نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره دوازدهم،شماره۳۵، تابستان ۱۳۹۶، صفحه۱ تا۱۲
Vol. 12, No. 35, 2017, pp.1-12

ارزیابی ریسک خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه زغال به روش تحلیل درخت خطای فازی

زینب جهانبانی[۱]؛ محمد عطایی[۲]؛ فرهنگ سرشکی[۳*]؛ کرامت قنبری۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، jahanbani1990@gmail.com
۲- استاد دانشگاه شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، ataei_m@yahoo.com
۳- دانشیار دانشگاه شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، f.sereshki@gmail.com
۴- معاونت معدنی منطقه معدنی طزره، keramat_ghanbari@yahoo.com

(دریافت۱۸ آبان ۱۳۹۴، پذیرش ۲۲ تیر ۱۳۹۵)

چکیده

خودسوزی یا اکسیداسیون مستقیم زغال‌سنگ یکی از مشکلات مهم در معادن زغال‌سنگ است. پدیده خودسوزی زغال‌سنگ یک خطر جدی با نتایج زیان‌بار اقتصادی، پیامدهای نامطلوب زیست محیطی و خسارت‌ها و مشکلات ناخواسته در زمینه سلامتی است. برای جلوگیری از این نتایج، فرآیندهایی که منجر به وقوع این پدیده می‌شوند باید درک و سپس اقدامات لازم برای جلوگیری از آن به‌عمل آید. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی ریسک خودسوزی با استفاده از روش تحلیل درخت خطا در محیط فازی در معادن زغال‌سنگ است. در این تحقیق ابتدا عوامل مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ شناسایی شده‌اند. سپس با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) به ریشه‌یابی خطر خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد. به‌منظور محاسبه احتمال رویدادهای اساسی و در نهایت رسیدن به نرخ احتمال وقوع رویداد نهایی (خطر خودسوزی زغال‌سنگ) و با توجه به این‌که رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است، برای تخصیص وزن احتمالات به رویدادهای اساسی از منطق و اعداد فازی استفاده شد. مراحل منطق فازی با انتخاب تیمی متشکل از کارشناسان مجموعه معادن شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، آغاز و به برآورد نرخ احتمال رویدادهای اساسی ختم شد. سپس مجموعه‌های برشی حداقل (MCS) رده‌بندی و بحرانی‌ترین آن‌ها نیز مشخص شدند. نتایج نشان داد که احتمال وقوع خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغالی موجود در سطح زمین درمجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی (طزره)، ۱۳ درصد است. هم‌چنین با توجه به تعیین مجموعه‌های برشی حداقل بحرانی، روش-های کنترلی به‌منظور کاهش تأثیرات منفی و جلوگیری از وقوع صدمات و خسارات جانی و مالی پیشنهاد و ارائه شد.

کلمات کلیدی

خودسوزی، معادن زغال‌سنگ، ارزیابی ریسک، روش تحلیل درخت خطا (FTA)، منطق فازی، رویداد اساسی، رویداد نهایی

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

زغال‌سنگ، بعد از نفت، بیشترین سهم را در سبد انرژی جهان دارد. معدن‌کاری زغال‌سنگ با مخاطرات زیادی همراه است. به‌عنوان مثال، از اوایل قرن هجده میلادی که در انگلستان معدن‌کاری زیرزمینی زغال‌سنگ شروع شد، انفجار گاز متان به‌عنوان یکی از مخاطرات مهم معدن‌کاری زیرسطحی زغال‌سنگ مطرح شد. علاوه بر انفجار گاز متان، معدن‌کاری زغال‌سنگ با مخاطرات دیگری مانند تخریب سفره‌های آب زیرزمینی، ایجاد گودال پس از برداشت مواد معدنی، آلودگی‌های زیست محیطی و خودسوزی زغال[۱]همراه است [۱].

پدیده خودسوزی زغال‌سنگ بسیار پیچیده بوده و با وجود بیش از یک قرن تحقیق، مکانیزم دقیق آن هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. اما مکانیزم پیشنهاد شده برای توصیف این پدیده که چندین فرآیند گرمازا را شامل می‌شود، به شرح زیر است [۲]:

- جذب فیزیکی اکسیژن روی سطح زغال.
- جذب شیمیایی اکسیژن که منجر به تشکیل ترکیبات زغال و اکسیژن بر روی سطح زغال می‌شود.
- اکسیداسیون مستقیم که در آن اکسیژن با زغال‌سنگ دچار واکنش شیمیایی شده و منجر به تولید گازهایی از جمله دی‌اکسید کربن، آب و مونواکسیدکربن می‌شود. در دماهای بالاتر، گازهای دیگری مانند هیدروژن، متان، اتان و دیگر هیدروکربن‌ها نیز تشکیل می‌شوند.

از بین این فرآیندها، فرآیند آخر گرمای بیشتری را نسبت به بقیه تولید می‌کند. از جمله معادن زغالی که این خاصیت را دارند، می‌توان معدن زغال‌سنگ باب نیزو واقع در حوضه زغالی کرمان را نام برد که همین امر باعث ایجاد حریق در معدن مزبور گشته است[۳].

