فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

۱-۲۴

ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی مجتمع پتروشیمی کرمانشاه با روش FMEA

سجاد بهرامی[1*]، احد ستوده[1]، ناصر جمشیدی[2] و محمدرضا علمی[1]

[1] گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد

[2] گروه برنامه‌ریزی آموزشی و ارزیابی عملکرد HSE، شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

بهرامی، س.، ا. ستوده، ن. جمشیدی و م.ر. علمی. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی مجتمع پتروشیمی کرمانشاه با روش FMEA. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶ (۳): ۲۴-۱.

سابقه و هدف: با گسترش صنعت‌های مختلف، باوجود ایجاد رفاه برای انسان، خطرها و ریسک‌های نهفته جدیدی نیز برای وی به وجود آمده است. صنعت پتروشیمی با توجه به گستردگی و حجم فعالیت‌ها و توانایی ایجاد خطر هم برای انسان و هم برای محیط‌زیست جزء صنعت‌های با ریسک بالا محسوب می‌شود. هدف از این تحقیق، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های منتج از فعالیت‌های فرآیندی در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه است.

مواد و روش‌ها: تحقیق حاضر یک پژوهش تحلیلی- میدانی است که در یک بازه زمانی حدود ۱۰ ماه در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه انجام گرفت. در این تحقیق ضمن بررسی خط‌های تولید محصول‌ها (اوره و آمونیاک)، تیمی ۵ نفره از کارشناسان و خبرگان تشکیل شد. سپس به تهیه‌ی لیستی ابتدایی از مهم‌ترین ریسک‌ها و خطرها در حوزه‌ی محیط‌زیست اقدام و در مرحله‌ی بعد با استفاده از روش طوفان فکری و تکنیک دلفی اقدام به اصلاح لیست ابتدایی خطرها و ریسک‌های محیط زیستی شد و در قالب روش FMEA سنتی و فازی به ارزیابی ریسک محیط زیستی پرداخته شد.

نتایج و بحث: بنابر نتایج به‌دست‌آمده از تعداد ۳۸ ریسک شناسایی شده با روش FMEA سنتی، بالاترین رتبه مربوط به ریسک انتشار گازهای هیدروژن و آمونیاک در زمان از سرویس خارج شدن واحد آمونیاک و کمترین رتبه متعلق به ریسک پساب‌های آمونیاکی است. همچنین بیشترین فراوانی تأثیر ریسک‌ها مربوط به آلودگی هوا و نیز بیشترین دلیل ریسک‌ها مربوط به نقص در شبکه و اتصال‌ها هستند. نتایج فازی سازی ورودی‌ها و خروجی روش FMEA نشان می‌دهد که از مجموع ۱۵ ریسک که به صورت کلی در مجتمع پتروشیمی با نظر های خبرگان شناسایی شده بیشترین عدد اولویت فازی در بخش بهداشتی مربوط به آلودگی صوتی (۰/۷۵)، در بخش ایمنی مربوط به سقوط از ارتفاع (۰/۷۵) و در بخش محیط‌زیست مربوط به کاهش منابع اکولوژیکی (۰/۶۱۳) طبق جدول ۹ است.

* Corresponding Author. *E-mail Address*: s.bahrami98@gmail.com

نتیجه‌گیری: طبق نتایج این تحقیق، رویکرد FMEA فازی می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای رویکرد سنتی FMEA در زمان نیاز به بیان نتایج، با دقت بیشتر باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک، محیط‌زیست، FMEA، فازی، پتروشیمی کرمانشاه.

