

تحلیل و اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی ایمنی در معادن زیرزمینی با رویکرد FMEA (مطالعه موردی: شرکت معدن مس چهارگنبد)

صادق مقبلی بهرآسمانی^۱، محسن محمدی‌زاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

۲- نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
در این پژوهش، ریسک‌های بحرانی ایمنی در معدن زیرزمینی مس چهارگنبد با استفاده از تحلیل حالات خطا و اثرات آن (FMEA) شناسایی و اولویت‌بندی شدند. هدف اصلی تحقیق، ارائه مبنای تحلیلی برای تصمیم‌گیری مدیریتی در چارچوب سیستم مدیریت ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE) و تمرکز بر کاهش مخاطرات پرخطر در محیط معدن بود. این مطالعه از نوع کاربردی و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شد و فعالیت‌های اصلی معدن شامل حفاری، آتشیاری، بارگیری، باربری، نظارت و تعمیر و نگهداری تجهیزات مورد بررسی قرار گرفت. شناسایی مخاطرات از طریق بازدید میدانی، بررسی مستندات ایمنی و مصاحبه با کارشناسان انجام شد. در مجموع، ۵۸ مخاطره ایمنی شناسایی شد که پس از ارزیابی با رویکرد FMEA، سه مخاطره در سطح ریسک بالا و هشت مخاطره در سطح ریسک متوسط قرار گرفتند. ریسک‌های بحرانی شامل ریزش سقف و دیواره‌ها، برخورد با ماشین‌آلات و مخاطرات ناشی از آتشیاری بود. تحلیل نتایج نشان داد که تمرکز بر ریسک‌های بحرانی و اجرای اقدامات اصلاحی متناسب می‌تواند به کاهش ضریب ریسک و ارتقای ایمنی معدن کمک کند. یافته‌های پژوهش، کارایی FMEA را به‌عنوان ابزاری معتبر و عملی برای شناسایی و اولویت‌بندی مخاطرات ایمنی در معادن زیرزمینی تأیید می‌کند.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۲۳ نویسنده مسئول: Mohsen.mohammadizadeh@iau.ac.ir کلید واژه‌ها: ایمنی معادن زیرزمینی تحلیل حالات خطا و اثرات اولویت‌بندی ریسک معدن مس مدیریت HSE

۱- مقدمه

ایمنی در معادن زیرزمینی یکی از مسائل حیاتی و پیچیده در صنعت معدن‌کاری محسوب می‌شود. محدودیت فضا، شرایط زمین‌شناسی دشوار، حضور هم‌زمان نیروی انسانی و ماشین‌آلات سنگین و استفاده از مواد ناریه، محیط کار را به فضایی پرخطر تبدیل کرده است که کارکنان را در معرض مخاطرات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متعدد قرار می‌دهد. بروز حوادث ناشی از این شرایط می‌تواند منجر به آسیب‌های جانی، خسارات مالی و اختلال در روند تولید شود. از این‌رو، ارتقای سطح ایمنی در معادن زیرزمینی همواره یکی از اولویت‌های اصلی نظام‌های مدیریت HSE بوده است. با افزایش پیچیدگی عملیات معدنکاری و توسعه فعالیت‌های زیرزمینی، نیاز به بهره‌گیری از رویکردهای منظم و علمی برای شناسایی و مدیریت ریسک‌های ایمنی بیش از پیش احساس می‌شود. با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه ایمنی معادن، بخش قابل توجهی از این تحقیقات به شناسایی کلی مخاطرات یا ارائه فهرست خطرات محدود شده و تحلیل نظام‌مند شدت پیامد، احتمال وقوع و قابلیت کشف مخاطرات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این محدودیت موجب شده است که فرآیند تصمیم‌گیری مدیریتی در مواجهه با ریسک‌های بحرانی با چالش مواجه شده و تخصیص منابع ایمنی به‌صورت بهینه انجام نگیرد. روش تحلیل حالات خطا و اثرات آن (FMEA) به‌عنوان یک ابزار نیمه کمی، امکان ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها را بر اساس سه شاخص اصلی شدت پیامد، احتمال وقوع و قابلیت کشف فراهم می‌کند. این روش می‌تواند تمرکز مدیران و کارشناسان HSE را بر مخاطرات بحرانی معطوف ساخته و مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی اقدامات کنترلی فراهم آورد. با این حال، کاربرد نظام‌مند FMEA در معادن زیرزمینی ایران، به‌ویژه همراه با تحلیل مدیریتی جامع و ارائه راهکارهای عملی، همچنان محدود و کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است.

