

ارزیابی ریسک لرزش زمین ناشی از آتشباری با استفاده از رویکرد توسعه یافته FMEA در شرایط عدم قطعیت

عزالدین بخت‌آور^{۱*}؛ رضا میکائیل؛ سید محمد علی صفوی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱

در این تحقیق، به منظور ارزیابی ریسک لرزش زمین ناشی از آتشباری از رویکرد جدیدی بر اساس روش FMEA در شرایط عدم قطعیت و نظرات تیمی سه نفره از کارشناسان آتشباری استفاده شد. بدین منظور، نخست مطابق با اثرات لرزش بر سنگ‌شکن، تیکنر، سایت صنعتی، کارخانه تغلیظ، کلیدخانه، پمپ بنزین، تصفیه‌خانه، نیروگاه برق و انبار مواد ناریه در معدن مس سونگون، ۱۴ حالت رخداد، مدنظر قرار گرفت. با استفاده از تحلیل آماری، رابطه‌ای برای محاسبه حداقل فاصله آسیب‌پذیر ناشی از لرزش زمین ارائه شد. در رویکرد FMEA، با تدوین و به‌کارگیری الگوهای رده‌بندی کیفی و معادل فازی آن‌ها، اعداد فازی ۱۴ حالت رخداد و وزن‌های فازی درجه اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک بر اساس نظرات تیم کارشناسی تعیین شد. عدد اولویت ریسک فازی برای ۱۴ حالت با در نظر گرفتن تأثیر وزن‌های فازی فاکتورهای ریسک به صورت میانگین هندسی محاسبه شد. نتایج نشان داد که حالت C-4 که بیانگر تأثیر لرزش زمین ناشی از آتشباری در نقطه ۴ بر سایت صنعتی بود، بیشترین ریسک را داشت. دو حالت F-9 (پمپ‌بنزین) و G-10 (تصفیه‌خانه) دارای ریسک یکسان و نزدیک به ریسک سایت صنعتی بودند. سنگ‌شکن (A-1) و انبار مواد ناریه (I-13) هر دو ریسک متوسط به پایین و سایر بخش‌ها ریسک ناچیزی داشتند.

چکیده

ارزیابی ریسک، آتشباری، لرزش زمین، FMEA فازی، معدن مس سونگون

کلمات کلیدی

۱- مقدمه

اغلب، لرزش زمین به‌عنوان یکی از پی‌آمدهای بحرانی نامطلوب ناشی از عملیات آتشفشانی ممکن است ریسک‌های مختلفی برای دیواره‌های معادن سطحی و به‌ویژه زیرساخت‌ها و ساختمان‌های اطراف معدن در پی داشته باشد. در معدن مس سونگون، اثرات ناشی از عملیات آتشفشانی در دو زون الاستیک و غیر الاستیک دیده می‌شود. در بلافاصله موقعیت خرج داخل چال، زون به‌صورت غیرالاستیک است که در آن انفجار باعث خرد شدن سنگ‌ها می‌شود. در زون الاستیک که در آن لرزش‌ها به وقوع می‌پیوندد، موج ناشی از آتشفشانی با افزایش میزان فاصله از محل آتشفشانی، انرژی تخریبی خود را به‌تدریج از دست می‌دهد. در این حالت، انرژی باقی‌مانده به‌صورت امواج فشاری با سرعتی معادل سرعت صوت انتقال می‌یابد و بدون ایجاد خردایش، حرکت کرده و باعث لرزش ذرات به‌صورت الاستیک می‌شود. به‌نحوی که شکل و حجم مواد در این زون بعد از عبور امواج، به‌صورت اولیه باقی می‌ماند. باوجود اهمیت زیاد بررسی اثرات لرزش زمین ناشی از آتشفشانی در معادن سطحی به‌ویژه در معدن مس سونگون به‌دلیل نزدیکی سایت‌های مختلف این مجتمع به نقاط آتشفشانی، تنها تحقیقات اندکی به‌شرح زیر گزارش شده است:

عظیمی و همکاران (۲۰۰۷) طی تحقیقی در معدن مس سونگون به مانیتورینگ لرزش‌های ناشی از آتشفشانی و روند انتشار این لرزش‌ها پرداختند که پس از بررسی ۶۵ عملیات آتشفشانی، رابطه‌ای برای تعیین روش انتشار امواج منجر به لرزش‌ها ارائه کردند [۱].

حسینی و همکاران (۱۳۸۳) بر اساس نمونه‌برداری‌های انجام‌شده و انجام مطالعات برجا و آزمایشگاهی، امیدانس سنگ‌های باطله و درون‌گیر معدن مس سونگون را تعیین کرده و سپس با استفاده از امیدانس‌های استاندارد آنفو و محاسبات ریاضی مربوطه، شرایط انتقال انرژی ناشی از آتشفشانی این معدن را به‌صورت کمی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند [۲]. فرامرزی و همکاران (۱۳۹۱) طی تحقیقی اثرات لرزش زمین

ناشی از عملیات آتشفشانی در معدن سونگون را بر کارکنان بررسی کردند. بدین منظور، لرزه‌های ناشی از ۲۲ عملیات آتشفشانی در معدن سونگون را ثبت کرده و بر این اساس معادله استهلاک موج را تعیین کردند. همچنین براساس معیار خسارت USBM حداکثر خرج انفجاری هم‌زمان مجاز برحسب فاصله باهدف جلوگیری از بروز خسارت در سازه‌های نزدیک به‌ویژه ساختمان اداری و انبار تجهیزات محاسبه شد [۳].

آزاد و عبدالهی شریف (۱۳۹۱) کاهش میزان ارتعاشات زمین در کنار کاهش میزان مصرف ماده ناریه و همچنین اصلاح الگوی حفاری و کاهش و یا حذف اضافه حفاری را به‌عنوان پارامترهای مؤثر در استفاده حداکثر از انرژی مواد منفجره در راستای دستیابی به خردایش بهینه، بررسی کردند. بر این اساس، الگوی جدید آتشفشانی برای معدن مس سونگون مبتنی بر ایجاد فاصله هوایی طراحی و آزمایش شد که منجر به محدود شدن ابعاد خردایش و کاهش طیف دانه‌بندی، کاهش مصرف ویژه مواد ناریه و نیز کاهش لرزش زمین و حذف پنجه در پای پله‌ها شد [۴].