مقدمه

بحران‌ها و شرایط اضطراری همچون بلایای طبیعی، بیماری‌ها، حادثه‌های صنعتی، آتش‌سوزی‌ها، نشت مواد سمی، حمله‌های تروریستی و غیره اغلب سبب ضرر و زیان به زندگی یا آسیب، زیان‌های مالی، اختلال‌های اجتماعی و اقتصادی و یا تخریب محیط‌زیست می‌شوند (Liu *et al.*, 2014). فعالیت‌های بشر تأثیرهای بزرگ و مهمی بر محیط‌زیست دارد، (Tarr, 2003)، فاجعه‌های بزرگ صنعتی در طول چند دهه‌ی گذشته همچون فاجعه‌ی فلیکس برو[1] (۱۹۷۴)، فاجعه گاز بوپال[2] (۱۹۸۴)، فاجعه LPG مکزیک[3] (۱۹۸۴)، انتشار ابر هیدروکربن و آتش‌سوزی و انفجار در یک پالایشگاه در تگزاس[4] (۲۰۰۵) همگی پیامدهای نامطلوبی را به ارمغان آورده‌اند (Deshpande, 2011). به‌طورکلی می‌توان گفت که بیشتر فعالیت‌های صنعتی منتج به ریسک‌هایی با درجه‌های مختلف برای محیط‌زیست می‌شوند. ارزیابی ریسک یک روش محکم برای بررسی خطرهاست که به شناسایی خطرها و اثرهای بالقوه آن‌ها روی افراد، مواد، تجهیزها و محیط می‌پردازد که در حقیقت داده‌های بسیار با ارزشی برای اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه در مورد ریسک‌هایی همچون، آمایش سرزمین منطقه‌های اطراف تأسیسات خطرناک، برنامه‌ریزی برای شرایط اضطراری، سطح ریسک قابل‌قبول، اصل‌های بازسازی و نگهداری در تأسیسات صنعتی و موارد دیگر فراهم می‌آورد (Nivolianitou, 2002).

امروزه در بسیاری از کشورها، اصول ارزیابی و مدیریت ریسک، به مقررات ایمنی، بهداشت و محیط‌زیستی و بسیاری از قوانین دیگر، نفوذ پیدا کرده است. روش‌های ارزیابی ریسک شامل مدل‌هایی است که پیامدهای بالقوه حادثه‌های ناشی از خطاهای انسانی یا طبیعی، برای بزرگی و شدت اثرهای یک حادثه را پیش‌بینی و توصیف می‌کنند (Ricci, 2006). ارزیابی اثرات محیط‌زیستی (EIA) و ارزیابی ریسک محیط‌زیستی (ERA) دارای مفاهیمی مشابه هستند که در آن‌ها ابزارها و هدف‌ها به‌طور گسترده‌ای همسان است. این مفاهیم می‌توانند تصمیم‌گیرندگان را در مورد فرکانس و بزرگی پیامدهای نامطلوب محیط زیستی ناشی از فعالیت‌ها یا مداخله‌های برنامه‌ریزی شده مطلع سازند (Morris and Therivel 2005). در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای ارزیابی و تجزیه ریسک‌ها معرفی و نشان داده شده‌اند که تعداد آن‌ها به بیش از ۶۰ روش می‌رسد (Tixier *et al.*, 2002).

از بین روش‌های ارزیابی ریسک، تعدادی از تکنیک‌های کمی و کیفی همچون آنالیز مقدماتی خطر (PHA)، حالات شکست و تجزیه‌وتحلیل تأثیرهای آن (FMEA)، خطرها و بررسی عملکردها (HAZOP)، تجزیه‌وتحلیل درخت خطا (FTA)، تجزیه‌وتحلیل درخت واقعه (ETA)، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Shahriar *et al.*, 2012). حالات خطا و تجزیه‌وتحلیل تأثیرهای آن‌ها (FMEA)، یکی از مهم‌ترین روش‌ها در مهندسی ایمنی سیستم‌ها است که بر اساس مهندسی قابلیت اطمینان، توسعه پیدا کرده است. با این روش می‌توان انواع خطاها را به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌ها، فرآیندها و محصولات شناسایی و اقدام‌های اصلاحی را پیشنهاد داد (Chen *et al.*, 2014). از آنجا که حالت‌های خطا در بیشتر سیستم‌ها اجتناب ناپذیر هستند، FMEA به عنوان یک ابزار مؤثر برای اطمینان یافتن از اینکه تهدیدهای بالقوه برای سیستم و خطرهای مرتبط با آن به کمترین حد برسند، عمل می‌کند (Bozdag *et al.*, 2015).

