

کاربرد تحلیل درخت خطای فازی در ارزیابی ریسک خطرات دستگاه سیم‌برش

در معادن سنگ ساختمانی کوثر اصفهان

زکيه نخعی پناه خلیل آباد^۱، محمد عطایی^{۲*}، رضا خالوکاکی^۳، محمدرضا بصیرنژاد^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، z_nakhaei@shahroodut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، r_kakaie@shahroodut.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، استخراج معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، mohammadreza.basirnezhad62@gmail.com

(دریافت ۲۴ تیر ۱۳۹۶، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۹۶)

چکیده

معدنکاری از جمله خطرناک‌ترین فعالیت‌ها در سراسر جهان است که همیشه با حوادث مختلف، آسیب‌ها، از دست دادن جان و خسارت به اموال همراه است. خطرات ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی فراوانی در محیط کار وجود دارد که غفلت از آن‌ها و نبود برنامه‌ریزی برای کنترل آن‌ها عواقب جبران‌ناپذیری به دنبال دارد. بنابراین، ارزیابی ریسک اهمیت به سزایی در این معادن دارد. هدف از این پژوهش ارزیابی ریسک ایمنی خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش به روش درخت خطای فازی و همچنین به کارگیری برخی از روش‌های تعدیل برای کاهش این خطرات در معادن سنگ ساختمانی است. در پژوهش حاضر پس از انجام مطالعات و جمع‌آوری اطلاعات درباره علل خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش، قضاوت از طریق پرسش‌نامه توسط متخصصان مربوط انجام و خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش شناسایی شده، سپس نسبت به تحلیل و ریشه‌یابی علل خطرات با روش تحلیل درخت خطا اقدام شده است. با توجه به مدل درختی که با این روش ایجاد شده، برای وزن دادن به علل ریشه‌ای که به عنوان رویدادهای اساسی تعیین شده‌اند از تئوری فازی بهره گرفته شده است تا در نهایت احتمال وقوع هر رویداد اساسی به دست آید. نتایج نشان داده است که بیشترین احتمال وقوع در بین رویدادهای میانی به ترتیب برای خطرات ناشی از تعمیر و نگهداری، خطرات ناشی از مسایل زمین‌شناسی و خطرات ناشی از طراحی نادرست و بیشترین احتمال وقوع در بین رویدادهای اساسی به ترتیب برای خطرات ناشی از حرکت و ضربه شلاقی سیم ناشی از گسیختگی، خطرات ناشی از انحراف داشتن سیم‌برش و خطرات ناشی از وجود لاکارتی (گل و لای) در داخل بلوک سنگ است. در نهایت با توجه به روش‌های کنترلی پاسخ مناسبی برای کنترل این ریسک‌ها ارائه شده است.

کلمات کلیدی

مدیریت ریسک، تحلیل درخت خطای فازی، معادن سنگ ساختمانی، دستگاه سیم‌برش

۱- مقدمه

در سال ۱۳۸۸ میخک بیرانوند و الماسی به ارزیابی فنی و ایمنی معدن تحت پوشش شرکت معدنی پرداختند. در این مطالعه با توجه به اینکه حفظ سلامت کارگران و کارمندان هر شرکت یا کارخانه در اولویت کاری آنها قرار دارد، به ارزیابی ایمنی پرداخته شد [۴].

در سال ۲۰۱۴ یاراحمدی و همکارانش به ارزیابی ریسک ایمنی معدن سنگ ساختمانی ایران پرداختند. در این مطالعه، قضاوت از طریق پرسشنامه توسط کارشناسان مربوط انجام و حوادث خطرناک معدن شناسایی و ریسک ایمنی آنها بررسی شد. رتبه‌بندی حوادث نشان داد که مهم‌ترین منابع خطر، به ترتیب خطر تصادفات ترافیکی، پارگی سیم‌برش و سقوط سنگ بوده است [۵].

در سال ۲۰۱۷ دهقان و ستاری به مدیریت و تحلیل ریسک ایمنی در معدن سنگ ساختمانی شهرستان محلات با استفاده از تکنیک حالات خطا و تجزیه و تحلیل اثرات آن پرداختند. حوادث موجود در این معدن در ۱۵ دسته شناسایی و ارزیابی شدند که ۷ ریسک در بازه غیر قابل قبول و با درجه ریسک بالا شناخته شدند [۶].

با توجه به تحقیقاتی که در گذشته انجام شده، این پژوهش با هدف ارائه رویکردی برای ارزیابی ریسک انجام شده است. ارزیابی احتمال وقوع حوادث و آسیب‌های آن، با فرمول‌هایی ریاضی، درک دقیق‌تری از خطرات را ارائه می‌دهد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر ارزیابی ریسک خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش در معدن ساختمانی ایران با به‌کارگیری این رویکرد است. این مقاله همچنین نشان می‌دهد که چگونه ارزیابی ریسک می‌تواند برای اطلاع از تعدیلات ریسک استفاده شود و در نتیجه سهم برجسته‌ای در کاهش ریسک در معدن داشته باشد.

۲- تئوری مقاله

روش تحلیل درخت خطا برای اولین بار در سال ۱۹۶۱ توسط واتسون^۲ ابداع و برای تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شد [۷]. موفقیت این روش در شناسایی و حذف نقاط ضعف سیستم باعث شد تا ابزاری قدرتمند در زمینه ارزیابی و مدیریت ریسک سیستم‌های پیچیده محسوب شود [۸].