پس از بررسی ادبیات مرتبط با موضوع این تحقیق مشخص شد که اغلب سعی بر مطالعه، مانیتورینگ و ثبت لرزش زمین ناشی از عملیات آتشفشانی بوده و در اندک مواردی نیز به تجزیه و تحلیل اثرات ناشی از لرزش‌ها پرداخته شده است. بدان مفهوم که هیچ‌کدام از آن‌ها در قالب ارزیابی ریسک‌های ناشی از لرزش زمین تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نشده‌اند. اگرچه در مواردی از تحقیقات نیز لرزش زمین ناشی از انفجار در معادن سطحی با استفاده از روش‌های تحلیل آماری و فوق ابتکاری، پیش‌بینی شده است. بیشتر تحقیقات این دسته، اخیراً در دو مقاله توسط حاجی‌حسینی و همکاران (۲۰۱۵) و شیرانی فرادنبه و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه و بررسی شدند [۵] و [۶]. از این‌رو، در این تحقیق، هدف ارائه رویکردی به‌منظور ارزیابی ریسک‌های ناشی از لرزش زمین تحت شرایط عدم قطعیت با استفاده از تکنیک FMEA خواهد بود که تاکنون موضوع بحث هیچ‌کدام از تحقیقات پیشین نبوده است. از جمله مهم‌ترین

۱-۲- شناسایی و بررسی حالت‌های رخداد

اطلاعات حاصل از تست‌های برجای آتشفباری به منظور بررسی و تحلیل لرزش‌ها و اثرات آن‌ها بر زیرساخت‌های معدن مس سونگون در جدول ۱ دسته‌بندی شده است.

جدول ۱: نتایج تست‌های برجای در سونگون

تعداد چال در هر تاخیر (n)	قطر چال یا D (میلی متر)	حداقل فاصله آسیب‌پذیر یا d (متر)
۵	۲۵۰	۲۵۰
۵	۱۲۷	۱۴۰
۱۰	۱۲۷	۲۰۰
۵	۷۶	۸۰
۱۰	۷۶	۱۲۰

به منظور تعیین حداقل فاصله آسیب‌پذیر و غیر ایمن ناشی از لرزش زمین حاصل از آتشفباری‌ها از اطلاعات جدول ۱ برای تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است که پس از انجام مراحل مختلف در نرم‌افزار، رابطه ۱ با R^2 برابر ۰/۹۷ حاصل می‌شود.

$$d = 10.64n + 1.007D - 48.644 \quad (1)$$

که در آن:

d حداقل فاصله آسیب‌پذیر (متر)

n تعداد چال در آخرین تأخیر

D قطر چال‌های آتشفباری در آخرین تأخیر (میلی‌متر)

از رابطه ۱ برای تعیین حداقل فاصله آسیب‌پذیر از نقاط آتشفباری مطابق با جدول ۲ در معدن سونگون استفاده می‌شود، به علاوه تمامی اطلاعات موردنیاز برای ارزیابی ریسک لرزش زمین آورده شده است. این اطلاعات حاصل پردازش‌های مختلف بر روی نقشه کلی محدوده مس سونگون است (شکل ۱). به واسطه این شکل، حالت‌های تحت تأثیر لرزش ناشی از آتشفباری در بخش‌های مختلف معدن شناسایی شده‌اند. بر اساس اطلاعات جدول ۲ می‌توان به کارشناس‌ها و خبرگان در این زمینه کمک کرد که راحت‌تر و با اطمینان بیشتر بتوانند در مورد پارامترهای اولیه موردنیاز برای ارزیابی ریسک نظر دهند.

نوآوری‌هایی که خاص تحقیق حاضر بوده و در سایر تحقیقات مرتبط با لرزش زمین ناشی از آتشفباری به آن توجه نشده است، عبارت‌اند از:

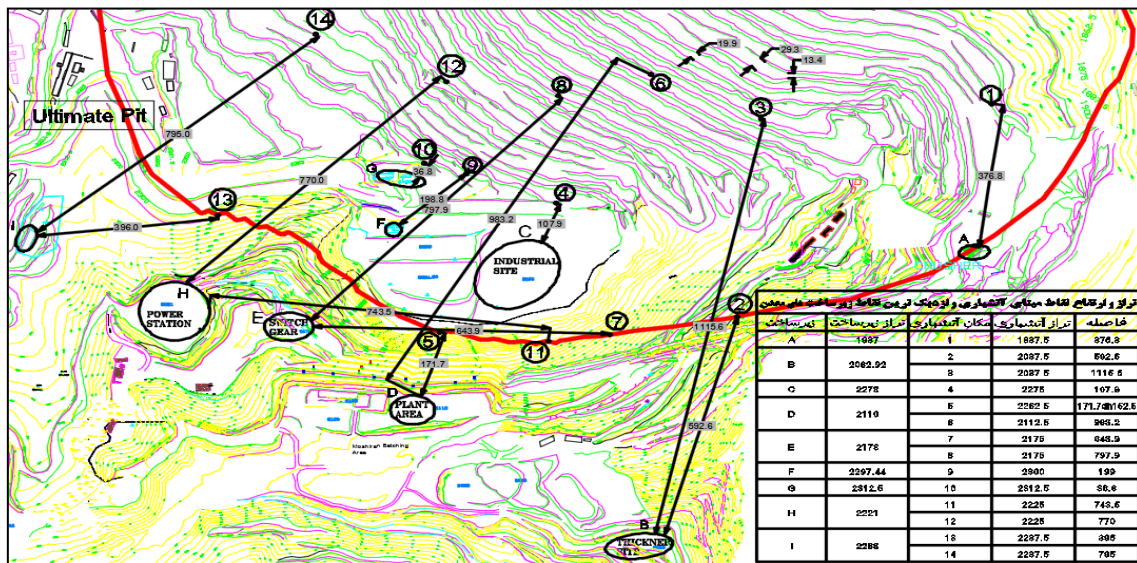
- توسعه رویکرد FMEA فازی به عنوان متداول‌ترین روش در مسائل مهندسی، برای ارزیابی ریسک لرزش زمین ناشی از آتشفباری
- در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت در قالب اعداد فازی مثلثی در روند حل این مسئله
- ارائه رده‌بندی‌های خاص لرزش زمین برای فاکتورهای مؤثر در ارزیابی ریسک نظیر احتمال وقوع رخداد، شدت رخداد و احتمال کشف خطر
- امکان بهره‌گیری از نظرات یک گروه خبره متخصص در زمینه عملیات آتشفباری و چالش لرزش زمین، با در نظر گرفتن تأثیر وزن نظرات هر کدام از خبرگان

۲- ارزیابی ریسک لرزش زمین در سونگون با استفاده از رویکرد پیشنهادی

در این تحقیق، روش ارزیابی ریسک در حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات (FMEA) با توجه به مزایای زیاد و فراگیر بودن آن در بیشتر زمینه‌های علمی، توسعه داده شده است. به طور کلی، داده‌های مرتبط با ارزیابی ریسک دارای ماهیت غیرقطعی هستند که به منظور ارزیابی ریسک دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت می‌توان این عدم قطعیت‌ها را بر اساس تئوری فازی و در قالب اعداد فازی در نظر گرفت. به ویژه در روش FMEA، هر سه فاکتور احتمال وقوع، شدت و نرخ احتمال کشف (شناسایی) رخداد دارای ماهیتی احتمالاتی و غیرقطعی هستند. بدین منظور، با تأکید بر اعداد فازی مثلثی و با استفاده از میانگین هندسی وزن‌های فازی، روش FMEA با رویکرد شرایط عدم قطعیت (فازی) توسعه داده شده است.