خودسوزی در معادن زغال‌سنگ ضمن وارد آوردن خسارات سنگین مادی، قربانیان زیادی را نیز در بر داشته است. از جمله خطرات خودسوزی زغال‌سنگ، تولید گازهای سمّی، نابودی تجهیزات در داخل معدن، آلودگی‌های زیست‌محیطی، ایجاد مشکل در تهویه را می‌توان نام برد. هم‌چنین سوختن در باطله‌های زغال می‌تواند یک منبع احتراق برای گاز متان و گرد و غبار موجود در هوای معدن ایجاد کرده، منجر به انفجار شده و حوادث خطرناکی را به بار آورد. گرچه تاکنون این امکان فراهم نشده که بتوان معدن‌کاری را به‌طور کامل ایمن ساخت ولی در عین حال باید تلاش کرد تا با استفاده از دانش فنی و امکانات موجود مخاطرات را به حداقل رسانید. بنابراین بهره‌گیری از روش‌های مؤثری که موجبات پیش‌بینی و پیش‌گیری از خطر خودسوزی در معادن زغال‌سنگ را فراهم آورد امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری تلقی می‌شود. تمامی معادن زغالی در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، بنابراین ارزیابی ریسک[۲] خودسوزی یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی برای معادن زغالی است [۴].

تاریخچه‌ی خودسوزی در معادن زغال‌سنگ به سال ۱۹۱۰ میلادی برمی‌گردد و از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. باتاچاریا[۳] در سال ۱۹۷۱ نرخ گرمای خروجی از زغال‌های مختلف با استفاده از دستگاه گرماسنج[۴] در طی جذب بخار آب در شرایط ایزوترمال[۵] (هم دما) را ارزیابی کرد که نتیجه آن نشان داد نرخ آزادسازی گرمای ناشی از جذب بخار آب وابسته به نوع زغال، اندازه ذرات و هوازدگی نمونه‌ها است [۵]. در سال ۱۹۹۷، آزمایش‌هایی برای تعیین شاخص روسی U توسط پانیگراهی و همکاران[۶] انجام شد. در این آزمایش‌ها، ۱۰ نمونه زغالی با استفاده از این روش آنالیز شدند [۶]. در سال ۲۰۰۹، در مطالعه‌ای که توسط باریس و دیداری[۷]در کشور ترکیه انجام شد، تأثیرات دما و اندازه ذرات بر خودسوزی زغال‌های بیتومینه با مواد فرار بالا بررسی شدند [۷]. بیمیش[۸] در سال ۲۰۱۳ تأثیر نوع زغال در پدیده خودسوزی زغال را بررسی کرد [۸]. صفاری در سال ۱۳۹۲، یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ را ارائه داد. وی در این تحقیق از دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و سیستم‌های مهندسی سنگ برای ارائه این سیستم طبقه‌بندی استفاده کرد [۴]. با مرور مطالعات و کارهای انجام شده گذشته مشخص شد که این تحقیقات، احتمال وقوع خودسوزی و هم‌چنین احتمال وقوع جزئی‌ترین عوامل به وجود آورنده آن را در نظر نگرفته‌اند.

در این تحقیق برای ارزیابی ریسک خودسوزی در انباشت‌گاه‌های زغالی موجود در سطح زمین در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی از روش تحلیل درخت خطا[۹] که یکی از روش‌های ارزیابی ریسک است، استفاده شده است. به کارگیری شیوه متداول در

حل درخت خطا می‌تواند منجر به افزایش اطلاعات ناکافی در تحلیل ریسک یا افزایش خطای تخمینی آنالیز شود. هم‌چنین می‌توان گفت که مقوله خودسوزی زغال‌سنگ با عدم قطعیت همراه است؛ بنابراین برای غلبه بر آن مشکلات، در این تحقیق درخت خطای فازی[10] به کار برده شده است. تئوری فازی، که در آنالیز درخت خطای فازی به کار می‌رود، بر اطلاعات ناقص کمّی و غلط و مبهم مقابله می‌کند. در واقع هدف از انجام این مطالعه تعیین احتمال وقوع خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال، اولویت‌بندی ریسک‌ها و تعیین ریسک‌های بحرانی است.

۲- ساختار درخت خطا

تحلیل درخت خطا یک تکنیک ارزشیابی است که از آن می‌توان برای تعیین علل مختلف یک رخداد خطرناک پیش‌بینی شده، استفاده کرد. سپس همه راه‌هایی که می‌توانند سبب بروز این وضعیت ناخواسته و نامطلوب شوند جستجو می‌شود. سپس به صورت نظام‌مند، تمامی دلایل خرابی را در یک ساختار بالا به پائین که شبیه درخت است، مرتب کرده و در نهایت از این ساختار برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی[11] استفاده می‌شود [۹].

۳- ارزیابی درخت خطا

تحلیل درخت خطا می‌تواند هم به‌صورت کمّی[12] و هم به‌صورت کیفی یا نظری[13] انجام شود [۱۰].

۳-۱- تحلیل کیفی

تحلیل کیفی به‌منظور محاسبه مجموعه برشی حداقل[14] انجام می‌شود. یک مجموعه برشی[15]، ترکیبی از رویدادهای اساسی[16] است که منجر به وقوع رویداد نهایی می‌شوند [۱۱، ۱۲].

هر یک از مجموعه‌های برشی حداقل نمایانگر یک راه احتمالی برای وقوع رویداد نهایی است. بدین ترتیب که با رخ دادن رویدادهایی که در یک برش حداقل قرار دارد رویداد نهایی به وجود خواهد آمد. بنابراین تجزیه و تحلیل آن‌ها ارزیابی اهمیّت هر یک از راه‌های احتمالی بروز رویداد اصلی است [۱۰].