تحلیل درخت خطا یک ابزار مناسب برای تجزیه و تحلیل شکست و تعیین میزان شکست است. در بعضی موارد، ارتباط بین عوامل اصلی شکست سیستم دشوار یا حتی غیرممکن است. علاوه بر این، محاسبه دستیابی احتمال شکست در زیرسیستم سخت یا غیرممکن است. همچنین، در بعضی از شرایط نبود

حجم عملیات‌های معدنی با رشد و توسعه صنعت معدن در بسیاری از کشورها به طور چشم‌گیری افزایش یافته و بر اهمیت آن افزوده است و به تبع آن خطرات و ریسک‌های موجود در معدن نیز بیشتر شده است، بنابراین لازم است برای افزایش ایمنی و کاهش خطرات، ارزیابی جامعی از حوادث و پیامدهای مربوط به آنها در طول معدنکاری انجام شود. به همین دلیل برای مدیریت موثر در معدن رویکردهای جدیدی همچون مدیریت ریسک توصیه شده است. یکی از روش‌هایی که می‌توان از آنها برای مدیریت ریسک بهره‌گرفت روش ترکیبی تحلیل درخت خطا با تئوری فازی است.

استخراج در معدن سنگ ساختمانی یکی از شاخه‌های خطرناک فعالیت معدنکاری است، تا آنجا که طبق گزارش‌ها معدن زغال‌سنگ و معدن سنگ ساختمانی بالاترین نرخ حوادث در مقایسه با دیگر معدن را دارند. با توجه به گزارش سالانه مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۱، ۱۸۹ حادثه در معدن سنگ ساختمانی ایران اتفاق افتاده که ۱۸۶ حادثه منجر به صدمات و مرگ و میر داشته است [۱]. بنابراین، کاهش خطرات در این معدن اهمیت زیادی دارد و منجر به توسعه تولید و پس از آن، بهبود اقتصاد کشور می‌شود.

در بین انواع متفاوت معدنکاری از جمله زیرزمینی، سطحی و ساختمانی، سابقه بدی برای نرخ بالای اتفاقات و سوانح مشاهده شده است. معدن سنگ ساختمانی حوادث ویژه خود را دارند که توسط برخی محققان در ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۱۳۸۶ مختاری و همکارانش تحلیل ریسک ایمنی در استخراج سنگ تزئینی به روش سیم‌برش الماسه را انجام دادند. در این تحقیق برای تحلیل ریسک ایمنی در استخراج سنگ تزئینی به روش سیم‌برش الماسه ابتدا جدولی از عنوان و شرح حوادث در معدن بازدید شده تهیه و برای هر حادثه، میزان احتمال و خسارتی تعیین شد، سپس با ارائه راهکارهایی باعث کاهش میزان احتمال و خسارت شده و در نتیجه کاهش میزان ریسک را در پی داشت [۲].

در سال ۱۳۸۶ امیرافشاری و همکارانش ضرورت آموزش و فرهنگ‌سازی HSE^۱ در معدن سنگ نما و تزئینی ایران را بررسی کردند. نتایج حاکی از نیاز این معدن به سیستم مدیریت منحصر به فردی است که منجر به کاهش خطرات و نتایج زیان‌بار آنها شود [۳].

مجموعه برش حداقل^۷: کمترین گروه رویدادهای اساسی که برای وقوع رویداد اصلی لازم و کافی باشد.

درگاه^۸: رویدادهای مختلف در بدنه درخت خطا به وسیله درگاه به یکدیگر وصل می‌شوند. درگاه‌ها با توجه به نوع خود یک یا چند ورودی دارند ولی تنها دارای یک خروجی‌اند.

درگاه «یا»^۹: این درگاه برای نشان دادن این حالت که برای وقوع رویداد خروجی رخ دادن یکی از رویدادهای ورودی کافی است به کار گرفته می‌شود. رویداد خروجی ممکن است میانی یا بالایی باشد و رویدادهای ورودی نیز می‌توانند رویداد میانی، اساسی و یا ترکیبی از آن‌ها باشند.

درگاه «و»^{۱۰}: این درگاه به این معنی است که وقوع رویداد خروجی مستلزم رخ دادن کلیه رویدادهای ورودی است. رویداد خروجی می‌تواند رویداد بالایی یا میانی باشد و رویداد ورودی نیز ممکن است رویداد میانی، اساسی و یا ترکیبی از آن دو باشد.

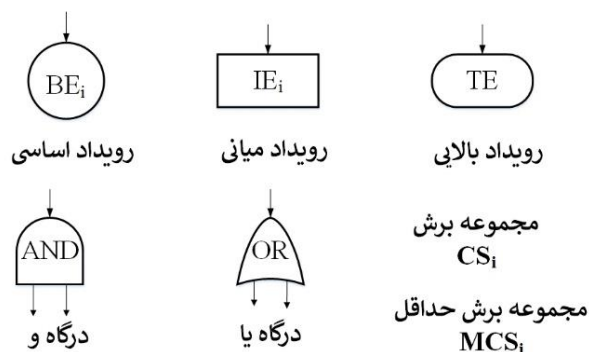
نمادهای انتقال: زمانی که تحلیل‌گر درخت خطا در حین کار بر روی یک شاخه درخت خطا به مرحله‌ای برسد که از آن به بعد در شاخه دیگری از آن درخت خطا نیز تکرار شده باشد می‌تواند آن را به شاخه یاد شده منتقل کند و کار خود را در شاخه جدید به پایان برساند که برای این عمل از نمادهای «انتقال به» استفاده می‌شود و از نماد «انتقال از» برای نشان دادن ادامه کار در صفحات بعد به ویژه در درخت خطای سیستم‌های بزرگ و پیچیده که در یک صفحه جای نمی‌گیرند نیز استفاده می‌شود.

با وجود اینکه تمام سعی بر این بوده که شناسایی جامعی از خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش در معادن سنگ ساختمانی انجام شود؛ ممکن است بعضی از خطرات و یا علل آن‌ها شناسایی نشده و مورد ارزیابی قرار نگرفته باشد. در این تحقیق برای شناسایی خطرات از روش‌های مختلفی همچون تحقیق و مطالعه مقالات گذشته، مصاحبه با متخصصان و استفاده از فرم‌های درس آموزی از حوادث سازمان نظام مهندسی معدن استفاده شده است. خطرات شناسایی شده مربوط به دستگاه سیم‌برش در ۶ گروه خطرات مربوط به اپراتور IE_1 ، زمین‌شناسی IE_2 ، طراحی IE_3 ، تعمیر و نگهداری سیم‌برش IE_4 ، خطر پرتاب شدن قسمت‌هایی از فنر و یا اجزای فعال فنر IE_5 و سقوط بلوک سنگ در حین برش IE_6 و ۶ زیر گروه در قالب رویدادهای میانی و علل هریک به عنوان رویداد اساسی در ساختار درخت خطا قرار داده شدند (جدول ۱ و شکل ۲).