جدول ۲: اطلاعات پایه از سایت سونگون برای ارزیابی ریسک لرزش زمین

عنوان زیرساخت نشانه	تراز زیرساخت	شماره آتشیاری (حالت)	موقعیت آتشیاری	تراز آتشیاری	تعداد چال در آخرین تأخیر	قطر چال (میلی‌متر)	حداقل فاصله آسیب‌پذیر	اختلاف ارتفاع به تراز آتشیاری	فاصله تا زیرساخت
سنگ‌شکن	۱۹۸۷	۱	داخل پیت	۱۹۸۷٫۵	۱۸	۱۶۵	۳۰۹	-۰٫۵	۳۷۶٫۸
سایت تیکتر	۲۰۸۳	۲	روی پیت	۲۰۸۷٫۵	۷	۱۶۵	۱۹۲	-۴٫۵	۵۹۲٫۶
سایت صنعتی	۲۲۷۸	۴	داخل پیت	۲۰۸۷٫۵	۶	۱۶۵	۱۸۱	-۴٫۵	۱۱۱۵٫۶
محدوده کارخانه	۲۱۱۰	۵	روی پیت	۲۲۶۲٫۵	۹	۱۶۵	۲۱۳	-۱۵۲٫۵	۱۷۱٫۷
بخش کلیدخانه	۲۱۷۸	۷	روی پیت	۲۱۷۵	۱۶	۱۶۵	۲۰۳	-۲٫۵	۹۸۳٫۲
پمپ‌بنزین	۲۲۹۷٫۵	۹	داخل پیت	۲۱۷۵	۱۶	۱۶۵	۲۸۸	+۳	۶۴۳٫۹
تمفیه‌خانه	۲۳۱۲٫۵	۱۰	داخل پیت	۲۳۰۰	۱۸	۱۶۵	۲۸۸	+۳	۷۹۷٫۹
نیروگاه برق	۲۲۲۱	۱۲	داخل پیت	۲۳۱۲٫۵	۱۳	۱۶۵	۲۵۶	۰	۳۶٫۸
انبار مواد ناربه	۲۲۸۸	۱۴	داخل پیت	۲۲۲۵	۹	۱۲۷	۱۷۵	-۴	۷۴۳٫۵
			داخل پیت	۲۲۲۵	۹	۱۲۷	۱۷۵	-۴	۷۷۰
			روی پیت	۲۲۸۷٫۵	۱۳	۱۶۵	۲۵۶	+۰٫۵	۳۹۶
			داخل پیت	۲۲۸۷٫۵	۱۳	۱۶۵	۲۵۶	+۰٫۵	۷۹۵



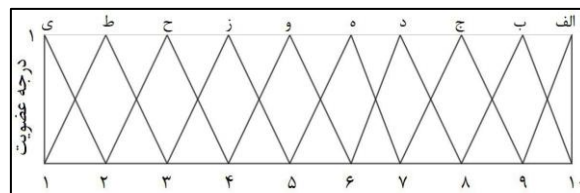
شکل ۱: موقعیت نقاط آتشیاری و بخش‌های تحت تأثیر لرزش زمین

وقوع و آهنگ احتمال کشف رخداد لرزش ناشی از هرکدام از آتشیاری‌های معدن سونگون مطابق باجدول ۲، به ترتیب از جدول‌های ۳ تا ۵ استفاده شده است. با تبعیت از اعداد فازی مثلثی و با استفاده از الگوی رده‌بندی فازی شکل ۱، هر سه فاکتور ریسک براساس تعیین توابع عضویت ارزیابی شده‌اند.

۲-۲- رده‌بندی کیفی و فازی فاکتورهای ریسک
 نخست، سه فاکتور احتمال وقوع، شدت وقوع و آهنگ احتمال کشف رخداد به‌عنوان عوامل مؤثر در ارزیابی ریسک با رویکرد FMEA فازی تعیین می‌شوند. بدین منظور باید از الگوی مشخصی برای رده‌بندی هرکدام از فاکتورهای مذکور در شرایط عدم قطعیت و با استفاده از اعداد فازی استفاده شود. ازاین‌رو، برای رده‌بندی و تعیین عدد فازی احتمال وقوع، شدت

جدول ۴: رتبه‌بندی فازی شدت وقوع یک رخداد

رتبه‌بندی کیفی	بیان شدت اثر یک رخداد	عدد فازی	
		شدت	نشانه وقوع
فاجعه‌بار	تخریب کامل زیرساخت‌ها و تجهیزات و توقف سیستم	(۹،۱۰،۱۰)	الف
مخرب	آسیب جدی و توقف طولانی کار زیرساخت‌ها و تجهیزات	(۸،۹،۱۰)	ب
خیلی زیاد	آسیب جدی و توقف مقطعی کار زیرساخت‌ها و تجهیزات	(۷،۸،۹)	ج
زیاد	توقف مقطعی کار زیرساخت‌ها و آسیب به تجهیزات	(۶،۷،۸)	د
متوسط	توقف مقطعی کار زیرساخت‌ها و آسیب جزئی به تجهیزات	(۵،۶،۷)	ه
کم	توقف مقطعی کار زیرساخت‌ها بدون هیچ آسیبی	(۴،۵،۶)	و
خیلی کم	ادامه کار در صورت اصلاح زیاد عملکردها	(۳،۴،۵)	ز
جزئی	ادامه کار در صورت اصلاح جزئی عملکردها	(۲،۳،۴)	ح
خیلی جزئی	ادامه کار با کمترین محدودیت‌ها و موانع	(۱،۲،۳)	ط
هیچ	بدون تأثیر	(۱،۱،۲)	ی



شکل ۱: رتبه‌بندی فازی فاکتورهای ارزیابی ریسک

جدول ۳: رتبه‌بندی فازی احتمال وقوع یک رخداد

رتبه‌بندی کیفی	بیان احتمال وقوع	عدد فازی	
		احتمال وقوع	نشانه
قطعی	بیش از یک رخداد در روز	(۹،۱۰،۱۰)	الف
خیلی زیاد	بیش از یک رخداد در هفته	(۸،۹،۱۰)	ب
زیاد	یک رخداد در هفته	(۷،۸،۹)	ج
تقریباً زیاد	بیش از یک رخداد در ماه	(۶،۷،۸)	د
متوسط	یک رخداد در ماه	(۵،۶،۷)	ه
کم	بیش از یک رخداد در هر ۶ ماه	(۴،۵،۶)	و
خیلی کم	بیش از یک رخداد در سال	(۳،۴،۵)	ز
بعید	بیش از یک رخداد در هر دو سال	(۲،۳،۴)	ح
خیلی بعید	یک رخداد در هر ۲ تا ۵ سال	(۱،۲،۳)	ط
ناچیز	یک رخداد در بیش از ۵ سال	(۱،۱،۲)	ی