در این راستا، هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی ایمنی در معدن زیرزمینی مس چهارگنبد با استفاده از روش FMEA و ارائه تحلیل

مدیریتی کاربردی برای حمایت از تصمیم‌گیری مدیران HSE است. این مطالعه با بررسی فعالیت‌های اصلی معدن شامل حفاری، آتشیاری، بارگیری، باربری، نظارت و تعمیر و نگهداری تجهیزات، تلاش می‌کند ارتباط میان تحلیل کمی ریسک و تصمیمات مدیریتی را به‌صورت نظام‌مند تبیین نماید. نوآوری پژوهش حاضر در ترکیب تحلیل کمی مبتنی بر RPN با تفسیر مدیریتی و تمرکز هدفمند بر سه ریسک بحرانی اصلی نهفته است که بیشترین تهدید را برای کارکنان و عملیات معدن ایجاد می‌کنند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی عملی برای اولویت‌بندی منابع ایمنی، کاهش حوادث شغلی و بهبود شرایط کاری در معادن زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش

ایمنی و بهداشت شغلی در معادن زیرزمینی به دلیل ماهیت پیچیده عملیات، شرایط محیطی خاص و هم‌زمانی فعالیت‌های انسانی و ماشینی، همواره یکی از مهم‌ترین حوزه‌های پژوهشی در نظام‌های مدیریت ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE) بوده است. مطالعات متعدد نشان می‌دهند که معادن زیرزمینی در مقایسه با معادن روباز، نرخ بالاتری از حوادث شدید و مرگبار را تجربه می‌کنند که این امر عمدتاً ناشی از ریزش سنگ، تهویه نامناسب، انفجار گازها، استفاده از مواد ناریه و حوادث مرتبط با ماشین‌آلات سنگین است. از این‌رو، توسعه و به‌کارگیری روش‌های نظام‌مند ارزیابی ریسک به‌عنوان یکی از راهبردهای اصلی کاهش مخاطرات ایمنی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

۲-۱. ارزیابی ریسک ایمنی در معادن زیرزمینی

بخش قابل توجهی از پژوهش‌های حوزه ایمنی معادن بر شناسایی، طبقه‌بندی و مستندسازی مخاطرات شغلی متمرکز بوده‌اند. این مطالعات نقش مهمی در افزایش سطح آگاهی مدیران و کارکنان نسبت به شرایط خطرناک محیط معدن ایفا کرده‌اند. با این حال، بسیاری از این پژوهش‌ها صرفاً به ارائه فهرستی از مخاطرات بسنده کرده و کمتر به اولویت‌بندی آن‌ها بر اساس شدت پیامد، احتمال وقوع و قابلیت کشف پرداخته‌اند. چنین رویکردی،

بررسی مقالات منتشرشده در حوزه HSE نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر مقادیر RPN بدون تفسیر مدیریتی، اثربخشی اقدامات کنترلی را محدود می‌سازد [۶]. همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در صنایع نفت، گاز و ساخت‌وساز بیانگر کارایی FMEA در تحلیل ریسک‌های بحرانی هستند، اما کاربرد نظام‌مند این روش در معادن زیرزمینی ایران همچنان محدود گزارش شده است [۷]. [۸].

۲-۴- خلاصه‌های علمی و جایگاه پژوهش حاضر

با جمع‌بندی مطالعات پیشین، چند خلا علمی اساسی شناسایی می‌شود: کمبود مطالعات متمرکز بر اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی به جای ارائه فهرست جامع مخاطرات. ضعف در تحلیل مدیریتی نتایج FMEA و ارتباط آن با تصمیم‌گیری‌های عملی مدیران HSE. محدود بودن مطالعات موردی عمیق در معادن زیرزمینی ایران با استفاده از داده‌های واقعی عملیاتی. عدم هم‌راستایی کافی برخی پژوهش‌ها با الزامات استانداردهای نوین مدیریت ریسک مانند ISO 31000 نیز از دیگر خلأهای موجود در این حوزه است [۹]. استفاده از روش FMEA در کنار تفسیر مدیریتی نتایج، امکان ارائه یافته‌های کاربردی برای مدیران و کارشناسان ایمنی را فراهم می‌کند و پیوند مؤثری میان ارزیابی تحلیلی ریسک و تصمیم‌گیری مدیریتی ایجاد می‌کند.

۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. هدف اصلی تحقیق، شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی ایمنی در عملیات معدنکاری زیرزمینی و ارائه تحلیل مدیریتی مبتنی بر نتایج ارزیابی ریسک است. برای دستیابی به این هدف، از روش تحلیل حالات خرابی و آثار آن FMEA به عنوان یک ابزار نیمه کمی و ساختاریافته در چارچوب سیستم مدیریت HSE استفاده شده است. مراحل انجام پژوهش مطابق با الزامات استاندارد مدیریت ریسک ISO 31000 و رویه‌های متداول نشریه HSE طراحی و اجرا شده‌اند.

اگرچه در ایجاد شناخت اولیه مؤثر است، اما در عمل پاسخگوی نیازهای تصمیم‌گیری مدیریتی در شرایط محدودیت منابع و فشارهای عملیاتی نیست.