اطلاعات در مورد رویدادهای اصلی حاصل شده و نتایج نامطمئن است. در این مواقع می‌توان برای رفع عدم قطعیت از تحلیل درخت خطای فازی استفاده کرد.

در این روش، تحلیل از کل به جز است که تجزیه و تحلیل را از رویداد بالایی^۳ (کل) آغاز و علل به وجود آورنده را در ساختار درخت خطا به عنوان رویدادهای میانی^۴ و اساسی^۵ (جز) شناسایی می‌کند و تحلیل مساله را تا زمانی که به سطح مناسبی از جزئیات برسد ادامه می‌دهد. این روش به صورت گرافیکی و بسیار دقیق، با استفاده از نمادها علل ریشه‌ای حوادث را بررسی می‌کند و می‌تواند احتمال وقوع رویدادها را تخمین بزند [۹].

اصطلاحات و نمادهای درخت خطا: در ساختار درخت خطا از اصطلاحات و نمادهای مختلفی استفاده شده است که نوع رویدادها و ارتباط آن‌ها را با هم به صورت تصویری نشان می‌دهد. مهم‌ترین علائم مورد استفاده در ترسیم درخت خطا در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۱- اصطلاحات و نمادهای ساختار درخت خطا [۱۰]

رویداد بالایی یا نهایی: رویدادی منحصر به فرد که نقطه شروع ساختار و در بالاترین نقطه درخت خطا است و علل به وجود آورنده آن شناسایی و تجزیه و تحلیل می‌شود.

رویداد میانی: هر رویدادی در ساختمان درخت خطا به استثنای رویداد اصلی که مورد تجزیه و تحلیل بیشتر قرار گرفته است و علل به وجود آورنده آن تعیین می‌شود.

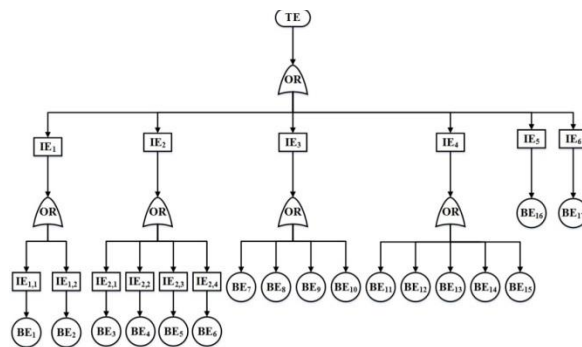
رویداد اساسی: ممکن است با عنوان‌هایی مانند رویدادهای انتهایی یا اولیه نیز خوانده شود و رویدادی است که نمی‌توان علل به وجود آورنده آن را تعیین کرد.

مجموعه برش^۶: ترکیبی از رویدادهای اساسی است که می‌تواند باعث بروز رویداد اصلی شود، رویداد اصلی ممکن است بیش از یک برش داشته باشد.

جدول ۱- خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش در معادن ساختمانی

علت	رویداد	
نبود آموزش BE ₁	عدم کفایت و آگاهی اپراتور IE _{1,1}	اپراتور IE ₁
نبود آموزش BE ₂		
عبور سیم از لبه‌های بلوک سنگ و ناپیوستگی‌های سنگ BE ₃	تمرکز تنش‌های غیر معمول IE _{2,1}	زمین شناسی IE ₂
عدم شناسایی BE ₄	گسل خوردگی و درزه و شکاف IE _{2,2}	
عدم شناسایی BE ₅	برخورد با لایه خیلی سخت IE _{2,3}	
عدم شناسایی BE ₆	برخورد با لایه نرم IE _{2,4}	
رعایت نکردن ارتفاع برش مناسب BE ₇	طراحی IE ₃	
فشار بیش از حد سیم (کشش دستگاه) BE ₈		
زاویه تند برش BE ₉		
زاویه باز برش BE ₁₀		
فرسودگی سیم‌برش BE ₁₁	نگهداری و تعمیر سیم‌برش IE ₄	
زدگی در سیم BE ₁₂		
انحراف داشتن سیم‌برش BE ₁₃		
وجود خاک و سنگریزه در سیم BE ₁₄		
خستگی ناشی از تنش خمشی سیم BE ₁₅		
حرکت و ضربه شلاقی ناشی از گسیختگی سیم BE ₁₆	خطر پرتاب شدن قسمت‌هایی از فنر و یا اجزای فعال فنر IE ₅	
وجود لاکارتی (گل و لای) در داخل بلوک سنگ BE ₁₇	سقوط بلوک سنگ در حین برش IE ₆	

خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش TE



شکل ۲- درخت خطای خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش TE

داشته باشند و با شیوه اجرای این تحقیق یعنی تحلیل درخت خطای فازی آشنا باشند تا از نظرات آن‌ها بیشترین بهره برده شود (جدول ۲).