با استفاده از الگوی جدول ۶ و به‌صورت شماتیک مطابق با شکل ۳، وزن‌های فازی درجه اهمیت نسبی هر سه فاکتور ارزیابی ریسک توسط سه کارشناس متخصص در این زمینه به‌صورت کیفی تعیین شده است. نتایج به‌صورت اطلاعات اولیه کیفی ریسک در جدول ۷ آمده است. نظرات این کارشناسان با وزن‌های متفاوت به ترتیب ۰/۴، ۰/۳۵ و ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، با توجه به نقاط آتشفشاری و موقعیت زیرساخت‌های معدن سونگون و بر اساس رده‌بندی‌های جدول‌های ۳ تا ۵، نظرات کارشناسان در رابطه با پارامترهای احتمال وقوع، شدت وقوع و آهنگ احتمال کشف مطابق با نتایج جدول ۸ تعیین شده است سپس، با استفاده از اطلاعات این جدول و نظرات کیفی خبرگان، مقادیر فازی رخداد لرزش زمین تعیین شد که نتایج مطابق با جدول ۸ است. این نتایج، اساس انجام مراحل اصلی ارزیابی ریسک با استفاده از رویکرد FMEA فازی است.

۲-۳- تعیین وزن و اعداد فازی فاکتورهای ارزیابی

ریسک

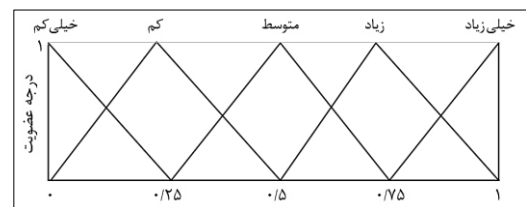
با توجه به اطلاعات جدول ۷، تعداد ۱۴ حالت شکست یا رخداد در معدن سونگون در نظر گرفته شده است که می‌توانند تحت تأثیر ریسک لرزش ناشی از آتشفشاری، صدماتی (شکست‌هایی) به همراه داشته باشند. به‌منظور ارزیابی ریسک بر اساس رویکرد FMEA فازی باید عدد اولویت ریسک فازی تعیین شود. از این‌رو، نخست مجموع نظرات فازی اعضای تیم خبره FMEA برای هر کدام از سه عنصر ریسک به‌طور جداگانه و به ترتیب با استفاده از رابطه‌های جدول ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود. نتایج این مرحله در جدول ۸ آمده است.

جدول ۵: رتبه‌بندی فازی احتمال کشف یک رخداد

رتبه‌بندی و بیان کیفی	بیان احتمال کشف	احتمال کشف فازی	نشانه
کاملاً بعید	غیرقابل کشف	(۰, ۰, ۱)	الف
خیلی بعید	کشف خیلی بعید رخداد	(۰, ۰, ۱)	ب
بعید	کشف بعید رخداد	(۰, ۰, ۱)	ج
خیلی کم	احتمال کشف خیلی کم	(۰, ۰, ۱)	د
کم	احتمال کشف کم	(۰, ۰, ۱)	ه
متوسط	احتمال کشف متوسط	(۰, ۰, ۱)	و
تقریباً زیاد	احتمال کشف تقریباً زیاد	(۰, ۰, ۱)	ز
زیاد	احتمال کشف زیاد	(۰, ۰, ۱)	ح
خیلی زیاد	احتمال کشف خیلی زیاد	(۰, ۰, ۱)	ط
تقریباً قطعی	قطعاً می‌توان وقوع رخداد را کشف کرد	(۰, ۰, ۱)	ی

جدول ۶: وزن‌های فازی اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک

بیان کیفی وزن‌ها	اعداد فازی
خیلی زیاد	(۰, ۰, ۱)
زیاد	(۰, ۰, ۱)
متوسط	(۰, ۰, ۱)
کم	(۰, ۰, ۱)
خیلی کم	(۰, ۰, ۱)



شکل ۲: رتبه‌بندی وزن‌های فازی فاکتورهای ریسک

$$\tilde{R}_i^O = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ija}^O, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijb}^O, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijd}^O \right) \quad (2)$$

$$\forall (i = 1, 2, \dots, 14)$$

$$\tilde{R}_i^S = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ija}^S, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijb}^S, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijd}^S \right) \quad (3)$$

$$\tilde{R}_i^D = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ija}^D, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijb}^D, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot R_{ijd}^D \right) \quad (4)$$

که در آن:

\tilde{R}_i^O ، حاصل جمع اعداد فازی احتمال وقوع رخداد مطابق با

نظرات تیم خبره ارزیابی ریسک

\tilde{R}_i^S ، حاصل جمع اعداد فازی شدت رخداد مطابق با نظرات

تیم خبره ارزیابی ریسک

\tilde{R}_i^D ، حاصل جمع اعداد فازی احتمال کشف رخداد مطابق با

نظرات تیم خبره ارزیابی ریسک

ω_j ، وزن‌های اهمیت نسبی نظرات تیم خبره که به ترتیب

برای سه نفر عبارت‌اند از ۰,۲۵، ۰,۳۵ و ۰,۴

\tilde{R}_{ij}^O ، رده (عدد) فازی احتمال وقوع حالت شکست (رخداد) i

از نظر شخص خبره j

\tilde{R}_{ij}^S ، رده (عدد) فازی شدت حالت شکست (رخداد) i از نظر

شخص خبره j

\tilde{R}_{ij}^D ، رده (عدد) فازی احتمال کشف حالت شکست (رخداد) i

از نظر شخص خبره j

$\tilde{R}_{ija}^O, \tilde{R}_{ijb}^O, \tilde{R}_{ijd}^O$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و

کران بالای عدد فازی احتمال وقوع حالت شکست (رخداد) i از

نظر شخص خبره j

$\tilde{R}_{ija}^S, \tilde{R}_{ijl}^S, \tilde{R}_{ija}^S$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و

کران بالای عدد فازی شدت حالت شکست (رخداد) i از نظر

شخص خبره j

$\tilde{R}_{ija}^D, \tilde{R}_{ijl}^D, \tilde{R}_{ija}^D$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و

کران بالای عدد فازی احتمال کشف حالت شکست (رخداد) i از

نظر شخص خبره j

باید مجموع وزن‌های فازی سه فاکتور اصلی ارزیابی ریسک را

مطابق با نظرات کارشناسان خبره از رابطه‌های ۵ تا ۷ محاسبه

کرد که نتایج آن در جدول ۹ آورده شده است.

$$\tilde{W}^O = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{ja}^O, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jb}^O, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jd}^O \right) \quad (5)$$

$$\tilde{W}^S = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{ja}^S, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jb}^S, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jd}^S \right) \quad (6)$$

$$\tilde{W}^D = \left(\sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{ja}^D, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jb}^D, \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot W_{jd}^D \right) \quad (7)$$