۳-۲- تحلیل کمّی

در تحلیل کمّی درخت خطا برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی باید احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی معلوم باشد. با معلوم بودن احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی، می‌توان با توجه به نوع درگاه‌های[17] مورد استفاده، احتمال رویداد نهایی را به‌دست آورد.

احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی[18] که درگاه ارتباطی آن‌ها "و"[19] است با به کارگیری رابطه (۱) و احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی که درگاه ارتباطی آن‌ها "یا"[20] است با استفاده از رابطه (۲) به‌دست می‌آید [۱۳]:

$$P = \prod_{i=1}^{n} p_i \quad (۱)$$

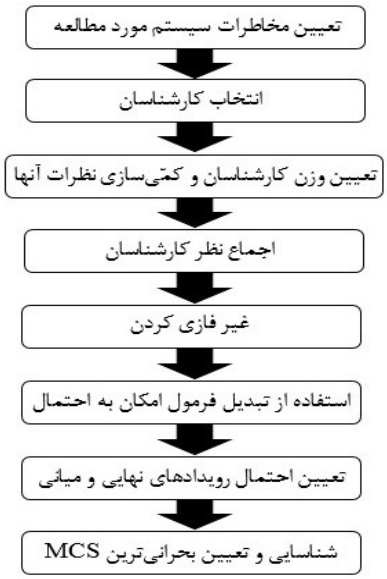
$$P = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i) \quad (۲)$$

که در آن P: احتمال وقوع رویداد خروجی درگاه، n: تعداد رویدادهای ورودی درگاه و p_i: احتمال وقوع هر یک از رویدادهای ورودی درگاه است.

۴- ارزیابی ریسک خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال به روش تحلیل درخت خطای فازی

ارزیابی مخاطرات شامل دو مقوله کمّی و کیفی است. در این خصوص از تکنیک‌های مختلفی نظیر تحلیل درخت خطا می‌توان استفاده کرد. تحلیل درخت خطا یک روش ارزیابی کمّی است. البته این کار زمانی انجام می‌شود که ارزیاب اطلاعات کافی در مورد نرخ و احتمال شکست تجهیزات داشته باشد. تجزیه و تحلیل درخت خطا یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود. گاهی اوقات به دلیل عدم اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان شکست از اجزا یا احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته دشوار است. علاوه بر این، به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد اساسی (BE)، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت است. برای جلوگیری از چنین شرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر کارشناسان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کار برد تا ابهام و عدم وجود داده در رویدادهای اساسی را کاهش دهد [۱۲].

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی اقدام به تعیین احتمال خودسوزی در انباشت‌گاه‌های زغالی موجود در سطح زمین در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی گردید. مراحل اجرای این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.



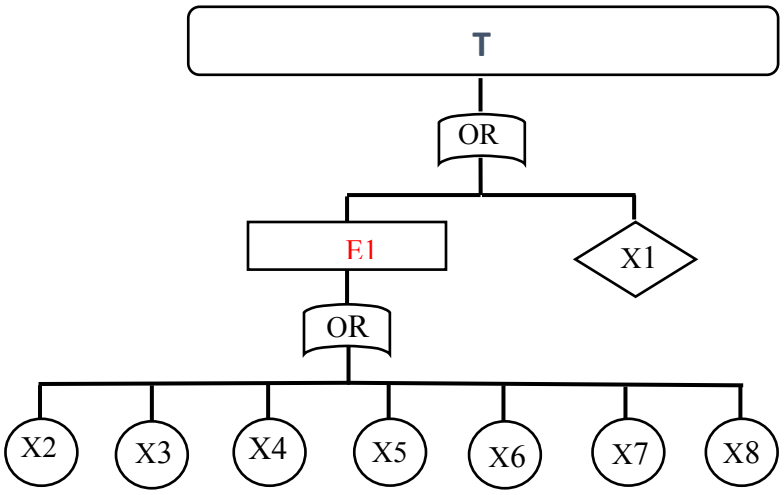
شکل ۱: مراحل اجرای تحقیق

در این تحقیق بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی، رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین تهیه شد که در جدول ۱ لیست این رویدادها نشان داده شده است. سپس با توجه به نتایج جدول ۱، درخت خطای مربوطه رسم شده است که این درخت خطا پایه اصلی برای محاسبات نرخ شکست سیستم شد (شکل ۲).

با استفاده از درخت خطای ایجاد شده و در نظر گرفتن رویدادهای اساسی با توجه به اینکه اطلاعات لازم در خصوص تعیین احتمال شکست رویداد اساسی وجود نداشت، از منطق فازی برای تعیین نرخ احتمال استفاده شد. این مراحل با انتخاب تیمی متشکل از متخصصان و کارشناسان مربوطه شروع و به برآورد احتمال ختم شد. برای برآورد احتمال از فرمول مرکز گرانیگاه و فرمول انیساوا[۲۱] استفاده شد. در ادامه نحوه اجرای منطق فازی بیان شده است.