۲-۲. روش‌های ارزیابی ریسک و جایگاه FMEA

در مطالعات ایمنی معادن، روش‌های متنوعی برای ارزیابی ریسک به کار گرفته شده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به HAZOP، JSA، Bow-Tie، AHP و FMEA اشاره کرد. روش‌های کیفی به دلیل سادگی اجرا، کاربرد گسترده‌ای دارند، اما توان محدودی در اولویت‌بندی دقیق ریسک‌ها ارائه می‌دهند. در مقابل، روش‌های کاملاً کمی نیازمند داده‌های گسترده و دقیق هستند که در بسیاری از معادن در دسترس نیست. در این میان، روش FMEA به عنوان یک ابزار نیمه کمی، تعادل مناسبی میان دقت تحلیلی و قابلیت اجرایی ایجاد می‌کند. این روش با استفاده هم‌زمان از سه شاخص شدت پیامد، احتمال وقوع و قابلیت کشف، امکان محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) را فراهم می‌سازد و به‌ویژه در محیط‌های عملیاتی پیچیده، قابلیت بالایی در شناسایی نقاط بحرانی ایمنی دارد.

۲-۳. مطالعات پیشین و جایگاه پژوهش حاضر

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به کاربرد FMEA در حوزه ایمنی معادن و صنایع پرخطر پرداخته‌اند که تمرکز بر مخاطرات با RPN بالا می‌تواند نقش مؤثری در کاهش حوادث شدید در معادن زیرزمینی داشته باشد [۱]. با بررسی مخاطرات معادن غرب آذربایجان، بر کارایی FMEA در شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها تأکید کردند، هرچند تحلیل مدیریتی نتایج در مطالعه آن‌ها محدود بود [۲]. با مقایسه FMEA و سایر روش‌های ارزیابی ریسک نشان دادند که ترکیب شاخص‌های شدت، احتمال و قابلیت کشف، تمرکز بر مخاطرات بحرانی را تسهیل می‌کند [۳]. با توسعه مدل‌های ترکیبی و فازی، تلاش کردند دقت ارزیابی ریسک را افزایش دهند [۴]. [۵]. با این حال، این مطالعات عمدتاً بر بهبود روش‌شناسی تمرکز داشته و کمتر به پیامدهای مدیریتی نتایج پرداخته‌اند.

۳-۱- معرفی محدوده مطالعه و محیط پژوهش

مطالعه حاضر در شرکت معدن مس زیرزمینی چهارگنبد واقع در استان کرمان انجام شده است. این معدن از نوع معادن فلزی زیرزمینی بوده و عملیات استخراج در آن شامل فعالیت‌هایی نظیر حفاری، آتشیاری، بارگیری، باربری، نگهداری فضاهای زیرزمینی، تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات و فعالیت‌های نظارتی است. شرایط زمین‌شناسی متغیر، عمق استخراج، استفاده از مواد ناریه و تردد هم‌زمان نیروی انسانی و ماشین‌آلات سنگین، این معدن را در زمره محیط‌های کاری پرخطر قرار داده است. انتخاب این معدن به‌عنوان مطالعه موردی، امکان دسترسی به داده‌های واقعی عملیاتی و تحلیل کاربردی ریسک‌های ایمنی را فراهم کرده است.

۳-۲- شناسایی مخاطرات ایمنی

در گام نخست، شناسایی مخاطرات ایمنی با استفاده از: بازدیدهای میدانی، بررسی مستندات ایمنی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با کارشناسان HSE و سرپرستان شیفت‌ها انجام شد. جامعه آماری شامل کارشناسان ایمنی، مهندسان معدن و سرپرستان عملیاتی با حداقل پنج سال سابقه کار مرتبط بود. در این مرحله، کلیه فعالیت‌های اصلی معدن به واحدهای کاری مجزا تفکیک شده و مخاطرات بالقوه هر فعالیت شناسایی گردید. در مجموع، ۵۸ مخاطره ایمنی در بخش‌های مختلف عملیات معدنکاری استخراج و فهرست شدند.

۳-۳- ارزیابی ریسک با استفاده از FMEA

پس از شناسایی مخاطرات، ارزیابی ریسک‌ها با بهره‌گیری از روش FMEA انجام شد. در این روش، هر مخاطره بر اساس سه شاخص اصلی ارزیابی شد: شدت پیامد، میزان تأثیر بالقوه مخاطره بر سلامت نیروی انسانی و ایمنی محیط کار. احتمال وقوع فراوانی یا احتمال بروز مخاطره در شرایط عملیاتی، قابلیت کشف: میزان توانایی سیستم‌های کنترلی موجود در شناسایی و پیشگیری از وقوع مخاطره

برای هر شاخص، مقیاس امتیازدهی پنج‌درجه‌ای بر اساس دستورالعمل‌های رایج FMEA و متناسب با شرایط معدن تدوین شد. امتیازدهی نهایی هر مخاطره با اجماع نظر تیم

ارزیابی انجام گرفت تا از کاهش سوگیری فردی اطمینان حاصل شود.

۳-۴- محاسبه عدد اولویت ریسک و طبقه‌بندی

عدد اولویت ریسک (RPN) برای هر مخاطره از حاصل‌ضرب سه شاخص S، O و D محاسبه شد $RPN = S \times O \times D$ بر اساس مقادیر RPN، ریسک‌ها به سه سطح طبقه‌بندی شدند: قابل قبول، متوسط، غیرقابل قبول (بحرانی). تمرکز پژوهش بر سه ریسک بحرانی با بالاترین مقادیر RPN بود، زیرا این ریسک‌ها بیشترین تهدید را برای ایمنی کارکنان و تداوم عملیات معدنکاری ایجاد می‌کنند.