FMEA روشی است که حالت‌های بالقوه شکست

یک محصول یا فرآیند و اثرات شکست‌ها را شناسایی می‌کند و بحران چنین تأثیرهایی را بر روی کارکرد فرآیند، ارزیابی می‌کند (Teoh and Case, 2004). روش FMEA در ابتدا توسط ارتش ایالات‌متحده در سال ۱۹۴۹ برای طبقه‌بندی شکست‌ها (با توجه به تأثیر آن‌ها بر موفقیت مأموریت و پرسنل یا تجهیزات ایمنی) گسترش داده شد. سپس در مأموریت فضایی آپولو در سال ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار گرفت و پس از آن در سال ۱۹۸۰ برای کاهش ریسک‌ها در یک مدل از خودرو استفاده شد (Riplov, 2007; Liu *et al*., 2012; Bowles and Pelaez, 1995). هدف کلیدی FMEA شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی حالات بالقوه‌ی شکست با استفاده از اعداد اولویت ریسک (RPN) است. در اینجا RPN حاصل از شاخص‌های احتمال (O) شدت (S) و کشف یا قابلیت شناسایی (D) است، (Zhang and Chu, 2011). سه مشکل اساسی در ارزیابی ریسک به روش FMEA، به ترتیب شامل ۱- در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از شاخص‌های ریسک (شدت، احتمال و کشف)، ۲- بیان امتیاز هر یک از حالت‌های نقص در مقابل شاخص‌های ریسک به صورت عددی (بین ۱ تا ۱۰) و ۳- اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس عدد RPN است که در برخی از مواقع ممکن است این اعداد با هم یکسان بوده و یا در صورت داشتن فاصله کم از یکدیگر، اولویت‌بندی ریسک‌ها با مشکل مواجه شود (Omidvar and Nirumand, 2017)، بنابراین در این تحقیق برای برطرف کردن محدودیت‌های روش FMEA در ارزیابی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست، از تئوری فازی استفاده شده است.

در مورد ارزیابی ریسک با استفاده از روش FMEA تحقیق‌های زیادی در دنیا و ایران در زمینه‌های مختلف صورت پذیرفته که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود، در پژوهشی Shao *et al*. (2013) به ارزیابی ریسک محیط زیستی تجمعی در یک پارک صنعتی در چین پرداخته‌اند که از یک مدل فیزیکی برای شناسایی ریسک‌های محیط زیستی و سپس منطقه بندی ریسک محیط زیستی استفاده کردند. آن‌ها چند مرحله از مدیریت و کنترل ریسک محیط زیستی شامل شناسایی و کنترل منبع خطر، برنامه‌ریزی ایمنی محیط زیستی و هشدار خطر، مدیریت اضطراری، ارزیابی اثرهای محیط‌زیستی و بازسازی محیط‌زیست از حادثه‌های آلوده‌کننده را مورد بررسی قرار دادند و سپس نقشه ارزیابی ریسک را به سه زون ریسک قابل قبول، هشدار و کاهشی طبقه‌بندی کردند. Yang and wang (2015) در پژوهشی به ارزیابی ریسک در سیستم-های مهندسی سواحل پرداختند. آن‌ها امتیازدهی بر اساس سه پارامتر احتمال، پیامد و شدت را برای هر کدام از اجزا انجام داده، فازی سازی کرده، با روش TOPSIS ارتباط سلسله مراتبی بین اجزاء را تشریح کرده و ارزیابی ریسک بر طبق FMEA فازی انجام دادند. Chin *et al*. (2008) ساختاری از FMEA فازی را بر اساس ارزیابی رویکرد مفاهیم محصول جدید پیشنهاد دادند. آن‌ها بر اساس متدولوژی پیشنهادی، سیستم الگوی اولیه‌ای را به نام EPDS-1 که می‌تواند به کاربران کم تجربه برای انجام تجزیه‌وتحلیل FMEA به‌منظور بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان، ارزیابی طرح جایگزین، انتخاب مواد و ارزیابی هزینه کمک کند، توضیح دادند به گونه‌ای که به بالا بردن قدرت محصول‌های جدید در مرحله طراحی مفهومی کمک می‌کند.

Shariati (2014) در تحقیقی به ارزیابی ریسک معدن زیرزمینی با استفاده از روش FMEA فازی پرداخته است. طبق نتایج این بررسی با مقایسه‌ی بین FMEA سنتی و FMEA فازی پیشنهادی در این تحقیق، مدل فازی توانایی بالاتری در فرموله کردن سطح ریسک دارد. Jozi *et al*. (2013) در واحد یوتیلیتی فازهای ۱۵ و ۱۶ منطقه پارس جنوبی به ارزیابی ریسک با کمک روش EFMEA پرداختند. آن‌ها در این پژوهش ۱۴۷ ریسک را شناسایی و مورد ارزیابی قرار دادند. Khodaee and Roghanian. (2012) به‌منظور ارزیابی ریسک پروژه‌ها مدل جدیدی را نشان دادند. آن‌ها با استفاده از روش گسترش عملکرد کیفیت در محیط فازی، اهمیت هر یک از شاخص‌ها را تعیین و سپس با خوشه‌بندی

به رده‌بندی اقدام‌های مهم پرداخته و سپس با استفاده از روش FMEA ریسک اقدام‌ها مهم را مورد ارزیابی قرار دادند. Jozi *et al.* (2011) به ارزیابی و مدیریت ریسک محیط‌زیستی واحد پلی‌اتیلن شرکت پلیمر آریاساسول با استفاده از روش EFMEA با هدف شناسایی و رده‌بندی جنبه‌های محیط‌زیستی در طول چرخه حیات پرداخته و به این نتیجه رسیدند که ۳۸/۹۸ درصد از ریسک‌های شناسایی شده در طبقه ریسک خیلی بالا قرار گرفته، ۲۵/۴۴ درصد در طبقه ریسک پایین، ۲۰/۹ درصد در طبقه ریسک متوسط و ۱۶/۶۸ درصد در سطح ریسک بالا قرار گرفتند.