جدول۱: رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد
T	**خودسوزی در انباشت‌گاه-های زغال در سطح زمین**	نهایی
E1	دسترسی به اکسیژن	میانی
X1	خرابی سیستم پایش	توسعه‌نیافته
X2	کانی‌های همراه	اساسی
X3	میزان رطوبت	اساسی
X4	ساختار انباشت‌گاه	اساسی
X5	زمان انباشتن	اساسی
X6	نفوذپذیری لایه سطحی	اساسی
X7	اندازه ذرات	اساسی
X8	قرار گرفتن در معرض باد	اساسی



شکل ۲: درخت خطای مربوط به خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

۴-۱- انتخاب کارشناسان

هنگامی که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، از نظر کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناس به کسی گفته می‌شود که دارای اطلاعات کافی از سیستم مورد ارزیابی بوده و با روش تحلیل درخت خطا آشنا باشد. در این تحقیق ۱۴ کارشناس برای تعیین وزن انتخاب شدند. قابل ذکر است که این کارشناسان اهمیّت وزنی یکسانی ندارند. به همین دلیل برای تعیین وزن اهمیّت کارشناسان از روش ارائه شده توسط لواسانی[۲۲] و همکارانش در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و رنجیت[۲۳] و همکارانش استفاده شده است [۱۵-۱۳]. در تعیین وزن اهمیّت کارشناسان از معیارهای عنوان، تجربه کاری، تحصیلات و سن استفاده شده است. نحوه امتیازدهی کارشناسان در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴-۲- تعیین وزن کارشناسان و کمّی‌سازی نظرات آن‌ها

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آن‌ها تعیین شد. نمره وزن نهایی هر کارشناس از تقسیم مجموع نمرات کسب شده توسط وی تقسیم بر مجموع نمرات کسب شده توسط کلیه کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه به‌دست آمده است. نمره وزن هر کارشناس بر اساس معیارهای تعیین شده در مرحله قبل، در جدول ۳ نشان داده شده است.

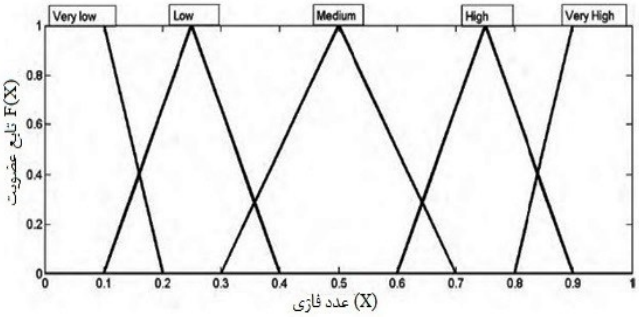
برای کمّی‌سازی نظرات کارشناسان یا تعیین وزن نظرات آن‌ها در خصوص رویدادهای اساسی، از متغیرهای زبانی استفاده شده است. پنج متغیر زبانی به کار رفته شامل خیلی کم، کم، متوسط زیاد و خیلی زیاد هستند که به‌طور خلاصه به‌صورت {VH، H، M، L، VL} است. برای فازی کردن این بخش از عدد فازی ذوزنقه‌ای استفاده شده است که شکل ۳ بیان کننده دامنه فازی متغیرهای زبانی به کار رفته در این تحقیق است.

جدول ۲: جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان [۱۵].

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان	مدیر، معاون	۴
		بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۳
		سرپرست کارگاه، سرکارگر	۲
		اپراتور	۱
۲	تجربه (سال)	۳۰	۴
		۲۰-۳۰	۳
		۱۰-۲۰	۲
		۵-۱۰	۱
۳	تحصیلات	دکترا	۵
		کارشناس و کارشناس ارشد	۴
		دیپلم	۳
		دارای مدرک فنی	۲
		زیر دیپلم	۱
۴	سن (سال)	>۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۴۰	۲
		<۳۰	۱

جدول ۳: نمرات وزنی کارشناسان انتخاب شده

تعداد کارشناسان	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن (سال)	شاخص وزنی	نمره وزنی هر کارشناس
۱	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	**۰/۰۶۷**
۲	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	**۰/۰۶۷**
۳	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۴	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	**۰/۰۶۷**
۵	مدیر، معاون	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۴۰-۵۰	۱۳	**۰/۰۸۷**
۶	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۴۰-۵۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۷	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	**۰/۰۶۷**
۸	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۹	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۱۰	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	<۳۰	۹	**۰/۰۶۰**
۱۱	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۱۲	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۹	**۰/۰۶۰**
۱۳	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
۱۴	بازرس، دستیار مدیر، کنترل‌کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	**۰/۰۷۴**
					جمع: ۱۴۸	**جمع: ۱**



شکل۳: متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان [۱۴]

نظرات کارشناسان با استفاده از روش ارائه شده توسط چن[۲۴] و هوانگ[۲۵] در سال ۱۹۹۲، لواسانی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و همچنین رنجیت و همکارانش، به‌صورت کمّی درآمد و وزن آن‌ها تعیین شد[۱۶-۱۳].

برای استفاده از نظرات کارشناسان فرم‌هایی برای آن‌ها ارسال شد که در این فرم از کارشناسان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیّت هر یک از پارامترها امتیاز خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را به آن‌ها اختصاص دهند که وزن متغیرهای زبانی کارشناسان که در کمّی‌سازی نظر آنان در رابطه با هر رویداد اساسی استفاده شده است، در جدول ۴ نشان داده است.