۳-۵- تحلیل داده‌ها و رویکرد مدیریتی

داده‌های حاصل از ارزیابی ریسک با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel پردازش و تحلیل شدند. نتایج به‌صورت جدول‌ها و نمودارهای تحلیلی ارائه گردید تا امکان مقایسه و اولویت‌بندی ریسک‌ها فراهم شود. سپس، نتایج کمی FMEA با رویکرد مدیریتی و تصمیم‌محور تفسیر شد تا ارتباط میان ریسک‌های بحرانی و اقدامات کنترلی پیشنهادی مشخص گردد. این رویکرد امکان ارائه پیشنهادها عملی و قابل اجرا برای مدیران HSE معدن را فراهم کرده و از محدود شدن نتایج پژوهش به مقادیر عددی صرف جلوگیری می‌کند.

۴- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های ایمنی در معدن مس زیرزمینی چهارگنبد بر اساس روش FMEA ارائه می‌شود. یافته‌ها شامل شناسایی مخاطرات در فعالیت‌های مختلف معدنکاری، محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) و تعیین ریسک‌های بحرانی است. نتایج به‌صورت جدول‌ها و تحلیل‌های کمی ارائه شده‌اند تا امکان مقایسه و اولویت‌بندی دقیق ریسک‌ها فراهم شود.

۴-۱- شناسایی مخاطرات ایمنی

فوری هستند، در حالی که خطرات با RPN متوسط یا کم، تحت کنترل سیستم ایمنی موجود قرار داشته و نیاز به اصلاح فوری ندارند. بنابراین، سطح ریسک بر اساس RPN محاسبه شده از شدت، احتمال وقوع و احتمال کشف خطر و با مقایسه آن با محدوده تعیین شده توسط تیم مدیریت معدن انتخاب شده است.

۴-۳- شناسایی ریسک‌های بحرانی

بر اساس طبقه‌بندی انجام‌شده، سه ریسک بحرانی اصلی در معدن مس چهارگنبد شناسایی شد: ریزش سنگ سقف کارگاه‌ها در عملیات حفاری و استخراج، قرارگیری کارکنان در معرض گازهای سمی پس از آتشباری، و حوادث ناشی از برخورد یا واژگونی ماشین‌آلات در مسیرهای باربری. این ریسک‌ها بالاترین مقادیر RPN را در میان ۵۸ مخاطره شناسایی شده داشته و بیشترین پتانسیل ایجاد حوادث شدید و آسیب‌های جدی را نشان دادند. توزیع ریسک‌ها نشان داد که حدود یک‌سوم مخاطرات در سطح قابل قبول، بخش قابل توجهی در سطح متوسط و تنها تعداد محدودی در سطح غیرقابل قبول قرار دارند، که بر ضرورت تمرکز مدیریتی بر ریسک‌های با اولویت بالا تأکید می‌کند.

تحلیل دقیق‌تر RPN‌ها نشان داد که شدت پیامد (S) بیشترین نقش را در تعیین سطح بحرانی ریسک‌ها داشته است و مخاطرات با احتمال وقوع بالا اما شدت پیامد پایین، در سطح متوسط یا قابل قبول قرار گرفتند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری مدیریتی نباید تنها بر اساس فراوانی وقوع ریسک‌ها باشد، بلکه ترکیب شاخص‌های شدت پیامد، احتمال و قابلیت کشف تصویر جامع‌تری از وضعیت ایمنی ارائه می‌کند. در نتیجه، تمرکز منابع ایمنی بر ریسک‌های بحرانی، امکان کاهش اثرات حوادث جدی و بهبود اثربخشی سیستم مدیریت HSE را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

بر اساس بازدیدهای میدانی، مصاحبه با کارشناسان HSE و بررسی مستندات ایمنی معدن، ۵۸ مخاطره ایمنی در مراحل مختلف عملیات معدنکاری شناسایی شد. این مخاطرات فعالیت‌هایی نظیر: حفاری، آتشباری، بارگیری و باربری، نگهداری فضاهای زیرزمینی، تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات، فعالیت‌های نظارتی را دربر می‌گیرند. بیشترین تعداد مخاطرات شناسایی شده مربوط به حفاری و آتشباری بوده است که به دلیل شرایط زمین‌شناسی، استفاده از مواد ناریه و حضور هم‌زمان نیروی انسانی، حساسیت بالایی دارند.