مرحله اول، انتخاب متخصصان: برای انتخاب متخصصان نیاز به افرادی است که اطلاعات و تجربه کافی و به روز در مورد خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش در معادن سنگ ساختمانی

جدول ۲- مشخصات متخصصان

شماره	عنوان شغل	تجربه کاری	سطح تحصیلات	سن	وزن متخصص	امتیاز وزنی متخصص
۱	کارشناس استخراج	۷	کارشناسی	۳۴	۱۰	۰/۰۸۷
۲	استادکار	۱۵	زیر دیپلم	۴۲	۹	۰/۰۷۸
۳	کارمند	۹	کارشناسی ارشد	۳۳	۱۱	۰/۰۹۶
۴	سرپرست معدن	۶	کارشناسی	۳۵	۱۱	۰/۰۹۶
۵	سرپرست معدن	۱۳	کارشناسی	۳۳	۱۲	۰/۱۰۴
۶	معدن کار	۳۰	دیپلم	۵۵	۱۱	۰/۰۹۶
۷	دارنده پروانه بهره برداری	۱۷	دیپلم	۳۹	۱۰	۰/۰۸۷
۸	دارنده پروانه بهره برداری	۲۲	کارشناسی ارشد	۴۳	۱۵	۰/۱۳۰
۹	مدیر عامل	۱۵	کارشناسی	۴۰	۱۴	۰/۱۲۲
۱۰	کارشناس استخراج	۲	دانشجوی دکتری	۳۰	۱۱	۰/۰۹۶

مرحله دوم، تعیین وزن متخصصان و کمی‌سازی

نظرات: از آنجایی که این متخصصان اهمیت وزنی یکسانی ندارند، برای تعیین وزن از روش لوسانی و همکارانش استفاده شده است [۱۱]. در این روش پارامترهای شغل، میزان تجربه کاری بر حسب سال، میزان تحصیلات و سن برای تعیین امتیاز وزنی به کار رفته و شیوه امتیازدهی متخصصان در جدول ۳ ارائه شده است. هدف از مرحله فازی‌سازی، تعیین احتمال شکست اولیه در داده‌ها در قالب تابع عضویت اعداد فازی که از ترم‌های

زبانی گرفته شده‌اند، است. به دلیل اینکه روش ذوزنقه‌ای نسبت روش مثلثی کامل‌تر است و توابع مثلثی را هم در نظر می‌گیرد در این پژوهش از عدد فازی ذوزنقه‌ای استفاده شده است تا نظرات متخصصان (جدول ۴) در مورد رویدادهای اساسی را بتوان با استفاده از ترم‌های زبانی خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) که در جدول ۵ ارائه و در شکل ۳ نشان داده شده، جمع‌آوری و فازی‌سازی کرد.

جدول ۳- امتیاز وزنی متخصصان [۱۱]

پارامتر	طبقه بندی	امتیاز	پارامتر	طبقه بندی	امتیاز
عنوان شغل	مدیرعامل	۵	تجربه کاری (سال)	≥ 30	۵
	کارشناس ارشد (دارنده پروانه بهره - برداری، سرپرست)	۴		۲۰-۲۹	۴
	مهندس (ناظر، کارشناس)	۳		۱۰-۱۹	۳
	اپراتور (استادکار)	۲		۶-۹	۲
	کارگر (معدنکار)	۱		≤ 5	۱
سطح تحصیلات	دکتری مهندسی معدن	۵	سن	≥ 50	۴
	کارشناسی ارشد مهندسی معدن	۴		۴۰-۴۹	۳
	کارشناسی مهندسی معدن	۳		۳۰-۳۹	۲
	فوق دیپلم	۲		< 30	۱
	دیپلم و زیر دیپلم	۱			

جدول ۴- نظرات متخصصان در رابطه با رویدادهای اساسی

شماره متخصص	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
BE ₁	VL	M	VH	L	M	H	VL	L	H	M
BE ₂	VL	M	VH	L	M	VH	L	M	H	H
BE ₃	L	M	VH	M	H	H	L	H	M	M
BE ₄	M	H	VH	M	M	VH	M	H	M	M
BE ₅	L	L	VH	M	M	VH	H	L	M	M
BE ₆	VL	L	VH	L	M	M	M	M	M	M
BE ₇	L	VL	VH	M	M	M	M	L	VH	H
BE ₈	M	L	VH	M	H	H	L	H	H	H
BE ₉	L	VL	VH	M	M	VH	L	M	M	M
BE ₁₀	L	L	VH	M	H	H	L	H	H	H
BE ₁₁	M	M	VH	M	H	H	L	H	H	H
BE ₁₂	H	H	M	H	H	VH	H	M	M	L
BE ₁₃	H	M	M	H	H	VH	H	M	M	L
BE ₁₄	L	VL	M	M	M	L	H	H	M	VH
BE ₁₅	VL	M	VH	H	H	H	M	M	L	VH
BE ₁₆	M	M	VH	H	H	L	H	M	M	M
BE ₁₇	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M

است به دلیل عدم وجود داده‌هایی که از محدودیت‌های فیزیکی یا کمبود منابع ناشی می‌شود ابهامی وجود داشته باشد که این ناهماهنگی پس از ترکیب نظرات متخصصان برطرف می‌شود [۱۳]. برای اجماع نظر متخصصان طبق رابطه ۱ که توسط کلمن و وینکلر^{۱۱} ارائه شده، باید امتیاز وزنی هر متخصص در ترم‌های زبانی او ضرب شود و به صورت یک عدد فازی دوزنقه ای $\tilde{M} = (m_1, m_2, m_3, m_4)$ ارائه شود (جدول ۶) [۱۴].

$$\tilde{M} = \sum_{i=1}^m W_j A_{ij} \cdot j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در این رابطه:

\tilde{M} عدد فازی اجماع نظر متخصصان برای هر رویداد اساسی

A_{ij} ترم زبانی مربوط به رویداد اساسی i توسط متخصص j

W_j امتیاز وزنی متخصص j

m تعداد رویدادهای اساسی

n تعداد متخصصان

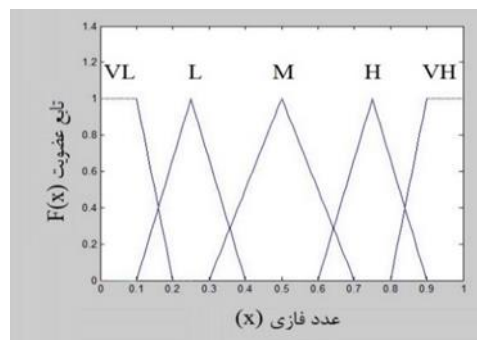
m_1, m_2, m_3, m_4 به ترتیب مولفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم عدد فازی \tilde{M} است.

