن؛ چراغی، دلارا (۱۴۰۲). شناسایی و ارزیابی ریسک ایستگاه تقلیل فشار گاز با استفاده از روش FMEA. هشتمین کنفرانس جامع مدیریت و بحران و HSE.

قاسمی، ع.، و رضایی، م. (۱۳۹۹). ارزیابی قرار گرفتن در معرض گازهای سمی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز. مجله تحقیقات سلامت حرفه‌ای، ۶(۲)، ۱۰۲–۱۱۵.

محمدی، ن.، و حسینی، م. (۱۴۰۲). ترکیب روش‌های FMEA و AHP در اولویت‌بندی ریسک‌های ایمنی در صنایع گاز. فصلنامه علمی-پژوهشی ب-ای-م، ۱۰(۱)، ۷۷–۹۲.

نوروزی، م.، رحمانی، ف.، و علیزاده، س. (۱۳۹۸). ارزیابی سطح سر و صدا و ریسک کاهش شنوایی در کارکنان ایستگاه‌های گاز .فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، ۵)۳(، ۴۵–۵۸.

Chen, W., & Li, Y. (۲۰۱۷). Risk assessment in petrochemical plants using FMEA method. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, ٤٥, ١٢٣–١٣١.

Dadashi, Towhid a, Hosseinpoor, Saeed a Mohammadi, Amir (۲۰۲٤). A comprehensive protocol for evaluating health, safety, and environmental risks of hospital solid waste through FMEA technique. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume ٩, June ٢٠٢٤, Pages ١٠٠٦٤٦. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.mex.٢٠٢٤,١٠٢٧٦٠.

ISO. (۲۰۱۸). ISO ٤٥٠٠١:٢٠١٨ Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.

Kletz, T. (۲۰۰۱). Hazop and Hazan: Identifying and assessing process industry hazards (٤th ed.). Institution of Chemical Engineers.

Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K., & Koulouriotis, D. E. (۲۰۲۲). Safetyassessment by hybridizing the MCDM/AHP & HAZOP-DMRA techniques through safety's level colored maps: Implementation in a petrochemical industry. Alexandria Engineering Journal, ٦١(٩), ٦٩٥٩-٦٩٧٧.

Stamatis, D. H. (۲۰۰۳). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (۲nd ed.). ASQ Quality Press.

Zammori, F. A., Braglia, M., & Frosolini, M. (۲۰۱۱). A standardized approach for the assessment of FMEA. International Journal of Quality & Reliability Management, ٢٨(٩), ٩٧١–٩٩٤. https://doi. org/١٠,١١٠٨/٠٢٦٥٦٧١١١١١١٧٤٢٧٨

مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات

سال هشتم، شماره ۸۲، اردیبهشت ۱۴۰۵

# Safety, Health, and Environmental Risk Assessment Using the FMEA Method at the Gas Pressure Reducing Station of Sonqor City

**Hadi Ehsani-Nikoo[1], Maryam Kiani-Sadr[2]**

[1,2]- Department of Environment, Ha.C, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

## Abstract

Gas pressure reduction stations, as critical components of urban gas supply infrastructure, are exposed to various safety, occupational health, and environmental risks that can lead to catastrophic incidents if not properly managed. This study aimed to comprehensively evaluate these risks using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method at the gas pressure reduction station in Sonqor city. The research was conducted as a field-based, descriptive-analytical study, and data were collected through observation, expert interviews, technical document reviews, and the implementation of the FMEA method. Findings revealed that the failure to activate the emergency shutdown valve (SCSSV), with a Risk Priority Number (RPN) of ۳۰۰, was identified as the most critical safety risk. Additionally, Pareto analysis showed that the first ۷ equipment items (۷۰٪ of total equipment) accounted for over ۹۰٪ of the cumulative risk. In the occupational health domain, exposure of workers to noise and hazardous gases was identified as a major risk. From an environmental perspective, gas leakage and methane emissions were recognized as the most significant environmental impacts. Based on the findings, a set of operational, systemic, and managerial recommendations were proposed, including the installation of redundant systems, implementation of LDAR (Leak Detection and Repair) programs, improvement of preventive maintenance plans, establishment of an integrated HSE management system, and strengthening of safety culture. This research demonstrated that the use of FMEA as a systematic and preventive tool enables accurate risk identification and the design of targeted control measures, contributing to sustainable improvements in safety and operational reliability of gas stations.

**Keywords**: Gas pressure reduction station, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Safety risks, Occupational health, Environmental impacts, Risk Priority Number (RPN)