جدول ۴: وزن متغیرهای زبانی در کمّی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی[۱۴]

متغیر 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

۴-۳-اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشناسان، نمره وزن هر کارشناس در نمره متغیرهای زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه ۳ انجام شده است [۱۵، ۱۷].

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} W_j A_{ij} \qquad (i = 1,2,3,\dots,m) \qquad (۳)$$

که در این رابطه:

A_{ij}:متغیر زبانی در رابطه با هر رویداد اساسی iتوسط کارشناس j

W_j: وزن کارشناس j

m:تعداد رویدادهای اساسی

n:تعداد کارشناسان

M_i:عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی i

۴-۴-غیر فازی کردن

غیر فازی کردن اعداد فازی روش مهمّی برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. در این تحقیق روش مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن انتخاب شده است. این روش توسط سوگنو[۲۶]در سال ۱۹۸۵ توسعه یافته است و دقیق‌ترین روش غیر فازی کردن است[۱۸]. غیر فازی کردن عدد فازی ذوزنقه‌ای$= \tilde{A}$ (a_1, a_2, a_3, a_4)با استفاده از فرمول (۴) به دست می‌آید [۱۳، ۱۴].

$$X^* = \frac{1}{3}\frac{(a_4+a_3)^2 - a_4a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1a_2}{(a_4+a_3-a_2-a_1)} \qquad (۴)$$

عدد به‌دست آمده از مرحله قبل در رابطه با هر رویداد اساسی، معادل نظر کارشناسان بوده و هنوز به‌صورت "امکانی" است. در این مرحله با استفاده از مدل مرکز گرانیگاه (رابطه ۴) و فرمول ذوزنقه‌ای، این اعداد غیر فازی شده است.

۴-۵-استفاده از تبدیل فرمول امکان به احتمال

عدد حاصل از مرحله غیر فازی کردن، هنوز به‌صورت امکانی می‌باشد. از آنجایی که درخت خطا احتمال می‌پذیرد؛ بنابراین باید عدد به‌دست آمده از مرحله قبل از حالت امکانی به احتمالی تبدیل شود. به این منظور، از فرمول‌های ارائه شده توسط انیساوا (فرمول ۵ و ۶)، استفاده شده است [۱۵-۱۳].

$$FP = \begin{cases} \dfrac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

$$k = \left[\frac{1-CFP}{CFP}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \qquad (۶)$$

که در این رابطه FP[۲۷]، نرخ احتمال هر رویداد اساسی و CFP[۲۸]، عدد امکانی حاصل از مرحله غیر فازی کردن است. در جدول ۵ نتایج محاسبات نرخ احتمال (FP) هر رویداد اساسی برای خطر

خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین نشان داده شده است.

جدول ۵: نرخ احتمال هر رویداد اساسی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP) برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۰۰۸۸
X2	کانی‌های همراه	۰/۰۱۴۳
X3	میزان رطوبت	۰/۰۱۸۹
X4	ساختار انباشت‌گاه	۰/۰۱۱۰
X5	زمان انباشتن	۰/۰۲۰۷
X6	نفوذپذیری لایه سطحی	۰/۰۱۵۱
X7	اندازه ذرات	۰/۰۲۳۵
X8	قرار گرفتن در معرض باد	۰/۰۲۸۱

۴-۶- تعیین احتمال رویدادهای نهایی و میانی

بعد از تعیین نرخ احتمال رویدادهای اساسی و هم‌چنین مشخص کردن مجموعه‌های برشی حداقل و به کمک بانک اطلاعات به دست آمده، نرخ احتمال رویداد نهایی (T) و هم‌چنین رویدادهای میانی به کمک روابط (۲)، (۳) و (۷) محاسبه شد که نتایج این محاسبه در جدول ۷ نشان داده است. در جدول ۶ نیز مجموعه‌های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین نشان داده شده است.

$$T = 1 - [(1 - MCS_1) \times (1 - MCS_2) \times \ldots \times (1 - MCS_n)] \quad (۷)$$

که در این رابطه:

T: نرخ احتمال رویداد نهایی، MCS_1: مجموعه برشی حداقل اول، MCS_2: مجموعه برشی حداقل دوم و ... و MCS_n: مجموعه برشی حداقل nام [۱۹، ۲۰].

جدول ۶: مجموعه‌های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

شماره	مجموعه برشی حداقل
۱	خرابی سیستم پایش
۲	کانی‌های همراه
۳	میزان رطوبت
۴	ساختار انباشت‌گاه
۵	زمان انباشتن
۶	نفوذپذیری لایه سطحی
۷	اندازه ذرات
۸	قرار گرفتن در معرض باد

جدول ۷: نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال رویداد
T	**خودسوزی در انباشت‌گاه-های زغال در سطح زمین**	**نهایی**	**۰/۱۳۲۳**
E1	دسترسی به اکسیژن	میانی	۰/۱۲۴۶

۴-۷-تعیین اهمیّت و رده‌بندی مجموعه‌های برشی حداقل

بعد از محاسبه نرخ رویداد نهایی و بر اساس مقدار به‌دست آمده برای آن، با استفاده از فرمول فاسل- وسلی[۲۹] (رابطه ۸) میزان اهمیّت مجموعه‌های برشی حداقل (MCS) مشخص و این مجموعه‌های برشی حداقل رده‌بندی شدندکه نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است.

$$FVI(i) = \frac{MCS_i}{T} \quad (۸)$$

بنابراین در این بخش با استفاده از رابطه فاسل- وسلی میزان اهمیّت مجموعه‌های برشی حداقل مشخص و بر اساس آن رده‌بندی شدند. بحرانی‌ترین مجموعه‌های برشی حداقل در خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین به ترتیب میزان اهمیّت از زیاد به کم، قرار گرفتن در معرض باد، اندازه ذرات، زمان انباشتن، میزان رطوبت و نفوذپذیری لایه سطحی هستند.