مرحله چهارم، غیر فازی سازی: بعد از اجماع نظر متخصصان

در رابطه با احتمال وقوع رویدادهای اساسی به صورت اعداد فازی، و به دلیل متغیرهای زیاد و محاسبات گسترده اعداد فازی، باید اعداد فازی را به اعداد قطعی تبدیل کرد (جدول ۷). برای غیر فازی سازی از فرمولی که توسط سوگنو^{۱۲} توسعه یافته (روابط ۲ و ۳)، استفاده شده است. دلیل این انتخاب این است که این فرمول تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت آن‌ها را در نظر

جدول ۵- ارزش عددی معادل توابع عضویت

ترم‌های زبانی	وزن ترم‌های زبانی			
خیلی کم (VL)	۰	۰	۰/۱	۰/۲
کم (L)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۴
متوسط (M)	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۷
زیاد (H)	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۹
خیلی زیاد (VH)	۰/۸	۰/۹	۱	۱



شکل ۳- اعداد فازی گرافیکی متناظر با توابع عضویت

مرحله سوم، اجماع نظر متخصصان: متخصصان نظرات

مختلفی را نسبت به دانش، تجربه و تجربه خود دارند. نکته مهم در این جا این است که پس از فرآیند جمع‌آوری نظرات متخصصان توافقی فراهم شود [۱۲]. همچنین گاهی اوقات ممکن

می‌گیرد [۱۵].

جدول ۶- عدد فازی اجماع نظر متخصصان برای هر رویداد اساسی

عدد فازی اجماع نظر متخصصان				رویداد	عدد فازی اجماع نظر متخصصان				رویداد
m1	m2	m3	m4		m1	m2	m3	m4	
۰٫۴۰۳	۰٫۵۵۸	۰٫۵۶۶	۰٫۷۱۳	BE ₁₀	۰٫۳۱۶	۰٫۴۴۹	۰٫۴۷۶	۰٫۶۱۷	BE ₁
۰٫۴۵۱	۰٫۶۰۱	۰٫۶۲۷	۰٫۷۶۸	BE ₁₁	۰٫۳۹۹	۰٫۵۴۲	۰٫۵۷۰	۰٫۷۰۳	BE ₂
۰٫۴۹۶	۰٫۶۲۷	۰٫۶۵۸	۰٫۷۷۵	BE ₁₂	۰٫۴۱۳	۰٫۵۷۸	۰٫۵۸۸	۰٫۷۴۳	BE ₃
۰٫۴۸۴	۰٫۶۵۴	۰٫۶۵۴	۰٫۸۲۳	BE ₁₃	۰٫۴۶۰	۰٫۶۳۰	۰٫۶۴۹	۰٫۸۰۰	BE ₄
۰٫۴۵۶	۰٫۶۲۱	۰٫۶۳۲	۰٫۷۸۶	BE ₁₄	۰٫۳۶۳	۰٫۵۲۵	۰٫۵۴۴	۰٫۶۸۶	BE ₅
۰٫۳۶۷	۰٫۵۲۰	۰٫۵۲۹	۰٫۶۹۰	BE ₁₅	۰٫۲۸۷	۰٫۴۵۱	۰٫۴۶۹	۰٫۶۳۲	BE ₆
۰٫۵۱۵	۰٫۶۵۶	۰٫۶۸۶	۰٫۸۱۲	BE ₁₆	۰٫۳۷۱	۰٫۵۱۸	۰٫۵۴۷	۰٫۶۸۰	BE ₇
۰٫۴۹۰	۰٫۶۴۶	۰٫۶۷۱	۰٫۸۰۱	BE ₁₇	۰٫۴۱۵	۰٫۵۶۹	۰٫۵۷۹	۰٫۷۲۴	BE ₈
۰٫۴۰۳	۰٫۵۵۸	۰٫۵۶۶	۰٫۷۱۳	BE ₁₀	۰٫۲۹۲	۰٫۴۴۶	۰٫۴۶۴	۰٫۶۱۷	BE ₉

جدول ۷- نتایج حاصل از محاسبات مربوط به هر یک از رویدادهای اساسی

رتبه	اهمیت هر رویداد	FP	FPS	نام رویداد	نماد رویداد
۱۵	۰٫۰۲۸	۰٫۰۰۴	۰٫۴۶۵	عدم کفایت و آگاهی اپراتور به علت عدم آموزش	BE ₁
۱۱	۰٫۰۵۲	۰٫۰۰۷	۰٫۵۵۳	عدم توجه اپراتور به علت نبود آموزش	BE ₂
۸	۰٫۰۶۲	۰٫۰۰۹	۰٫۵۸۰	عبور سیم از لبه‌های بلوک سنگ و ناپیوستگی‌های سنگ	BE ₃
۵	۰٫۰۸۷	۰٫۰۱۲	۰٫۶۳۳	عدم شناسایی گسل خوردگی و درزه و شکاف	BE ₄
۱۳	۰٫۰۴۴	۰٫۰۰۶	۰٫۵۲۸	عدم شناسایی در برخورد با لایه خیلی سخت	BE ₅
۱۶	۰٫۰۲۷	۰٫۰۰۴	۰٫۴۶۰	عدم شناسایی در برخورد با لایه نرم	BE ₆
۱۴	۰٫۰۴۴	۰٫۰۰۶	۰٫۵۲۸	رعایت نکردن ارتفاع برش مناسب	BE ₇
۹	۰٫۰۵۸	۰٫۰۰۸	۰٫۵۷۱	فشار بیش از حد سیم (کشش دستگاه)	BE ₈
۱۷	۰٫۰۲۶	۰٫۰۰۴	۰٫۴۵۵	زاویه تند برش	BE ₉
۱۰	۰٫۰۵۴	۰٫۰۰۸	۰٫۵۵۹	زاویه باز برش	BE ₁₀
۷	۰٫۰۷۵	۰٫۰۱۱	۰٫۶۱۱	فرسودگی سیم‌برش	BE ₁₁
۴	۰٫۰۹۰	۰٫۰۱۳	۰٫۶۳۸	زدگی در سیم	BE ₁₂
۲	۰٫۰۹۹	۰٫۰۱۴	۰٫۶۵۴	انحراف داشتن سیم‌برش	BE ₁₃
۶	۰٫۰۸۱	۰٫۰۱۱	۰٫۶۲۳	وجود خاک و سنگریزه در سیم	BE ₁₄
۱۲	۰٫۰۴۳	۰٫۰۰۶	۰٫۵۲۷	خستگی ناشی از تنش خمشی سیم	BE ₁₅
۱	۰٫۱۰۷	۰٫۰۱۵	۰٫۶۶۶	حرکت و ضربه شلاقی ناشی از گسیختگی سیم	BE ₁₆
۳	۰٫۰۹۷	۰٫۰۱۴	۰٫۶۵۰	وجود لاکارتی (گل و لای) در داخل بلوک سنگ	BE ₁₇