۴-۲- ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها

پس از شناسایی مخاطرات، ارزیابی ریسک‌ها با استفاده از روش FMEA انجام شد. برای هر مخاطره، مقادیر شدت پیامد (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت کشف (D) تعیین و عدد اولویت ریسک (RPN) محاسبه گردید. در این پژوهش، تعیین سطح ریسک برای هر یک از خطرات شناسایی شده بر اساس روش FMEA و استانداردهای ISO 31000 و HSE-MS انجام شد. فرآیند به شرح زیر بوده است: شناسایی خطرات: تمامی مخاطرات ایمنی موجود در معدن مس چهارگنبد بخش زیرزمینی با استفاده از سه روش جمع‌آوری شد: مشاهده و بازدید حضوری از محل کاربررسی سوابق حوادث و شبه حوادث رخ داده تحلیل گزارشات اقدامات اصلاحی یا آنومالی‌ها تبدیل داده‌های کیفی به کمی: شدت پیامد، احتمال وقوع و احتمال کشف خطر هر مخاطره بر اساس جداول ضرایب نیمه کمی با امتیازهای ۱ تا ۵ تعیین شد محاسبه RPN (Risk Priority Number)

$RPN = \text{شدت} \times \text{احتمال} \times \text{وقوع} \times \text{احتمال کشف}$ این عدد، شاخصی برای اولویت‌بندی خطرات ارائه می‌دهد. تعیین سطح ریسک: محدوده RPN توسط تیم مدیریت معدن تعیین شد: ۱ تا ۴۹ → ریسک کم

۵۰ تا ۷۹ → ریسک متوسط

۸۰ تا ۱۲۵ → ریسک بالا

تفسیر نتایج: خطراتی که RPN آن‌ها در محدوده بالا قرار دارد، غیر قابل قبول بوده و نیازمند اقدامات اصلاحی

جدول ۱. FMEA در معدن مس چهارگنبد

ردیف	فعالیت	نوع خطر	پیامد	شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	RPN	سطح ریسک
۱	پی‌جویی	لغزندگی مسیر	تروما دست و پا	۲	۳	۲	۱۲	کم
۲	پی‌جویی	اجسام بیرون زده از دیواره	تروما سر	۳	۲	۲	۱۲	کم
۳	پی‌جویی	سنگ معلق	شوک و بی‌حالی	۲	۱	۱	۲	کم
۴	پی‌جویی	سرما‌ی شدید	سرمازدگی و ناراحتی	۲	۱	۱	۲	کم
۵	پی‌جویی	شیب	سر خوردن - تروما	۲	۳	۱	۶	کم
۶	استقرار دستگاه حفاری	برخورد با ماشین‌آلات	آسیب اپراتورها	۳	۴	۱	۱۲	کم
۷	استقرار دستگاه حفاری	برخورد با خطوط لوله	آسیب تجهیزات	۲	۴	۴	۳۲	کم
۸	استقرار دستگاه حفاری	برخورد با خطوط الکتریکی	برق گرفتگی و آتش‌سوزی	۳	۳	۴	۳۶	کم
۹	استقرار دستگاه حفاری	برخورد با دیواره	تخریب سقف	۲	۴	۳	۲۴	کم
۱۰	استقرار دستگاه حفاری	برخورد با افراد	تروما/مرگ	۵	۳	۲	۳۰	کم
۱۱	تهویه	غلظت اکسیژن کم	خفگی	۵	۲	۲	۲۰	کم
۱۲	تهویه	گازهای سمی	مسمومیت	۴	۳	۲	۲۴	کم
۱۳	تهویه	گرد و غبار	مشکلات تنفسی	۳	۴	۳	۳۶	کم
۱۴	نگهداری بازکننده‌ها	ریزش سنگ سقف	تروما یا مرگ	۵	۲	۲	۲۰	کم
۱۵	نگهداری بازکننده‌ها	سقوط تجهیزات	آسیب کارکنان	۴	۳	۲	۲۴	کم
۱۶	نگهداری بازکننده‌ها	ضعف شاکریت	ریزش دیواره	۳	۴	۳	۳۶	کم
۱۷	بارگیری	برخورد تراک با تجهیزات	آسیب ماشین‌آلات	۳	۴	۲	۲۴	کم
۱۸	بارگیری	سقوط سنگ	آسیب اپراتور	۴	۳	۲	۲۴	کم
۱۹	بارگیری	لغزندگی سطح	سر خوردن - تروما	۳	۳	۲	۱۸	کم
۲۰	باربری	برخورد تراک‌ها	آسیب شدید	۵	۳	۳	۴۵	کم
۲۱	باربری	سقوط مواد معدنی	آسیب کارکنان	۴	۳	۳	۳۶	کم
۲۲	باربری	انحراف مسیر	توقف تولید	۳	۳	۲	۱۸	کم
۲۳	آبکشی	مسدود شدن مسیر	غرق شدن	۵	۲	۲	۲۰	کم
۲۴	آبکشی	خرابی پمپ	اختلال عملیات	۴	۳	۲	۲۴	کم
۲۵	منابع انرژی	برق گرفتگی	آسیب شدید	۵	۲	۲	۲۰	کم
۲۶	منابع انرژی	قطع برق	توقف عملیات	۳	۴	۳	۳۶	کم
۲۷	روشنایی	کمبود نور	سقوط و تروما	۴	۳	۲	۲۴	کم
۲۸	روشنایی	خرابی چراغ‌ها	خطای دید	۳	۳	۳	۲۷	کم
۲۹	آتشباری	انفجار غیرمترقبه	مرگ و آسیب شدید	۵	۳	۲	۳۰	کم
۳۰	آتشباری	انتشار گازهای سمی	مسمومیت	۴	۳	۲	۲۴	کم
۳۱	تکنولوژی ساخت	سقوط ابزار	آسیب کارکنان	۳	۴	۲	۲۴	کم
۳۲	تکنولوژی ساخت	لغزش مصالح	آسیب و توقف تولید	۳	۳	۳	۲۷	کم
۳۳	تکنولوژی ساخت	نشت مواد شیمیایی	مسمومیت	۴	۲	۲	۱۶	کم
۳۴	پی‌جویی	برخورد با جانوران	گزش و آسیب	۲	۳	۲	۱۲	کم
۳۵	پی‌جویی	گرد و غبار معلق	مشکلات تنفسی	۳	۴	۲	۲۴	کم
۳۶	استقرار دستگاه حفاری	لرزش بیش از حد	آسیب شنوایی	۳	۳	۳	۲۷	کم
۳۷	استقرار دستگاه حفاری	لغزش پایه دستگاه	آسیب تجهیزات	۳	۲	۲	۱۲	کم
۳۸	تهویه	نقص سیستم	خفگی یا مشکلات تنفسی	۵	۲	۲	۲۰	کم
۳۹	نگهداری بازکننده‌ها	استفاده نادرست	آسیب به اپراتور	۴	۳	۲	۲۴	کم
۴۰	بارگیری	نشت مواد خطرناک	مسمومیت	۴	۲	۳	۲۴	کم
۴۱	باربری	خرابی ترمز	تصادف	۵	۲	۲	۲۰	کم