جدول ۷: اطلاعات اولیه کیفی ریسک مطابق با روش FMEA فازی

حالت‌های رخداد (شکست) مورد بررسی														درجه اهمیت وزنی	فاکتور ریسک	خبرگان FMEA
I-14	I-13	H-12	H-11	G-10	F-9	E-8	E-7	D-6	D-5	C-4	B-3	B-2	A-1			
خ	ک	خ	خ	ز	ز	م	م	ب	ب	ز	ب	خ	ز	۱ (۴۰٪)	زیاد	احتمال وقوع رخداد
ک	خ	ک	م	ز	ز	م	زیاد	ک	ک	ز	ب	م	ز	۲ (۳۵٪)	م	۲
م	م	م	م	ز	ز	م	م	ب	ک	ز	ب	ک	م	۳ (۲۵٪)	م	۳
خ	ج	خ	ج	ز	ز	م	ج	ج	ج	ز	ب	ج	ز	۱ (۴۰٪)	خ	شدت رخداد
ج	ک	ج	ج	ز	ز	م	ج	ج	ج	ز	ب	ج	ز	۲ (۳۵٪)	زیاد	۲
ج	ک	ج	ج	ف	ز	م	ج	ج	ج	ز	ب	ج	ز	۳ (۲۵٪)	خ	۳
ز	ز	ت	ت	ت	ز	ز	ز	ت	ز	ز	ت	م	ز	۱ (۴۰٪)	کم	احتمال کشف رخداد
ز	ز	ت	م	ت	ز	ز	م	ت	ت	ز	ت	م	ز	۲ (۳۵٪)	کم	۲
ز	ز	ت	ت	ت	ز	ز	ز	ت	ز	ز	ت	م	ز	۳ (۲۵٪)	خ	۳

خ = خیلی زیاد، ک = خیلی کم، ب = خیلی بعید، ج = خیلی جزئی، ت = تقریباً قطعی، ز = تقریباً زیاد، ف = فاجعه‌بار، م = متوسط

جدول ۸: مقادیر فازی فاکتورهای ریسک و درجه اهمیت وزنی آن‌ها برای معدن سونگون

فاکتور ریسک	احتمال وقوع (O)	شدت (S)	احتمال کشف (D)	خبرگان (z)	درجه اهمیت وزنی
A-1	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
B-2	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
B-3	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
C-4	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
D-5	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
D-6	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
E-7	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
E-8	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
F-9	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
G-10	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
H-11	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
H-12	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
I-13	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)
I-14	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)	(۰.۷۵, ۰.۵, ۰.۲۵)

حالت‌های رخداد (شکست) مورد بررسی

که در رابطه‌ها:

$\tilde{W}^O, \tilde{W}^S, \tilde{W}^D$ ، به ترتیب حاصل جمع وزن‌های فازی احتمال وقوع، شدت و احتمال کشف
 $\tilde{W}_j^O, \tilde{W}_j^S, \tilde{W}_j^D$ ، به ترتیب اعداد فازی مربوط به درجه اهمیت وزنی احتمال وقوع، شدت و احتمال کشف هر رخداد مطابق با نظر خبره ز
 $\tilde{W}_{jd}^O, \tilde{W}_{jb}^O, \tilde{W}_{ja}^O$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و بالای وزن‌های فازی احتمال کشف از نظر خبره ز
 $\tilde{W}_{jd}^S, \tilde{W}_{jb}^S, \tilde{W}_{ja}^S$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و بالای وزن‌های فازی شدت رخداد از نظر خبره ز
 $\tilde{W}_{jd}^D, \tilde{W}_{jb}^D, \tilde{W}_{ja}^D$ ، به ترتیب مقادیر کران پایین، میانه و بالای وزن‌های فازی احتمال وقوع از نظر خبره ز
 ۲-۴-۲- تعیین عدد اولویت ریسک فازی
 پس از تعیین اعداد فازی و اهمیت وزنی سه فاکتور ریسک با

استفاده از روابط ۲ تا ۷، عدد اولویت ریسک فازی برای ۱۴ حالت شکست با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شده که نتایج این بخش در جدول ۹ آمده است. در رابطه ۸، تأثیر وزن‌ها بر سه فاکتور اصلی ارزیابی ریسک به صورت میانگین هندسی وزن‌های فازی در نظر گرفته شده است.

عدد قطعی از رابطه ۹ استفاده می‌شود. در جدول ۹، اعداد فازی اولویت ریسک با استفاده از روش غیر فازی‌سازی مرکز ثقل مطابق با رابطه ۹، اولویت‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ به عنوان خروجی این مرحله نیز مشخص است، هراندازه که مقدار فازی و قطعی حاصل از روش مرکز ثقل برای هرکدام از ۱۴ حالت رخداد بزرگ‌تر باشد، ریسک آن بیشتر است و باید با اولویت بیشتر با استفاده از راهکارهای مناسب به رفع یا کاهش آن پرداخت.

$$FFMEA_i = (\tilde{R}_i^O) \left[\frac{\tilde{W}^O}{(\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^D)} \right] \times (\tilde{R}_i^S) \left[\frac{\tilde{W}^S}{(\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^D)} \right] \times (\tilde{R}_i^D) \left[\frac{\tilde{W}^D}{(\tilde{W}^O + \tilde{W}^S + \tilde{W}^D)} \right] \quad (8)$$

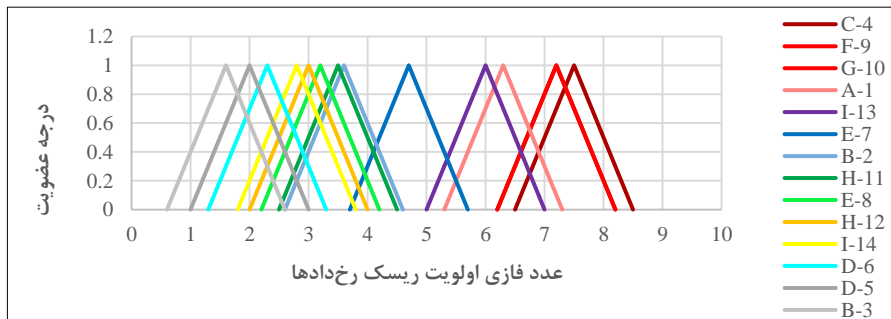
$$\bar{x}_0(\tilde{A}) = \frac{a+b+d}{3} \quad (9)$$