$$FPS = \frac{\int \mu_i(x) dx}{\int \mu_i(x) dx} = \frac{\int_{m_1}^{m_2} \frac{x - m_1}{m_2 - m_1} dx + \int_{m_2}^{m_3} x dx + \int_{m_3}^{m_4} \frac{m_4 - x}{m_4 - m_3} dx}{\int_{m_1}^{m_2} \frac{x - m_1}{m_2 - m_1} dx + \int_{m_2}^{m_3} dx + \int_{m_3}^{m_4} \frac{m_4 - x}{m_4 - m_3} dx} \quad (2)$$

$$FPS = \frac{1}{3} \times \left[\frac{(m_4 + m_3)^2 - (m_4 \times m_3) - (m_2 + m_1)^2 + (m_2 \times m_1)}{(m_4 + m_3 - m_2 - m_1)} \right] \quad (3)$$

که در این روابط:
 $\mu_i(x)$ تابع عضویت جمع شده
 x متغیر خروجی
 FPS عدد امکانی حاصل از غیر فازی سازی^{۱۳} است.

مرحله پنجم، تبدیل امکان به احتمال: اعداد قطعی به دست آمده در مرحله قبل هنوز به صورت امکانی است و باید به حالت احتمالی تبدیل شود چرا که محاسبات درخت خطا بر اساس احتمال رویدادها انجام می شود. برای این کار از روابط ۴ و ۵ که توسط انیسوا^{۱۴} ارائه شده استفاده می شود (جدول ۷) [۱۶].

$$P(E_o) = \prod_{i=1}^n P(E_i) \quad (4)$$

ب- محاسبه احتمال با درگاه "یا"

خروجی درگاه "یا" اگر حداقل یک رویداد ورودی رخ دهد، رخ می دهد. درگاه "یا" به یک سیستم سری با رویدادهای غیر وابسته مربوط می شود که احتمال شکست را می توان با استفاده از رابطه ۷ محاسبه کرد.

$$P(E_o) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i)) = 1 - [(1 - P(MCS_1)) \times \dots \times (1 - P(MCS_n))] \quad (5)$$

که در آن:

$P(E_o)$ احتمال وقوع رویداد خروجی از درگاه (نهایی یا میانی) $P(E_i)$ یا $P(MCS_i)$ احتمال وقوع رویداد ورودی به درگاه یا احتمال وقوع هر یک از مجموعه های برش حداقل n تعداد رویدادهای ورودی درگاه و یا تعداد مجموعه های برشی حداقل

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & FPS \neq 0 \\ 0 & FPS = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \left[\left(\frac{1}{FPS} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (5)$$

که در این روابط:

FP احتمال شکست^{۱۵} هر رویداد اساسی

FPS عدد امکانی حاصل از غیر فازی سازی

مرحله ششم، تعیین احتمال وقوع رویداد نهایی: بعد از تعیین نرخ احتمال رویدادهای اساسی و با استفاده از اطلاعات به دست آمده، باید نرخ احتمال رویدادهای میانی و نهایی محاسبه شود. هر درخت خطا شامل تعداد زیادی از مجموعه های برشی است که برای رویداد نهایی منحصر به فرد است. با داشتن یا محاسبه نرخ احتمال رویدادهای اساسی بسته به نوع درگاه مورد استفاده، می توان احتمال هر شاخه را تا رسیدن به رویداد بالایی از پایین به بالا محاسبه کرد (جدول ۸) [۱۷].

جدول ۸- احتمال رویداد نهایی

نماد	نوع	نام رویداد	احتمال
TE	نهایی	خطرات مربوط به دستگاه سیم برش	۰/۱۳۹

الف- محاسبه احتمال با درگاه "و"

درگاه "و" برای مدلسازی حوادثی که باید به طور همزمان به وقوع پیوسته باشد، استفاده می شود. درگاه "و" به یک سیستم موازی متصل می شود که احتمال شکست به عنوان محصول

مرحله هفتم، تعیین میزان اهمیت و رتبه بندی مجموعه های برشی: بعد از محاسبه نرخ احتمال رویداد نهایی، با استفاده از رابطه فاسل-وسلی^{۱۶} (رابطه ۸) باید میزان اهمیت مجموعه های برشی حداقل مشخص و رتبه بندی شوند. از آنجایی که حوادث از دیدگاه قابلیت اطمینان و ریسک شناسایی می شوند، این اهمیت عددی به تمام رویدادهای اساسی و میانی اجازه می دهد تا اولویت بندی شوند (جدول های ۷ و ۹) [۱۸].

$$FVI(i) = \frac{P(MCS_i)}{P(TE)} \quad (8)$$

که در آن:

$P(MCS_i)$ احتمال هر یک از مجموعه های برشی

$P(TE)$ احتمال رویداد نهایی

$FVI(i)$ اهمیت هر یک از مجموعه های برشی است.