از آنجا که صنایع پتروشیمی به‌طور معمول پسماندها و پساب‌هایی شامل آلاینده‌های معدنی تولید می‌کنند، می‌توانند آلودگی خاک و ریسک‌های انسانی و محیط‌زیستی را در پی داشته باشند (Nadal, 2004)، مجتمع پتروشیمی کرمانشاه نیز از این قاعده جدا نیست. اگرچه در برخی منبع‌ها دلیل‌های مختلفی برای ریسک‌های محیط‌زیستی از جمله، مشکل‌های فرآیندی، عامل‌های محیطی، عامل‌های انسانی و نوع مدیریت، برشمرده شده، به دلیل طبقه‌بندی نشدن این دلیل‌ها و نیز تعدد عامل‌ها و تأثیرگذاری غیر همسان هر کدام از دلیل‌ها بر سیستم‌ها و متفاوت بودن درجه اهمیت آن‌ها، رده‌بندی برای یافتن مهم‌ترین عامل‌ها لازم است. همچنین با توجه به اهمیت محیط‌زیست طبیعی و انسانی منطقه و به‌منظور مشخص شدن تأثیرپذیرترین بخش محیط‌زیست منطقه، ارزیابی ریسک محیط‌زیستی این مجتمع ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

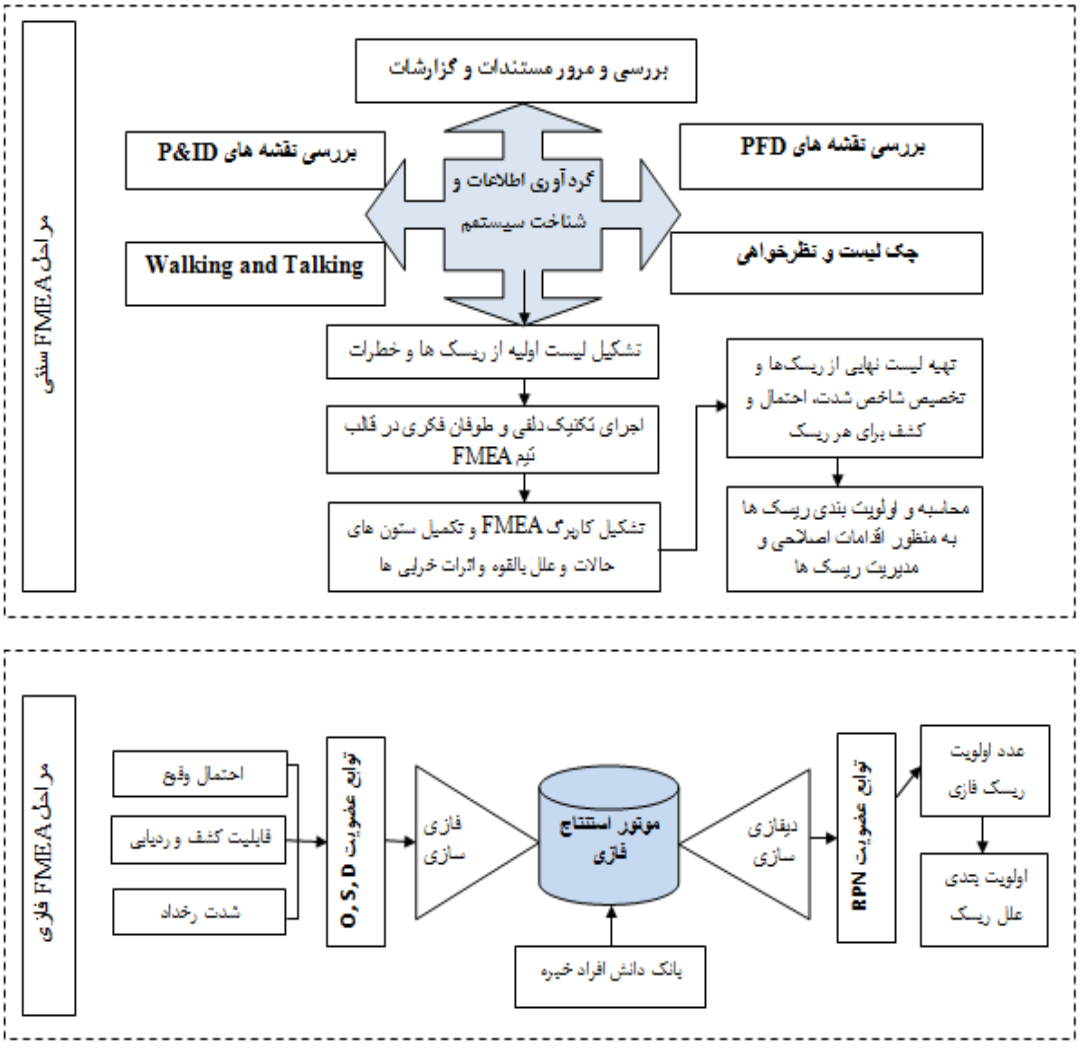
مطالعه موردی

پتروشیمی کرمانشاه در دشت‌های دامنه‌ای کوه‌های شیرز و بیستون قرار دارد. بلندترین نقطه این منطقه‌ها کوه‌های پراو و با ارتفاع ۳۳۸۵ متر در شمال غرب و کمترین ارتفاع در حوالی گرمیانک با ۱۲۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا قرار دارد. شیب عمومی منطقه به سمت دو رودخانه گاماسیاب و قره‌سو است. ساخت این مجتمع در سال ۱۳۸۱ در زمینی به مساحت ۳۶۵ هکتار در کیلومتر ۳۵ جاده کرمانشاه - همدان آغاز و در سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسید. محصول‌های این مجتمع شامل تولید روزانه ۲۰۰۰ تن در روز کود اوره و ۱۲۰۰ تن آمونیاک مایع است. طراحی واحد آمونیاک