۲-۵-۵-۲- اولویت‌بندی و ارزیابی ریسک لرزش زمین

برای تبدیل یک عدد فازی مثلثی مانند $\tilde{A}=(a,b,d)$ به یک

جدول ۹: نتایج ارزیابی ریسک لرزش زمین با FMEA فازی

حالت رخداد	مجموع اعداد فازی احتمال وقوع (\tilde{R}_i^O)	مجموع اعداد فازی شدت (\tilde{R}_i^S)	مجموع اعداد فازی احتمال کشف (\tilde{R}_i^D)	عدد قطعی اولویت ریسک
A-1	(۶٫۸۵ ، ۷٫۸۵ ، ۸٫۸۵)	(۵٫۶۵ ، ۶٫۶۵ ، ۷٫۶۵)	(۱٫۶۵ ، ۲٫۶۵ ، ۳٫۶۵)	۶٫۳
B-2	(۳٫۷ ، ۴٫۷ ، ۵٫۷)	(۱٫۷۵ ، ۲٫۷۵ ، ۳٫۷۵)	(۳٫۲۴ ، ۴٫۲۴ ، ۵٫۲۴)	۳٫۶
B-3	(۱ ، ۲ ، ۳)	(۱ ، ۱ ، ۲)	(۱ ، ۱٫۲۵ ، ۲٫۲۵)	۱٫۶
C-4	(۷٫۷۵ ، ۸٫۷۵ ، ۹٫۷۵)	(۷٫۲۵ ، ۸٫۲۵ ، ۹٫۲۵)	(۱٫۷۵ ، ۲٫۷۵ ، ۳٫۷۵)	۷٫۵
D-5	(۲٫۲ ، ۳٫۲ ، ۴٫۲)	(۱ ، ۱ ، ۲)	(۱٫۳۵ ، ۲٫۱ ، ۳٫۱)	۲
D-6	(۱٫۷ ، ۲٫۷ ، ۳٫۷)	(۱٫۳۵ ، ۲٫۱ ، ۳٫۱)	(۱ ، ۱٫۴ ، ۲٫۴)	۲٫۳
E-7	(۵٫۷ ، ۶٫۷ ، ۷٫۷)	(۲٫۶ ، ۳٫۶ ، ۴٫۶)	(۳٫۳۵ ، ۴٫۳۵ ، ۵٫۳۵)	۴٫۷
E-8	(۵ ، ۶ ، ۷)	(۱ ، ۲ ، ۳)	(۲ ، ۳ ، ۴)	۳٫۲
F-9	(۷٫۷۵ ، ۸٫۷۵ ، ۹٫۷۵)	(۶٫۴ ، ۷٫۴ ، ۸٫۴)	(۲٫۱ ، ۳٫۱ ، ۴٫۱)	۷٫۲
G-10	(۸ ، ۹ ، ۱۰)	(۸٫۲۵ ، ۹٫۲۵ ، ۱۰)	(۱ ، ۱ ، ۲)	۷٫۲
H-11	(۴٫۲ ، ۵٫۲ ، ۶٫۲)	(۱٫۴ ، ۲٫۴ ، ۳٫۴)	(۳٫۳۵ ، ۴٫۳۵ ، ۵٫۳۵)	۳٫۵
H-12	(۳٫۵ ، ۴٫۵ ، ۵٫۵)	(۱ ، ۲ ، ۳)	(۳ ، ۴ ، ۵)	۳
I-13	(۷ ، ۸ ، ۹)	(۴٫۴ ، ۵٫۴ ، ۶٫۴)	(۲٫۴ ، ۳٫۴ ، ۴٫۴)	۶
I-14	(۳٫۵ ، ۴٫۵ ، ۵٫۵)	(۱ ، ۲ ، ۳)	(۲ ، ۳ ، ۴)	۲٫۸
درجه اهمیت وزنی	(۰٫۳۵ ، ۰٫۶ ، ۰٫۸۵)	(۰٫۶۶ ، ۰٫۹۱ ، ۱)	(۰ ، ۰٫۱۹ ، ۰٫۴۴)	



شکل ۳: اعداد فازی اولویت ریسک حاصل برای ۱۴ حالت رخداد در معدن مس سونگون

۳- بحث و نتایج

با توجه به نتایج اعداد فازی و قطعی اولویت ریسک لرزش زمین ناشی از آتشفشانی‌ها در ۱۴ حالت رخداد معدن سونگون مطابق با جدول ۹ و شکل ۴، واضح است که حالت رخداد C-4 بیشترین ریسک را دارد. دلایل اصلی این ریسک زیاد در ارتباط با سایت صنعتی معدن سونگون (C) عبارتند از:

- سایت صنعتی در داخل محدوده استخراجی معدن سونگون قرار دارد.
- فاصله آن مطابق با جدول ۲ و شکل ۱ از نقطه هم‌تراز آتشفشانی ۱۰۷/۹ متر است.
- چال‌های آتشفشانی آخرین تأخیر در نقطه هم‌تراز آن، ۱۷ عدد با قطر ۱۶۵ میلی‌متر است که حاوی میزان خرج مصرفی زیادی است. تحت این شرایط و مطابق با مطالعات اولیه در سونگون امواج و لرزش ناشی از آتشفشانی می‌تواند تا فاصله ۲۹۸ متری اثرات منفی داشته باشد.

با توجه به حساسیت بالای این موضوع و لزوم وجود یک سایت صنعتی برای معدن سونگون باید راهکار مناسبی برای رفع و یا کاهش درجه ریسک لرزش زمین بر روی این بخش ارائه شود. به منظور رفع کامل این نوع ریسک‌ها در ارتباط با سایت صنعتی سونگون باید مکان‌یابی جدید برای این سایت در خارج از محدوده استخراجی معدن و مطابق با اصول و معیارهای لازم، انجام شود. در این حالت، تنها می‌توان برخی از اجزای منفک قابل استفاده مجدد را از سایت جدا و به مکان جدید منتقل کرد و عمده سرمایه به‌کاررفته برای تجهیز و راه‌اندازی آن از دست می‌رود. در صورت به‌کارگیری این راه‌کار به‌طور یقین ریسکی از نوع ریسک‌های مرتبط با آتشفشانی، مکان جدید صنعتی را تهدید نخواهد کرد و این بخش کاملاً ایمن خواهد بود. در غیر این صورت، دو راهکار دیگر وجود دارد که هر دو دربرگیرنده ریسک‌های ناشی از آتشفشانی به‌ویژه لرزش زمین برای سایت صنعتی کنونی معدن سونگون خواهند بود.

در دو حالت دیگر تأکید بر حفظ مکان کنونی سایت است. درازای این کار حجم زیادی از کانسار سونگون در زیر و اطراف

سایت باقی می‌ماند و قابل بازیابی نخواهد بود که از جنبه اقتصادی ضرر زیادی در قالب ریسک‌های اقتصادی بر پروژه تحمیل خواهد کرد. البته راهکار نخست یعنی دست کشیدن از سایت کنونی نیز نیازمند سرمایه‌گذاری مجدد زیادی است که در پی آن نیز ریسک‌های اقتصادی بر پروژه تحمیل می‌شود. مطابق با راهکار دوم می‌توان بدون تغییر در الگوی آتشفشانی تنها با افزایش زون ممنوعه آتشفشانی در اطراف سایت صنعتی اثر و ریسک لرزش‌ها را بر سایت کم کرد. علاوه بر این موضوع می‌توان یکسری تمهیدات اساسی در رابطه با افزایش استحکام سازه‌ای اعمال کرد. همان‌گونه که اشاره شد با استفاده از این راهکار تناژ زیادی از کانسار بدون بهره‌برداری باقی می‌ماند که با توجه به نیاز کشورها برای دستیابی به مواد معدنی فلزی خیلی منطقی به نظر نمی‌رسد.