مرحله هشتم، پاسخ به رویدادهای میانی به وجود آورنده ریسک: بعد از ارزیابی و رتبه بندی ریسک نیاز است که برای کنترل ریسک های بحرانی اقداماتی انجام شود به همین منظور

در بین رویدادهای اساسی، مجموعه‌های برشی حداقل خطرات ناشی از حرکت و ضربه شلاقی ناشی از گسیختگی سیم با رتبه ۱ و احتمال ۱۰/۷۱ درصد، خطرات ناشی از انحراف داشتن سیم‌برش با رتبه ۲ و احتمال ۹/۸۰ درصد و خطرات ناشی از وجود لاکارتی (گل و لای) در داخل بلوک سنگ با رتبه ۳ و احتمال ۹/۶۱ درصد به عنوان ۳ مسیر بحرانی شناخته شدند که با ارائه راهکارهای زیر می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش و احتمال وقوع آن‌ها را کاهش داد:

- برای جلوگیری از پرتاب قسمت‌هایی از فنر و یا اجزای فعال فنر از سیم‌برش‌های پلاستیکی به جای فلزی استفاده شود.
- حفاظ‌های پلاستیکی به دور محدوده برش به کار برده شود.
- از گیره و بست‌های ایمنی در فواصل مناسب بین سگمنت‌ها استفاده شود تا تعداد سگمنت‌های پرتاب شده کاهش یابد.
- در ساخت سیم‌برش از کابل محوری و اتصالات مقاوم استفاده شود.
- در صورت استفاده از سیم‌برش‌های پلاستیکی، پلیمر مقاوم در ساخت و بافت آن‌ها به کار برده شود.
- دستورالعمل‌هایی و جزوات ایمنی تهیه و به پرسنل آموزش داده شود.
- به طور مداوم بر استفاده از وسایل حفاظت فردی و گروهی نظارت و تاکید شود.
- بازدیدهای منظم و نظارتی دقیق از محیط کار انجام شود.
- قبل از شروع فرآیند برش بازرسی‌ها برای اطمینان از عدم وجود لاکارتی (گل و لای) در داخل بلوک سنگ انجام شود تا مانع سقوط بلوک سنگ در حین برش شود.

برنامه کنترل و پاسخ به ریسک مطرح می‌شود. پاسخ به ریسک از اجزای اصلی مدیریت ریسک به شمار می‌رود که می‌تواند ریسک‌های منفی را کاهش و یا حتی ریسک‌های مثبت را افزایش دهد.

۳- نتایج و بحث

برای اجرای این روش ابتدا با در نظر گرفتن کلیه خطرات مربوط به دستگاه سیم‌برش به عنوان رویداد نهایی که در معادن سنگ ساختمانی اتفاق می‌افتد و تهیه پرسش‌نامه، مهم‌ترین حوادث شناسایی و به عنوان رویدادهای میانی درخت خطا به کار برده شد و علل وقوع آن‌ها نیز شناسایی شد، سپس کلیه علل حوادث شناسایی شده (جدول ۱) در قالب رویدادهای میانی و اساسی در یک ساختار بالا به پایین درخت مانند، مرتب (شکل ۲) و از آن برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی استفاده شده است. همچنین مشخصات متخصصان در جدول ۲ و نظرات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است، سپس طبق رابطه ۱ امتیاز وزنی هر متخصص در وزن ترم‌های زبانی او ضرب و عدد فازی اجماع نظر متخصصان در رابطه با هر رویداد اساسی در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از محاسبات تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی (FPS)، نرخ احتمال (FP) به دست آمده برای هر رویداد اساسی در جدول ۷ نشان داده شده است.

بعد از تعیین نرخ احتمال رویدادهای اساسی و با استفاده از اطلاعات به دست آمده، نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی محاسبه و در جدول‌هایی ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای جلوگیری از خسارات و صدمات و افزایش ایمنی، باید از طریق اقدامات کنترلی میزان احتمال وقوع خطرات را کاهش داد. به همین منظور باید با استفاده از رابطه ۸ میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل مشخص و رتبه‌بندی شود که نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. بر اساس محاسبات انجام شده

جدول ۹- نرخ احتمال رویدادهای میانی

نماد رویداد	نام رویداد	FP	اهمیت هر رویداد	رتبه
IE ₁	اپراتور	۰/۰۱۱	۰/۰۷۹	۶
IE ₂	زمین‌شناسی	۰/۰۳۱	۰/۲۱۶	۲
IE ₃	طراحی	۰/۰۲۵	۰/۱۸۰	۳
IE ₄	نگهداری و تعمیر	۰/۰۵۳	۰/۳۸۰	۱
IE ₅	خطر پرتاب شدن قسمت‌هایی از فنر و یا اجزای فعال فنر	۰/۰۱۵	۰/۱۰۷	۴
IE ₆	سقوط بلوک سنگ در حین برش	۰/۰۱۴	۰/۰۹۷	۵

بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی حداقل مربوط به دستگاه سیم‌برش در بین رویدادهای میانی به ترتیب مربوط به خطرات ناشی از تعمیر و نگهداری، خطرات ناشی از مسایل زمین‌شناسی و خطرات ناشی از طراحی نادرست و در بین رویدادهای اساسی به ترتیب مربوط به خطرات ناشی از حرکت و ضربه شلاقی ناشی از گسیختگی سیم، خطرات ناشی از انحراف داشتن سیم‌برش و خطرات ناشی از وجود لاکارته (گل و لای) در داخل بلوک سنگ است که راهکارهای کنترلی برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش ریسک‌های سیستم ارائه شده‌است. ارزیابی ریسک فعالیت‌های معدنی یکی از اساسی‌ترین مراحل در بررسی خروجی عملیات‌های معدنی است. این تحقیق با بهره‌گیری از کارهای گذشته و استفاده از تئوری فازی به خوبی توانسته بر مشکل ابهام و عدم دقت ناشی از ذهنی بودن اطلاعات غلبه کند و ارزیابی جامعی از ریسک‌های مربوط به دستگاه سیم‌برش در قالب درخت خطا ارائه دهد. پیشنهاد می‌شود از این روش برای سایر خطرات در معادن سنگ ساختمانی و برای ارزیابی ریسک خطرات موجود در معادن روباز یا زیرزمینی استفاده کرد.