پتروشیمی کرمانشاه تحت دانش فنی شرکت کلاگ[5] انگلستان است که شرح فرآیند این دو محصول در (شکل ۳) آمده است. این واحد برای تولید ۱۲۰۰ تن در روز آمونیاک و ۱۴۹۴ تن دی‌اکسید کربن با خوراک گاز طبیعی طراحی شده است. ۱۱۳۲ تن در روز آمونیاک گرم با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به واحد اوره ارسال و مابقی با دمای ۳۵- درجه سانتی‌گراد به مخزن فرستاده می‌شود (kpic.ir).

روش پژوهش

تحقیق حاضر یک پژوهش مقطعی- تحلیلی است که در یک بازه زمانی حدود ۱۰ ماه در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه انجام گرفت. در این تحقیق با بررسی خط‌های تولید محصول‌های (اوره و آمونیاک) و با استفاده از نقشه‌های PFD[6] و P&ID[7] ابتدا کل مجتمع پتروشیمی به‌منظور ارزیابی ریسک مورد بازبینی و تحلیل قرار گرفت. در ادامه تیمی ۵ نفره از کارشناسان و خبرگان شامل دو نفر از واحد HSE، یک نفر از واحد بهره‌برداری، یک نفر از واحد فرآیند و یک نفر از واحد بازرسی فنی مجتمع پتروشیمی کرمانشاه تشکیل شد. سپس با استفاده از روش‌های همچون چک لیست، بررسی مستندها، نظرخواهی از اپراتورهای مربوط به بخش‌های مختلف و روش قدم زدن و گفتگو کردن در میان[8] (Walking-Talking/Through) Health and Safety Executive, 2016) اقدام به تهیه‌ی لیستی ابتدایی از مهم‌ترین ریسک‌ها و خطرها در حوزه‌ی محیط‌زیست گردید. روش قدم و گفتگو کردن یک فرآیند ساده است مرکب از یک شخص با تجربه که بتواند نحوه‌ی انجام کار یا فرآیند را تشریح کند و نیز برقراری ارتباط با دیگر افراد، بازیابی داده‌ها از رایانه‌ها و سیستم‌های نمایشگر را شامل می‌شود. در