راهکار سوم را می‌توان به‌گونه‌ای تدوین کرد که با اعمال برخی اصلاحات اساسی در طرح و الگوی آتشفشانی بتوان زون ممنوعه را به حداقل رساند. همچنین با اعمال برخی تمهیدات برای افزایش استحکام سازه سایت صنعتی، درجه ریسک‌های لرزش را به حد مجاز یا کم مخرب، رساند. برخی از اصطلاحات در طرح آتشفشانی در راهکار سوم عبارت‌اند از: کاهش قطر و تعداد چال‌ها در هر تأخیر (کاهش خرج مصرفی در هر تأخیر و حجم آتشفشانی‌ها)، افزایش تعداد تأخیرها در هر مرحله، استفاده از مواد منفجره ضعیف‌تر و بهره‌گیری از آتشفشانی کنترل‌شده، اگرچه با استفاده از این راهکار نیز بخشی از کانسار قابل بهره‌برداری نخواهد بود اما میزان آن از راهکار دوم کم‌تر است. این نتیجه به‌واسطه کاهش حجم آتشفشانی‌ها در هر تأخیر و مرحله اتفاق می‌افتد که درنهایت منجر به کاهش آهنگ تولید می‌شود و این نیز ضعف دیگر این راهکار است که درنهایت بر ماهیت اقتصادی پروژه تأثیرگذار است.

در مجموع، انتخاب و به‌کارگیری هر کدام از این سه راهکار نیازمند یک بررسی جامع و درواقع ارزیابی و مقایسه آن‌ها از جنبه‌های فنی و به‌ویژه اقتصادی است. باید توجه کرد که رفع ریسک (راهکار اول) نیازمند صرف هزینه‌های به‌مراتب بیشتر از

مشکلاتی مانند سایت صنعتی که در داخل محدوده استخراجی قرار داشت، را داشته باشد البته نه به آن شدت، از این رو، ریسک لرزش مرتبط با آن با تعیین فاصله از نقاط هم‌تراز آتشیاری در داخل محدوده استخراجی (یعنی عدد ۱) تعیین شده که بر این اساس فاصله سنگ‌شکن تا نقطه آتشیاری هم‌تراز ۳۷۶/۸ متر است. در رابطه با انبار مواد ناریه فاصله تا نقطه هم‌تراز آتشیاری آن (۱۳) روی محدوده نهایی روباز ۳۹۶ متر است.

- به ترتیب در نقاط هم‌تراز آتشیاری ۱ و ۱۳ مرتبط با سنگ‌شکن و انبار مواد ناریه، ۱۸ و ۱۳ چال با قطر ۱۶۵ میلی‌متر در آخرین تأخیرها آتشیاری می‌شوند. با توجه به مطالعات اولیه در سونگون مطابق با تعداد و قطر چال‌های نقاط هم‌تراز آتشیاری متناسب با سنگ‌شکن و انبار مواد ناریه نیز، لرزش‌ها می‌توانند به ترتیب تا فاصله ۳۰۹ و ۲۵۶ متری اثرگذار باشند.

در نتیجه، با توجه به فاصله ۳۹۶ متری انبار مواد ناریه از نزدیک‌ترین نقطه هم‌تراز آتشیاری (نقطه ۱۳) و فاصله اثرگذاری ۲۵۶ متری لرزش ناشی از آتشیاری در این نقطه بر اساس ۱۳ چال ۱۶۵ میلی‌متری، در آخرین تأخیر می‌توان گفت که ریسک و اثرات نامطلوب لرزش‌های آتشیاری بر انبار مواد ناریه متوسط به پایین و خیلی قابل لمس نخواهد بود. بر این اساس، عدد قطعی ۶ برای عدد اولویت ریسک مطابق با جدول ۹ و شکل ۳ می‌تواند مبنا برای ارزیابی ریسک باشد. به گونه‌ای که باید اعداد اولویت ریسک بالاتر از ۶ به منظور انجام تمهیدات کاهش و رفع درجه ریسک مدنظر قرار گیرند و مدیریت شوند.

۴- نتیجه‌گیری

پس از پردازش‌های مختلف نقشه توپوگرافی محدوده مس سونگون، ۱۴ جزء مختلف به منظور ارزیابی ریسک‌های ناشی از لرزش‌های مختلف زمین طی آتشیاری در بخش‌های مختلف معدن مشخص شد. در این تحقیق، باهدف ارزیابی ریسک لرزش زمین ناشی از آتشیاری در معدن مس سونگون بنا شد که با توجه به امکان استفاده از یک‌روند عدم قطعیت (فازی) و دقت بالای مبنای روش، از رویکرد FMEA فازی استفاده شود.

کاهش ریسک مطابق با راهکارهای دوم و سوم است. البته با انتقال سایت، باوجود صرف هزینه‌های زیاد می‌توان حجم زیادی از کنسار را برای استخراج آزاد کرد و درازای آن سود زیادی نیز به پروژه اضافه می‌شود. پس از حالت رخداد C-4 (سایت صنعتی) با بیشترین ریسک، دو حالت دیگر رخداد یعنی F-9 (پمپ‌بنزین) و G-10 (تصفیه‌خانه) دارای ریسک یکسان و نزدیک به ریسک حالت C-4 هستند. دلایل اصلی ریسک زیاد لرزش زمین در ارتباط با پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه عبارت‌اند از:

- هر دو مورد در داخل محدوده استخراجی معدن سونگون قرار دارد.

- مطابق با شکل ۱ و جدول ۲ فاصله پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه از نقاط هم‌تراز آتشیاری آن‌ها که با اعداد ۹ و ۱۰ مشخص شده‌اند به ترتیب ۱۹۹ و ۳۶/۸ متر است.

- در نقاط هم‌تراز آتشیاری (۹ و ۱۰) مرتبط با پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه به ترتیب ۱۸ و ۱۳ چال با قطر ۱۶۵ میلی‌متر در آخرین تأخیرها آتشیاری می‌شوند. در این دو حالت نیز میزان خرج مصرفی انفجاری در هر تأخیر زیاد است. با توجه به مطالعات اولیه در سونگون مطابق با تعداد و قطر چال‌های نقاط هم‌تراز آتشیاری متناسب با پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه، لرزش‌ها می‌توانند به ترتیب تا فاصله ۳۰۹ و ۲۵۶ متری اثرات منفی در پی داشته باشند.