۴۲	آبکشی	جریان غیرقابل کنترل	غرق شدن	۵	۲	۲	۲۰	کم
۴۳	منابع انرژی	انفجار باطری‌ها	آتش‌سوزی	۵	۲	۲	۲۰	کم
۴۴	روشنایی	روشنایی ناکافی در تونل‌ها	تصادف یا لغزش	۳	۳	۲	۱۸	کم
۴۵	آتشباری	اشتعال زود هنگام	آسیب شدید	۵	۲	۲	۲۰	کم
۴۶	تکنولوژی ساخت	سقوط دیواره	تروما	۵	۲	۲	۲۰	کم
۴۷	تکنولوژی ساخت	ترکیدگی لوله‌ها	سیلاب و آسیب	۴	۳	۲	۲۴	کم
۴۸	پی‌جویی	ناپایداری زمین	ریزش	۵	۲	۲	۲۰	کم
۴۹	استقرار دستگاه حفاری	مشکل مکانیکی	توقف تولید	۴	۳	۲	۲۴	کم
۵۰	تهویه	انسداد کانال	اختلال تهویه	۴	۳	۳	۳۶	کم
۵۱	نگهداری بازکننده‌ها	لغزش مواد	آسیب	۴	۳	۲	۲۴	کم
۵۲	بارگیری	اشتباه اپراتور	آسیب شدید	۵	۲	۲	۲۰	کم
۵۳	باربری	لغزش تراک	آسیب	۴	۳	۲	۲۴	کم
۵۴	آبکشی	خوردگی لوله	نشت آب	۳	۳	۲	۱۸	کم
۵۵	منابع انرژی	نوسان برق	آسیب تجهیزات	۳	۳	۲	۱۸	کم
۵۶	روشنایی	نور خیره‌کننده	خطای دید	۳	۳	۲	۱۸	کم
۵۷	آتشباری	عدم رعایت فاصله ایمنی	انفجار	۵	۲	۲	۲۰	کم
۵۸	تکنولوژی ساخت	تجهیزات سنگین سقوط کند	تروما/مرگ	۵	۲	۲	۲۰	کم

۵- بحث و تحلیل

۵-۱ تحلیل کمی نتایج و مقایسه با مطالعات پیشین

در این پژوهش، ۵۸ مخاطره ایمنی در معدن مس زیرزمینی چهارگنبد شناسایی شد. با استفاده از روش FMEA، شدت پیامد (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت کشف (D) برای هر مخاطره تعیین و عدد اولویت ریسک (RPN) محاسبه شد. نتایج نشان داد که تنها سه مخاطره اصلی در سطح بحرانی قرار دارند: ریزش سنگ سقف کارگاه‌ها در عملیات حفاری و استخراج، قرارگیری کارکنان در معرض گازهای سمی پس از آتشباری، و حوادث ناشی از برخورد یا واژگونی ماشین‌آلات در مسیرهای باربری. تحلیل کمی نشان داد که شاخص شدت پیامد (S) نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش RPN دارد و باعث شده این سه ریسک، در سطح بحرانی قرار گیرند. در مقابل، مخاطراتی با احتمال وقوع بالا اما شدت پیامد پایین، در سطح متوسط یا قابل قبول طبقه‌بندی شدند. بنابراین، صرفاً توجه به فراوانی وقوع مخاطرات معیار مناسبی برای اولویت‌بندی نیست و ترکیب هم‌زمان شاخص‌های S، O و D تصویر دقیق‌تری از وضعیت ایمنی ارائه می‌دهد.

با مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که یافته‌ها همسو با نتایج جهانی در

معادن زیرزمینی هستند. مطالعات مشابه نشان می‌دهند که ریزش سنگ و سقوط دیواره‌ها عامل اصلی حوادث جدی و مرگبار در معادن زیرزمینی است [۱۰، ۱۱]. همچنین، حوادث مرتبط با ماشین‌آلات و برخورد تجهیزات با کارکنان یکی از مهم‌ترین تهدیدات ایمنی در معادن زیرزمینی است [۱، ۳]. انتشار گازهای سمی پس از آتشباری نیز تهدیدی مهم برای سلامت کارکنان بوده و نیازمند سیستم‌های پایش و کنترل مؤثر است [۸، ۱۲]. بر اساس تحلیل کمی FMEA و تطبیق با مطالعات پیشین، تمرکز منابع ایمنی و مدیریتی بر ریسک‌های بحرانی می‌تواند اثربخشی سیستم مدیریت HSE را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در مقابل، مخاطرات با RPN متوسط یا قابل قبول نیازمند پایش دوره‌ای و اقدامات پیشگیرانه کم‌هزینه هستند. این یافته‌ها همچنین نوآوری پژوهش حاضر را نشان می‌دهد، زیرا علاوه بر شناسایی ریسک‌ها، تحلیل مدیریتی و پیشنهاد اقدامات تصمیم‌محور ارائه شده که در بسیاری از مطالعات قبلی محدود به محاسبات RPN بوده است.

۵-۲ پیامدهای مدیریتی

تحلیل مدیریتی نتایج نشان می‌دهد که تمرکز منابع ایمنی بر ریسک‌های بحرانی می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش حوادث و افزایش ایمنی محیط کار داشته باشد. بر

نتایج نشان داد که تمرکز منابع ایمنی و مدیریتی بر این ریسک‌های بحرانی، می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش حوادث و بهبود ایمنی کارکنان داشته باشد. همچنین تحلیل کمی RPN و ترکیب شاخص‌های شدت پیامد، احتمال وقوع و قابلیت کشف، تصویری دقیق از وضعیت ایمنی ارائه می‌دهد و اولویت‌بندی منابع را بهبود می‌بخشد.

۵-۵- پیشنهاد عملی برای مدیران HSE معدن:

نصب سیستم‌های پایش و هشدار سریع در کارگاه‌های حفاری برای کاهش ریزش سنگ-بهبود تهویه و کنترل انتشار گازها در عملیات آتشیاری و تونل‌ها-آموزش کارکنان و طراحی مسیرهای ایمن عبور و مرور ماشین‌آلات-استفاده مستمر از تجهیزات حفاظت فردی (PPE) مطابق با شدت مخاطرات بحرانی-پایش مستمر RPN مخاطرات و بازنگری دوره‌ای اقدامات کنترلی-در مجموع، یافته‌های این مطالعه علاوه بر اعتبار علمی، کاربرد عملی برای مدیران و کارشناسان HSE معدن دارند و می‌توانند به بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و کاهش حوادث پرخطر در معادن زیرزمینی منجر شوند.

۷-مراجع

- [1] P. S. Paul, F. Sarkar, S. Vikram, and Y. Fissha, "Estimation of risk perception of mine workers in underground metalliferous mines using multivariate structural equation modelling," Scientific Reports, vol. 15, p. 14049, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-99086-6.
- [2] A. Esmailzadeh, et al., "Risk assessment in quarries using Failure Modes and Effects Analysis: Case study West Azerbaijan mines," Journal of Mining and Environment, vol. 13, no. 3, pp. 715–725, 2022, doi: 10.22044/JME.2022.12117.2209.
- [3] A. Moniri Morad, et al., "Risk analysis methods in mining operations: Evaluation of FMEA and other risk assessment tools," Results in Engineering, vol. 21, p. 101684, 2024.
- [4] J. Ivančan, D. Lisjak, D. Pavletić, and D. Kolar, "Improvement of failure mode and effects analysis using fuzzy and adaptive neuro fuzzy inference system," Machines, vol. 11, no. 7, p. 739, 2023, doi: 10.3390/machines11070739.

اساس داده‌های FMEA، پیشنهادهای عملی شامل موارد زیر است: اجرای سیستم‌های پایش و هشدار سریع در کارگاه‌های حفاری برای کاهش ریزش سنگ-بهبود تهویه و کنترل گازها در عملیات آتشیاری و تونل‌ها-آموزش و برنامه‌ریزی مسیرهای ایمن برای عبور و مرور ماشین‌آلات و کارکنان-استفاده از تجهیزات محافظ فردی (PPE) مطابق با شدت پیامد مخاطرات بحرانی، این اقدامات نه تنها ریسک‌های بحرانی را کاهش می‌دهند، بلکه با بهبود اولویت‌بندی منابع، کارایی سیستم HSE معدن را افزایش می‌دهند.