منابع

- [۱] مرکز آمار ایران؛ ۱۳۹۰؛ نتایج بازدید از معادن فعال ایران.
- [۲] مختاری، میثم؛ کاظمیان فر، محمد؛ خسروی، محمد حسین؛ ۱۳۸۶؛ «تحلیل ریسک ایمنی در استخراج سنگ تزئینی به روش سیم برش الماسه»، اولین همایش سراسری سنگ‌های ساختمانی و صنایع وابسته، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات.
- [۳] امیرافشاری، مهدی؛ حسینی، نوید؛ مختاری، میثم؛ ۱۳۸۶؛ «ضرورت آموزش و فرهنگ سازی HSE در معادن سنگ نما و تزئینی ایران»، اولین همایش سراسری سنگ‌های ساختمانی و صنایع وابسته، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات.
- [۴] میخک بیرانوند، امین؛ الماسی، نجم‌الدین؛ ۱۳۸۸؛ «ارزیابی فنی و ایمنی معادن تحت پوشش شرکت معدنی»، سومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.

[5] Yarahmadi, R; Bagherpour, R; Khademian, A; 2014; "Safety risk assessment of Iran's dimension stone quarries (Exploited by diamond wire cutting method)", Safety Science, 63, 146-150.

[6] Dehghan, S; Sattari, Gh; 2017; "Safety Risk Analysis of Teravertine Mines in the Mahallat's Region: Case Study", Journal of Safety Promotion and Injury Prevention, 5(1):33-42.

در بین رویدادهای میانی، مجموعه‌های برشی حداقل خطرات ناشی از تعمیر و نگهداری با رتبه ۱ و احتمال ۳۸/۰۱ درصد، خطرات ناشی از مسایل زمین‌شناسی با رتبه ۲ و احتمال ۲۱/۷۰ درصد و خطرات ناشی از طراحی نادرست با رتبه ۳ و احتمال ۱۷/۹۳ درصد به عنوان ۳ مسیر بحرانی شناخته شدند که با ارائه راهکارهای کنترلی می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش و احتمال وقوع آن‌ها را کاهش داد:

- نیروی متخصص برای تعمیرات درست و اصولی به کار گرفته شود.
- از سیستم هوشمند راه‌اندازی و کنترل دستگاه برش استفاده شود تا امکان کنترل و راه‌اندازی نرم دستگاه را در ابتدای برش و نواحی درز و شکاف‌دار سنگ و مناطق دارای تمرکز تنش، فراهم کند.
- از پولی با قطر بزرگ استفاده شود تا تنش خمشی و خستگی ناشی از آن را در سیم‌برش کاهش دهد.
- الزامات ایمنی تعمیر و نگهداری به اپراتورها و تعمیرکاران آموزش داده شود.
- طراحی صحیح سیم‌برش و استفاده از آن به اپراتور آموزش داده شود.
- بازرسی‌های دوره‌ای برای اطمینان یافتن از سالم بودن سیم‌برش الماسه انجام شود.
- زمین‌شناس در منطقه حضور یابد تا شناسایی دقیقی از محدوده برش انجام گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

حوادث و مخاطراتی که در معادن سنگ ساختمانی اتفاق می‌افتد، مهم‌ترین مشکل این معادن محسوب می‌شود که پیامدهای نامطلوب جانی و مالی را به دنبال دارد؛ بنابراین برای جلوگیری از این نتایج، شناسایی و مدیریت خطرات ضروری است و باید اقدامات لازم به این منظور انجام شود به همین جهت در این تحقیق به بررسی این موضوع در معادن سنگ ساختمانی پرداخته شده است. پس از شناسایی خطرات و با تعیین علل هر یک به تحلیل آن‌ها پرداخته و برای تخصیص وزن احتمالات به هر یک از علت‌ها از روش تحلیل درخت خطای فازی استفاده شده است. در ادامه با نظرسنجی از متخصصان و سپس با استفاده از روابط احتمالاتی، میزان احتمال وقوع هر رویداد اساسی در وقوع رویداد نهایی بررسی شده است. در نهایت مجموعه‌های برشی حداقل تعیین و رتبه‌بندی شده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Healthy, Safety, Environmental
- 2- Watson
- 3- Top event
- 4- Intermediate event
- 5- Basic event
- 6- Cut set
- 7- Minimal cut set (MCS)
- 8- Gate
- 9- Or gate
- 10- And gate
- 11- Clemen and Winkler
- 12- Sugeno
- 13- Fuzzy possibility
- 14- Onisawa
- 15- Fuzzy probability
- 16- Fussell - Vesely importance

[7] Ericson, C.A; 2005; “*Hazard Analysis Techniques for System Safety*”, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.

[8] Hassl, DF; 1965; “*Advanced concepts in Fault Tree Analysis*”, Boing/UW System Safety Symposium.

[۹] عطائی، محمد؛ ۱۳۹۵؛ «مدیریت ریسک»، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۱۰] محمدفام، ایرج؛ ۱۳۹۰؛ «مهندسی ایمنی»، چاپ ششم، انتشارات فن‌آوران، تهران.

[11] Lavasani, S. M; Ramzali, N; Sabzalipour, F; Akyuz, E; 2015; “*Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis FFTA for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells*”, Ocean Engineering, 108, 729-737.

[12] Hsu, H. M; Chen, C. T; 1996; “*Aggregation of fuzzy opinions under group decision making, Fuzzy Sets and systems*”, 793, 279-285.

[13] Rausand, M; Arnljot, H; 2004; “*System reliability theory: models, statistical methods, and applications*”, Vol. 396. John Wiley Sons.

[14] Clemen, R. T; Winkler, R. L; 1999; “*Combining probability distributions from experts in risk analysis*”, Risk analysis, 192, 187-203.

[15] Sugeno, M; 1999; “*Fuzzy Modeling and Control*”, first edition, CRC Press, Florida, USA.

[16] Onisawa, T; 1990; “*An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis*”, Fuzzy sets and Systems, 373, 267-286.

[17] Lindhe, A; Rosén, L; Norberg, T; & Bergstedt, O; 2009; “*Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems*”, Water research, 436, 1641-1653.

[18] Wang, D; Zhang, P; Chen, L; 2013; “*Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks*”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 266, 1390-1398.