در رابطه با پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه به نظر می‌رسد که با توجه به سرمایه اولیه اختصاصی نسبتاً کم و در کل حساسیت‌های کمتر بر حفظ موقعیت کنونی آن‌ها طی عملیات استخراجی و پروژه‌های معدنی، راهکار منطقی انتقال و جایابی جدید این دو بخش به خارج از معدن باشد. پس از بررسی سه حالت پر ریسک سایت صنعتی، پمپ‌بنزین و تصفیه‌خانه که تقریباً ریسک زیادی دارند، نوبت به دو مورد بعدی یعنی سنگ‌شکن (A-1) و انبار مواد ناریه (I-13) می‌رسد که هر دو ریسک متوسط به پایینی دارند. دلایل اصلی این مسئله عبارت‌اند از:

- مطابق با شکل ۱ و جدول ۲ سنگ‌شکن بر روی محدوده نهایی استخراجی معدن قرار گرفته که از این جنبه می‌تواند

سنگ شکن نیازمند توجهی ویژه برای مدیریت در برابر ریسک‌های لرزش زمین ناشی از آتشفشانی‌ها در نقاط هم‌ترازشان هستند. این بدان مفهوم است که سایر بخش‌های تحت بررسی مانند انبار مواد ناریه، سایت تیکر، کارخانه تغلیظ، بخش کلیدخانه و نیروگاه برق با توجه به فاصله زیادی که از نقاط هم‌تراز آتشفشانی دارند و اعداد اولویت ریسک کمتر از ۶ که به خود اختصاص داده‌اند در مقابل این نوع از ریسک‌ها ایمن خواهند بود.

۵- تشکر و قدرانی

از همکاری‌های صمیمانه اعضای محترم مجتمع مس سونگون به‌ویژه آقای مهندس داود محمدی سرقینی طی این تحقیق سپاسگزاریم.

بدین منظور، مطابق با روند رویکرد FMEA فازی، برای تعیین رده‌های کیفی و اعداد فازی معادل سه فاکتور احتمال وقوع، شدت و احتمال کشف رخداد (شکست) از یک تیم سه نفره کارشناسی درزمینه آتشفشانی استفاده شد. سپس، وزن‌های فازی درجه اهمیت نسبی هر سه فاکتور احتمال وقوع، شدت و احتمال کشف رخداد توسط تیم کارشناسی با استفاده از یک الگوی مناسب تعیین شد. سپس، عدد اولویت ریسک فازی برای ۱۴ جزء یا حالت شکست محاسبه شد که طی این فرآیند تأثیر وزن‌ها بر روی سه فاکتور اصلی ارزیابی ریسک به‌صورت میانگین هندسی وزن‌های فازی در نظر گرفته شد. به‌منظور مقایسه، اولویت‌بندی و ارزیابی ریسک ۱۴ حالت شکست، اعداد فازی اولویت ریسک غیرفازی شد. درنهایت، مشخص شد که تنها سایت صنعتی، پمپ‌بنزین، تصفیه‌خانه و تا حدودی

۶- مراجع

محاسبه کیفیت انتقال انرژی حاصل از انفجارات معدن مس سونگون، کنفرانس مهندسی معدن ایران، انجمن مهندسی معدن ایران.

[5] Hajihassani, M., Armaghani, D.J., Monjezi, M., Mohamad, E.T., Marto, A. (2015). "Blast-induced air and ground vibration prediction: a particle swarm optimization-based artificial neural network approach", *Environmental Earth Sciences*: 2799-2817.

[6] Shirani Faradonbeh, R., Armaghani, D.J., Abd Majid, M.Z., MD Tahir, M., Ramesh Murlidhar, B., Monjezi, M., Wong, H.M. (2016). "Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction." *International Journal of Environmental Science and Technology* 1-12.

[1] Azimi, Y., Khoshrou, H., Saberi, H. (2007). "Seismic Wave Monitoring and Ground Vibration Analysis Generated by Bench Blasting in Sungun Copper Mine", 3rd Iranian Rock Mechanics Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran.

[۲] آزاد، ع؛ عبداللهی شریف، ج؛ ۱۳۹۱. بررسی فنی و اقتصادی آتشفشانی با بالشتک هوایی در معدن مس سونگون اهر، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، انجمن مهندسی معدن ایران.

[۳] فرامرزی، ف؛ منصوری، ح؛ ابراهیمی فرسنگی، م؛ ۱۳۹۱. ارزیابی لرزش زمین ناشی از عملیات انفجار در معدن روباز مس سونگون، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، انجمن مهندسی معدن ایران.

[۴] حسینی، ه؛ نصیری‌نژاد، ع؛ پوررحیمیان، ی؛ ۱۳۸۳. بررسی و

Assessment of the Ground Vibration Risk Caused By Blasting Using a Developed FMEA Approach in an Uncertain Environment

Bakhtavar, E.¹, Mikaeil, R.², Savfavi, S.M.A.³

1- Assistant Professor, Department of Mining and Material Engineering, Urmia University of Technology

2- Assistant Professor, Department of Mining and Material Engineering, Urmia University of Technology

3- MSc. Student, Department of Mining and Material Engineering, Urmia University of Technology

Received: Mar. 2016

Accepted: Jan. 2017

KEYWORDS

Risk assessment
Management
Blasting
Ground vibration
Fuzzy FMEA
Sungun mine

ABSTRACT

Summary

An approach based on the failure modes and event analysis (FMEA) was developed considering a three-member team of blasting experts in order to assess the ground vibration risk resulted from blasting. Fourteen states of occurrence were considered focusing the impacts of ground vibration on the infrastructures and structures of Sungun mine. Through statistical analysis, a relation was provided to determine the minimum vulnerable distance from a blast source. After presenting the qualitative and fuzzy number ratings of the

risk factors, the fuzzy number of each 14 states was determined together with the fuzzy weights of each factor according to the ideas of experts. The fuzzy risk priority numbers of the states were calculated considering the geometric mean of the fuzzy weights. Results indicated that the states C-4 (industrial site), F-9 (gas station), and G-10 (treatment site) have high risk values. Crusher (A-1) and explosive storage (I-13) both had less than an average risk and the other states included negligible risk.

Introduction

Ground vibration as one of the undesirable consequences of blasting can impose numerous risks to open pit walls, infrastructures, and structures within or around a mine. Considering the specific conditions of Sungun mine, this problem is very sensitive. The main purpose of this research is to develop an approach in an uncertain environment based on the failure modes and effect analysis (FMEA) for particularly assessing the ground vibration risks caused by blasting.

Methodology and Approaches

Fourteen cases including the infrastructures and structures sites, which were under the ground vibration risks, were considered. The location of the sites was indicated on the map of Sungun area. Blasting data were statistically analyzed using SPSS software, in order to obtain a relation for determining the minimum vulnerable distance from a blast. The main process of the ground vibration risk assessment was made using the FMEA approach, which was developed by presenting the qualitative and fuzzy number ratings of the related risk factors and also by considering the fuzzy weights of each risk factor according to the ideas of an expert team.

Results and Conclusions

Results indicated that only the industrial site, gas station, treatment site, and almost crusher had considerable ground vibration risk; hence, they should be essentially managed in order to decrease their risk levels by employing the available solutions. Because of a long distance from the blast sources, other sites had negligible risk.