مرحله‌ی بعد با استفاده از روش طوفان فکری و تکنیک دلفی اقدام به اصلاح لیست ابتدایی خطرها و ریسک‌های محیط زیستی گردید و در قالب روش تجزیه‌وتحلیل خطرها و آنالیز اثرهای آن‌ها (FMEA) به صورت مشخص شده در جدول ۲ تنظیم شد و سپس با استفاده از نظر کارشناسان و اعضای تیم ارزیابی ریسک، اقدام به امتیازدهی به هر کدام از ریسک-ها با توجه به سه عامل شدت (Severity)، احتمال (Occurrence) و کشف (Detection) که در جدول ۱ نمایش داده شده، گردید. در این تحقیق با توجه به نظرخواهی صورت گرفته و به‌منظور افزایش دقت از شاخص‌های ۱۰ کلاسه‌ای استفاده و عدد اولویت ریسک (RPN) نیز برای هر کدام از ریسک‌ها از حاصل‌ضرب سه عدد شدت، احتمال و کشف در محیط Excel محاسبه شد و نتایج به مانند ستون آخر در جدول ۲ به‌دست‌آمد. به‌منظور پیاده‌سازی FMEA فازی از جعبه‌ابزار فازی نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید. در این راستا نخست متغیرهای زبانی و تابع‌های عضویت فازی با نظر خبرگان و اعضای تیم FMEA تعریف و در مرحله‌ی بعد پایگاه قوانین اگر- آنگاه فازی تعریف و تشکیل گردید، سپس از موتور استنتاج ممدانی[9] به دلیل دقت آن برای فازی سازی و الگوریتم مرکز ثقل[10] برای غیر فازی سازی استفاده شد. شکل (۱) دیاگرام کلی روش FMEA سنتی و فازی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

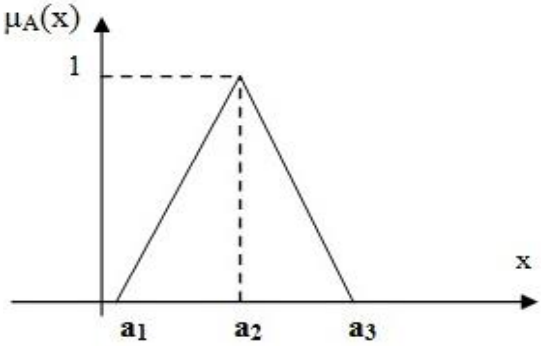


شکل ۱- دیاگرام مراحل روش FMEA سنتی و فازی

Fig. 1- The diagram of the traditional and fuzzy FMEA methods

تئوری فازی

در سال ۱۹۶۵ لطفعلی زاده نظریه مجموعه‌های فازی را برای تقابل با عدم قطعیت‌ها بیان کرد. سهم عمده‌ای از تئوری مجموعه‌های فازی مربوط به قابلیت آن در نمایاندن داده‌های مبهم است. تئوری مجموعه‌های فازی در بسیاری از حوزه‌هایی که به مدیریت عدم قطعیت و ارزش‌های مبهم نیاز دارند مانند مهندسی قابلیت اطمینان و مدیریت ریسک استفاده می‌شود (Roghanian and Mojibian, 2015). نظریه مجموعه-های فازی تعمیمی بر نظریه مجموعه کلاسیک یا قطعی است که با زبان و فهم روزمره انسان‌ها سازش دارد. یک مجموعه فازی، مجموعه‌ای از اشیاء با درجه‌های عضویت مختلف است و یک تابع عضویت به هر یک از اشیاء، درجه عضویتی با برد ۰ تا ۱ را نسبت می‌دهد. اعضایی که تابع عضویت ۱ را دارند، با قاطعیت به مجموعه مورد نظر تعلق داشته و دیگر میزان‌ها با قطعیتی متناسب با تابع عضویتشان به مجموعه مورد نظر تعلق دارند (Zade, 1965). عدد فازی مثلثی به وسیله‌ی یک سه تائی مرتب، تعریف و به صورت شکل (۲) نمایش داده می‌شود:



شکل ۲- تابع عضویت اعداد مثلثی فازی
Fig. 2- Fuzzy triangular membership function

بنابراین بر اساس شکل (۲)، تابع عضویت مثلثی طبق معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, \text{if } x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, \text{if} a_1 \le x \le a_2 \\ 1, \text{if } x = a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, \text{if} a_2 \le x \le a_3 \\ 0, \text{if } x > a_3 \end{cases} \qquad (۱)$$