جدول ۸: نرخ احتمال، میزان اهمیّت و رده‌بندی مجموعه‌های برشی حداقل و مقادیر FVI(i) برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نرخ احتمال هر برش حداقل (MCS)	FVI(i)	رده‌بندی برش‌های حداقل (MCS)
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۰۰۸۸	**۰/۰۶۶۵**	**۸**
X2	کانی‌های همراه	۰/۰۱۴۳	**۰/۱۰۸۰**	**۶**
X3	میزان رطوبت	۰/۰۱۸۹	**۰/۱۴۲۸**	**۴**
X4	ساختار انباشت‌گاه	۰/۰۱۱۰	**۰/۰۸۳۱**	**۷**
X5	زمان انباشتن	۰/۰۲۰۷	**۰/۱۵۶۴**	**۳**
X6	نفوذپذیری لایه سطحی	۰/۰۱۵۱	**۰/۱۱۴۱**	**۵**
X7	اندازه ذرات	۰/۰۲۳۵	**۰/۱۷۷۶**	**۲**
X8	قرار گرفتن در معرض باد	۰/۰۲۸۱	**۰/۲۱۲۳**	**۱**

۴- کنترل و پاسخ به ریسک‌های بحرانی

پاسخ به ریسک، یک جزء اساسی مدیریت ریسک و یک استراتژی موفق است که می‌تواند منجر بـه کـاهش تـأثیرات منفـی ریسـک شود. پاسخ به ریسک یـک فرآینـد مـداوم اسـت و بایـد در تمـام فازهای پروژه به‌کار رود.

در این بخش اقدامات لازم به‌منظور کنترل و کاهش ریسک‌های بحرانی تعیین شده در رابطه با خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین ارائه شده است.

الف) قرار گرفتن در معرض باد

- دپوها باید طوری ایجاد شوند که کمترین بخش از آن‌ها در معرض وزش باد قرار گیرند. مثلاً اگر بادهای غالب منطقه در بیشتر اوقات سال از سمت شمال می‌وزند، باید دپوها به صورت یک مستطیل ایجاد شوند که طول‌های آن در امتداد شمال – جنوب قرار گیرد.
- محدودیت ارتفاع یک دپوی کوبیده نشده حداکثر ۳ متر و برای دپوی کوبیده و متراکم شده حداکثر ۸ متر است. این شرایط مقاومت در برابر باد را کاهش می‌دهد.
- زوایای تند کناره‌های دپو باید با پهن کردن گرفته شود تا باد به راحتی از روی آن‌ها گذر داشته باشد.
- جناح دپو باید با بولدوزر به سمت پایین با زاویه کم صاف شوند تا از مقاومت باد جلوگیری شود. در قسمت بالا و به ویژه در بخشی که در معرض وزش باد غالب است، نیز دپو باید کوبیده شود.

ب) اندازه ذرات

- اندازه ذرات (زغال‌های خرد شده و کلوخه) را می‌توان از طریق سرندهای مختلف کنترل کرد. از آن‌جائی که لایه‌های مختلفی از زغال‌سنگ دپو می‌شوند، جانمایی دپوهای زغال‌سنگ خام را می‌توان با توجه به اندازه ذرات تعیین کرد.

ج) زمان انباشتن

- زمان نگهداری زغال در دپو قبل از بارگیری و ارسال تا حد ممکن کوتاه باشد.
- یک سیستم نوبتی مناسب (اولین محصول زغال اولین نوبت بارگیری) باید به اجرا گذاشته شود تا همیشه قدیمی‌ترین زغال دپو قبل از سایر زغال‌ها بارگیری و ارسال شود. در این صورت زغال فرصت خودسوزی نخواهد داشت.
- باربرداری باید ابتدا از سمت بادپناه یا از محل قدیمی‌ترین زغال‌ها انجام شود.

د) میزان رطوبت

- سنجش میزان رطوبت در دپوهای زغال.
- برای جلوگیری از خودسوزی می‌توان زغال‌ها را آب‌پاشی کرد، البته باید توجه داشت که آب‌پاشی در کیفیت زغال استخراج شده تأثیری نداشته باشد.
- میزان رطوبت بیشتر برای دپوهای کنسانتره زغال‌سنگ (زغال‌سنگ خروجی کارخانه زغال‌شویی) مؤثر است.