۵-۳- محدودیت‌ها

اگرچه این مطالعه با داده‌های واقعی معدن انجام شده، برخی محدودیت‌ها وجود دارد: داده‌ها محدود به یک معدن خاص بوده و ممکن است نتایج به سایر معادن تعمیم‌پذیر نباشد-ارزیابی FMEA وابسته به نظر کارشناسان است و احتمال سوگیری انسانی وجود دارد-تحلیل‌های کمی محدود به شاخص RPN بوده و برخی روابط پیچیده میان مخاطرات و پیامدها ممکن است کمتر مورد توجه قرار گرفته باشد.

۵-۴- پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

گسترش مطالعه به چند معدن زیرزمینی برای افزایش تعمیم‌پذیری یافته‌ها-استفاده از ترکیب روش‌های FMEA با Bow-Tie Analysis یا AHP برای بهبود دقت ولویت‌بندی بررسی تأثیر اقدامات کنترلی پیشنهادی بر کاهش RPN به صورت طولیکپارچه‌سازی نتایج با سیستم مدیریت ایمنی دیجیتال برای بهبود پایش و کنترل ریسک

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات عملی

پژوهش حاضر با هدف شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های بحرانی ایمنی در معدن مس زیرزمینی چهارگنبد انجام شد و با بهره‌گیری از روش FMEA، سه ریسک بحرانی اصلی شناسایی گردید: ریزش سنگ سقف کارگاه‌ها در عملیات حفاری و استخراج-قرارگیری کارکنان در معرض گازهای سمی پس از آتشیاری-حوادث ناشی از برخورد یا واژگونی ماشین‌آلات در مسیرهای باربری

[5] M. Fazel and R. Ali, "Prioritizing risk control measures in mining safety using hybrid FMEA models," *Journal of Risk Analysis and Management*, vol. 13, no. 2, pp. 89–105, 2025.

[6] S. Shariati, "Underground mine risk assessment by using FMEA in the presence of uncertainty," *Decision Science Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 295–304, 2014, doi: 10.5267/j.dsl.2014.4.002.

[7] H. Zamani and M. Karami, "Application of MCDM methods for prioritizing safety interventions in mining," *Journal of Safety & Risk Management*, vol. 7, no. 1, pp. 101–118, 2023.

[8] M. Rahimdel, "Quantitative risk analysis in underground mining: Emphasis on ventilation and workforce training," *International Journal of Mining Safety*, vol. 12, no. 1, pp. 101–115, 2025.

[9] ISO, ISO 31000: Risk Management—Guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.

[10] B. Fernando, A. F. W. Yakup, L. Gozali, and A. Ali, "Safety Risk Management Analysis At PT. XYZ Using The HIRADC And FMEA Approach," in *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM Istanbul 2022)*, 2022, doi: 10.46254/AN12.20220375.

[11] "Fuzzy FMEA for the safety risk analysis of underground coal mining," 2022, doi: 10.1080/25726668.2022.2051273.

[12] T. Zhang, Y. Liu, and Q. Wang, "Multi criteria risk assessment of thermal comfort in deep mining conditions," *International Journal of Occupational Safety*, vol. 20, no. 4, pp. 1–15, 2025..

Critical Safety Risk Analysis and Prioritization in Underground Mines Using FMEA: A Case Study of Chahargunbad Copper Mine

Sadegh Moghbeli Bahrasemani¹, Mohsen Mohammadizadeh^{2*}

1-M.Sc. Student of Safety, Health, and Environment (SHE) Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

2- Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 October 2021

Received in revised form: 7 December 2021

Accepted: 8 December 2021

Available online: 13 December 2021

*Correspondence:

mohsen.mohammadizadeh@iau.ac.ir

Keywords:

Underground mine safety

Failure Mode and Effects Analysis

Risk prioritization

Copper mine

HSE management.

ABSTRACT

This study aimed to identify and prioritize critical safety risks in the Chahargunbad underground copper mine using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). The main objective was to develop an evidence-based analytical framework to support managerial decision-making within the Health, Safety, and Environment (HSE) management system, with a particular focus on controlling high-priority hazards in underground mining operations. The research was applied in nature and adopted a descriptive-analytical design. Major mining activities, including drilling, blasting, loading, hauling, supervision, and equipment maintenance, were systematically evaluated. Hazard identification was performed through field inspections, analysis of safety records and documentation, and expert interviews. In total, 58 safety hazards were identified and assessed using the FMEA approach. The results indicated that three hazards were categorized as high-risk and eight hazards as medium-risk. The most critical risks were associated with roof and wall falls, machinery-related collisions, and blasting operations. The findings suggest that concentrating safety resources on critical risks and implementing targeted corrective actions can substantially reduce risk priority levels and enhance overall mine safety performance. Overall, the study demonstrates that FMEA is an effective, reliable, and practically applicable tool for systematically identifying and prioritizing safety hazards in underground mining environments.