متغیرهای زبانی[11] یک ساختار مناسب برای بیان ریاضی مفاهیم پیچیده و مبهم ذهنی هستند به‌ویژه در مواردی که نیاز به طبقه‌بندی حالت‌های مختلف از یک مفهوم وجود دارد. در مدل‌های فازی، استنتاج‌ها بر اساس یک سری قواعد اگر- آنگاه[12] صورت می‌گیرد. همچنین تبدیل مجموعه‌های فازی در فضای ورودی، به مجموعه‌های فازی در فضای خروجی توسط موتورهای استنتاج فازی انجام می‌شود. دو موتور معروف استنتاج فازی، موتور ممدانی و سوگنو[13] می‌باشند که موتور ممدانی به دلیل دقت در منابع تحقیق بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین فازی سازها[14] با توجه به تابع‌های عضویت تعریف شده برای متغیرهای ورودی، داده‌ها را به زبان ریاضی بر می‌گردانند. به دلیل اینکه در عمل به یک عدد دقیق به عنوان خروجی سیستم نیاز است، باید این خروجی غیر قطعی را به شکل قطعی درآورد. عمل غیر فازی سازی[15] با توجه به تابع‌های عضویت متغیر خروجی، مجموعه‌های فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می‌کند (Khasha *et al*., 2013). باوجود مزیت‌های روش FMEA سنتی، برخی کاستی‌ها نیز برای این روش در منابع علمی بیان شده است: (Liu *et al*., 2013; Bozdag *et al*., 2015)

اهمیت یا وزن نسبی پارامترهای ریسک (شدت، احتمال و کشف) در نظر گرفته نمی‌شود، درحالی‌که اهمیت‌های مختلف به اولویت‌های متفاوتی منتج خواهد شد.

ترکیب‌های مختلفی از رتبه‌بندی‌های شدت، احتمال و کشف می‌توانند به سطح *RPN*های یکسانی منجر شوند.

استفاده از عملگر ضرب برای محاسبه *RPN* بجای دیگر فرمول‌ها سؤال برانگیز است، چرا که ضرب برای تنوع در رتبه‌های شدت، احتمال و کشف بسیار حساس است.

مقیاس *RPN* پیوسته نیست، اگرچه از لحاظ تئوری محدوده بین ۱ تا ۱۰۰۰ را شامل می‌شود، اما بیشتر نقطه-ها در محدوده *RPN* نمی‌توانند درنتیجه‌ی ضرب شدت، احتمال و کشف شکل بگیرند.

به‌دست‌آوردن دقت و قضاوت عددی مستقیم، برای فاکتورهای کیفی همچون شدت، احتمال و کشف بسیار سخت و حتی غیر ممکن است.

عدم قطعیت و ذهنی بودن در قضاوت‌ها نمی‌تواند به طور مناسبی دست‌کاری شود.

نتایج و بحث

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی با استفاده از روش FMEA نیاز به شناخت دقیق سیستم و فرآیند مورد بررسی یعنی فرآیند تولید اوره و آمونیاک در شرکت صنایع پتروشیمی کرمانشاه است که در ادامه به صورت مختصر به شرح این فرآیندها پرداخته می‌شود.