ه) **نفوذپذیری لایه سطحی**

- زغال تازه نباید روی زغال قدیمی‌تر که مدت‌هاست در محل دپو باقی مانده ریخته شود زیرا سرعت اکسیداسیون زغال تازه بیشتر است.
- زغال باید در لایه‌های مجزا با ضخامت ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر ریخته شده و با بولدوزر و غلطک پهن و کوبیده و متراکم شود تا خلل و فرج آن به حداقل ممکن رسیده و مانع از عبور جریان هوا در داخل دپو شود.
- دپوهای بلند مدت حتی وقتی به خوبی کوبیده شده باشند، با خطر فرسایش باد و باران در سطح بیرونی خود مواجه هستند که به درون سطح نفوذ نموده و می‌تواند با تخریب و کاهش کیفیت زغال، مشکلات محیطی ایجاد کند. لازم است ترکیبی از قیر رقیق روی سطوح خارجی دپوهای بلند مدت پاشیده شود. با به هم چسباندن ذرات زغال نوعی قشر بیرونی (پوسته) مقاوم در برابر هوا ایجاد می‌شود (قیر مشکلی برای ویژگی‌های حرارتی ایجاد نمی‌کند).
- نمونه‌گیری از لایه سطحی و تعیین میزان نفوذپذیری.

و) **کانی‌های همراه**

- نمونه‌گیری از زغال‌سنگ‌های دپو شده و آنالیز نمونه‌ها.
- انجام مراقبت‌های ویژه در صورت وجود کانی‌های با پتانسیل خودسوزی بالا در نمونه‌ها.

ز) **ساختار انباشت‌گاه**

- دپو باید حالت رمپ شکل (سطح شیب‌دار) داشته باشد تا مشخصه‌های دپوسازی زیر راحت‌تر حاصل شوند:

- دپوی در حال احداث: به‌صورت لایه لایه در حالت رمپی شکل قرار گرفته و مرتباً توسعه پیدا کند. زغال هم‌زمان با پهن شدن در لایه‌های ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر، کوبیده و متراکم گردد تا خلل و فرج آن به حداقل ممکن رسیده و مانع از عبور جریان هوا در داخل دپو شود.
- دپوی تکمیل شده: ارتفاع کم، جناح‌های صاف و با زاویه کم برای کاهش مقاومت باد، لایه لایه و رمپی شکل.

- برای جلوگیری از خودسوزی، زغال‌ها با فاصله دپو شوند تا تمامی آن‌ها در یک محل تجمّع نداشته باشند و بتوان آن‌ها را راحت‌تر جا به جا کرد.

ح) **خرابی سیستم پایش**

- وجود سیستم‌های اندازه‌گیری.
- وجود سیستم‌های اندازه‌گیری پرتابل (دستی) برای اندازه‌گیری گازهای سمّی و لوله‌های حسگر سنجش حرارت برای برداشت دما و تعیین افزایش دمای اطراف منطقه دپو.
- آموزش کاربران برای راه‌اندازی سیستم در صورت خراب بودن آن (در دسترس بودن تعمیرکاران).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۱-بر اساس محاسبات انجام شده نرخ احتمال رویداد نهایی، که در این تحقیق خطر خودسوزی زغال‌سنگ است، در انباشت-گاه‌های زغالی موجود در سطح زمین در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی،۱۳ درصد است.

۲-بررسی احتمال شکست رویداد اساسی، مبنای اصلی تحلیل درخت خطا است که به کمک منطق فازی کمّی می‌شود. استفاده از منطق فازی در درخت خطا هم ارزیابی‌ها را ساده‌تر کرده و هم می‌تواند باعث افزایش دقت در محاسبات شود.

۳-با توجه به مطالعات صورت گرفته، احتمال شکست رویداد اساسی به کمک اعداد فازی به وسیله کارشناسان مختلف متفاوت خواهد بود. در این شرایط صحت انتخاب عدد فازی برای نشان دادن رویداد اساسی، بسیار اساسی است. در نهایت این روش می‌تواند با کاهش عدم قطعیت و ابهامات موجود، به بهبود قابلیت اطمینان و کاهش میزان خسارات و صدمات وارد به سیستم کمک نماید.

۴-در این تحقیق با استفاده از روش فازی نه تنها به کارشناسان وزن داده شد، بلکه با استفاده از غیر فازی کردن وزن رویدادهای اساسی، وزن هر رویداد مورد سنجش قرار گرفت. وجه افتراق روش به کار رفته در مطالعه تیاگی و همکارانش با مطالعه حاضر در همین قسمت بوده که شاید نقطه قوت مطالعه حاضر در خصوص کمّی‌سازی و افزایش دقت محاسبه ضریب هر رویداد انتهایی به شمار می‌رود.

۵-انجام این مطالعه کمک می‌کند تا با نگاه جدیدتر و نوآورانه‌تری به تکنیک درخت خطا پرداخت. روش‌های مرسوم تحلیل درخت خطا نیاز به یک پایگاه داده برای رویدادهای اساسی

دارد ولی تلفیق تحلیل درخت خطا با منطق فازی، محدودیت‌های عدم وجود داده و بانک اطلاعاتی را تا حدودی مرتفع کرده و می‌توان به کمک منطق فازی رویدادهای اساسی کیفی را کمّی ساخت. با این کار به عدم قطعیت همراه با مسأله نیز پاسخ داده می‌شود. بدین وسیله می‌توان نرخ رویداد نهایی را محاسبه کرد. هم‌چنین می‌توان با کمّی کردن رویدادهای اساسی، میزان نرخ مشارکت هر رویداد اساسی را در میزان رویداد نهایی به‌دست آورد و با توجه به احتمال و اولویت هر رویداد اساسی با اقدامات اصلاحی مناسب آن‌ها را مرتفع کرد.

۶- محدود بودن تعداد کارشناسان و استفاده از کارشناسانی با ویژگی‌های متفاوت از محدودیت‌های عمده این مطالعه به شمار می‌رود. عدم آزمایش تجربی به‌منظور تعیین صحت و دقت نتایج از دیگر محدودیت‌های این مطالعه به شمار می‌رود. ارائه روشی برای کمّی کردن رویدادهای با پایه کیفی از نقاط قوت این مطالعه به شمار می‌رود.

مراجع

[۱]. کیارستمی ک، (۱۳۹۳)، "سوخت فسیلی زغال‌سنگ و پیامدهای زیست‌محیطی آن"،مجله رشدزمین‌شناسی، دوره نوزدهم، شماره ۴،ص ۲۱-۱۴.

[2]. Glenn B.S., Prakash A., V.Sokol E., (2015), “Spontaneous Combustion in open-cut mines: Australian Experience and Research”, Coal and Peat fires: A Global Perspective, Australia.

[۳]. مدنی ح، (۱۳۷۸)، "تهویه در معادن"، چاپ ششم، مرکز نشر دانشگاهی تهران.

[۴]. صفاری ا، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "ارائه یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[5]. Bhattacharya K.K., (1971), “The role of absorption of water vapour in the spontaneous heating of coal”, Fuel, Vol. 50, Issue 4, pp. 367-38.

[6]. Panigrahi D.C., Ojha A., Saxena N.C. and Kejriwal, B.K., (1997), “A study of coal oxygen interaction by using Russian U-Index and its correlation with basic constituents of coal with particular reference to Jharia coal field”, 27th international conference of safety in mines research institutes, New Delhi ,India, pp. 493-499.

[7]. Baris K. and Didari V., (2009), “Low Temperature Oxidation of a High Volatile Bituminous Turkish Coal Effects of Temperature and Particle Size”, Coal Operators Conference, pp. 296-302.

[8]. Beamish B.B., McLellan P., Endara H., Turunc U., Raab M. and Beamish R., (2013), “Delaying spontaneous combustion of reactive coals through inhibition”, Coal Operators' Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 221-226.

[9]. Abdelgawad M. and Fayek A.R., (2011), “Fuzzy reliability analyzer: A quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault tree analysis”, J.Constr. Manage Eng, Vol. 137(4), pp. 294-302.

[۱۰]. محمدفام ا، (۱۳۹۰)، "مهندسی ایمنی"،چاپ ششم، انتشارات فن‌آوران، تهران، ص ۳۴.

[۱۱]. عبدالله‌زاده غ و راستگو س، (۱۳۹۱)، "ارزیابی ریسک درپروژه-های پل‌سازی با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی"، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مؤسسه آموزش عالی خاوران، ایران، مشهد.

[۱۲]. عبدالله‌زاده غ و راستگو س، (۱۳۹۳)، "ارزیابی ریسک در پروژه-های پل‌سازی با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره اول، ص ۱۰۰-۸۵.

[13]. Lavasani M.R., Wang J., Yang Z. and Finlay J., (2011), “Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on Oil and Gas Offshore Pipelines”, Int. J. Mar. Sci. Eng, pp. 29-42.

[14]. Lavasani S.M., Zendgani A. and Celik M., (2014), “An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry”, Process Sarety and Environment Protection, DIO: http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2014.05.001.

[15]. Renjith V.R., Madhu G., Lakshmana Gomathi Nayagam V. and Bhasi A.B., (2010), “Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation”, Journal of Hazardous Materials, pp. 103-110.

[16]. Chen S.J. and Hwang C.L., (1992), “Fuzzy Multiple Attribute Decision Making”, 1st Ed. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, Germany, ISBN: 3-540-54998-6.

[17]. Clemen R.T. and Winkler R.L., (1999), “Combining probability distributions from experts in risk analysis. Risk analysis, pp. 187-203.

[18]. Sugeno M., (1999), “Fuzzy modelling and control”, 1 st. Ed. CRC Press, Florida, USA.

[۱۹]. کلاسنگیانی ح و امیدواری م، (۱۳۹۴)، "ارائه الگویی جهت ارزیابی کمّی قابلیت اطمینان برق‌گرفتگی فشار ضعیف در صنعت توزیع برق با استفاده از FTA در محیط فازی"، دو ماهنامه سلامت کار ایران، دوره ۱۲، شماره ۲.

[۲۰]. میرزا س، جعفری م ج، امیدواری م و لواسانی س م، (۱۳۹۳)، "استفاده از منطق فازی در برآورد احتمال شکست در آنالیز ریسک به روش درخت خطا"،مجله ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، دوره ۲، شماره ۲، ص ۱۲۳-۱۱۳.

[1]- Coal Spontaneous Combustion
[2]- Risk Assessment
[3]- Bhattacharya
[4]- Calorimeter
[5]- Isothermal
[6]- Panigrahi et al.
[7]- Baris & Didari
[8]- Beamish
[9]- Fault Tree Analysis = FTA
[10]- Fuzzy Fault Tree Analysis = FFTA
[11]- Top event
[12]- Quantitative
[13]- Qualitative / Subjective
[14]- Minmal cut set = MCS
[15]- Cut set
[16]- Basic event
[17]- Gates
[18]- Intermediate event
[19]- And gate
[20]- Or gate
[21]- Onisawa
[22]- Lavasani
[23]- Renjith
[24]- Chen
[25]- Hwang
[26]- Sugeno
[27]- Failure Probability
[28]- Crisp Failure Possibility
[29]- Fussell- Vesely