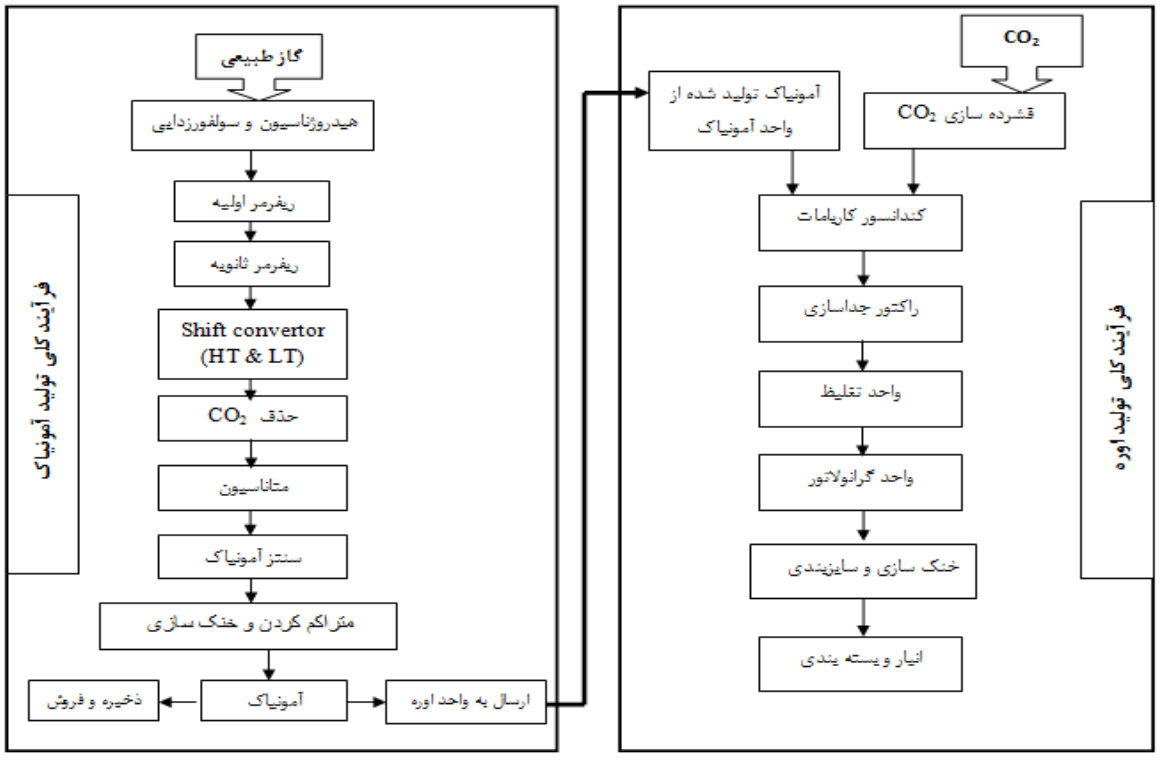
شرح فرآیند تولید آمونیاک

در این فرآیند ابتدا ترکیب‌های گوگردی گاز طبیعی حذف و سپس هیدروژن توسط فرآیند ریفرمینگ متان با بخار تهیه می‌شود که در این فرآیند از آب و گاز طبیعی استفاده می‌شود. در ادامه نیتروژن به همراه هوا وارد Secondary Reformer می‌شود. در این راکتور اکسیژن هوا با قسمتی از هیدروژن تولیدی واکنش داده و نیتروژن به صورت گاز بی‌اثر برای تولید آمونیاک باقی می‌ماند. نیتروژن و هیدروژن تولیدی دارای میزانی ناخالصی CO و CO_2 می‌باشند. با توجه به اینکه ترکیب‌های اکسیژن‌دار سبب مسمومیت کاتالسیت سنتز می‌شوند در راکتورهای Shift، CO به CO_2 تبدیل می‌شود و در قسمت جداسازی، CO_2 توسط محلول آمین جدا و برای تولید اوره به واحد اوره ارسال می‌شود. آمونیاک توسط واکنش هیدروژن و نیتروژن در دما و فشار بالا (تا حدود ۱۴۰ بار) و در حضور کاتالیست آهن به دست می‌آید. واکنش تولید تعادلی بوده و آمونیاک به همراه گاز تولید می‌گردد که حاوی ٪۵۶ هیدروژن، ٪۱۹ نیتروژن، ٪۷ متان، ٪۲ آرگون و ٪۱۶ آمونیاک است. در نهایت آمونیاک با استفاده از روش تبرید از مخلوط گازی جدا می‌شود و گازهای نیتروژن و هیدروژن که در واکنش شرکت نکرده‌اند دوباره به صورت یک جریان برگشتی به راکتور برگردانده می‌شوند (شکل ۳) (PFD and PI&D in the K.P.I.C).

شرح فرآیند تولید اوره

آمونیاک خالص با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۶ بار از واحد آمونیاک دریافت شده و در پمپ سانتریفیوژ چند مرحله‌ای فشار بالا P-4104 تا فشار ۱۶۴ تا ۱۷۰ بار فشرده و سپس به پول کندانسور[۱۶] که یک راکتور افقی و دارای مبدل داخلی برای جذب گرمای به-دست‌آمده از انجام واکنش است وارد می‌شود. دی‌اکسید کربن نیز با غلظت حدود ۹۹ درصد حجمی با فشار ۱/۸ بار و دمای ۴۳ درجه از واحد آمونیاک وارد ساکشن کمپرسور[۱۷] چهار مرحله‌ای شده و در فشار ۱۴۴ تا ۱۴۶ بار فشرده شده و با توزیع یکنواخت در طول راکتور و زمان اقامت مناسب به همراه آمونیاک در فشار ۱۴۰ تا ۱۴۴ بار وارد واکنش می‌شود. در خروجی از پول کندانسور ۶۰ درصد کل اوره سازی انجام گرفته و غلظت در خروجی به ۲۲ درصد می‌رسد. سپس مخلوط دو فازی گاز و مایع

خروجی وارد راکتور عمودی سینی‌دار آدیاباتیک شده (R-4101) و گازهای خروجی با جذب در اسکرابر به ورودی پول کندانسور برگشت داده می‌شود. مایع خروجی از راکتور وارد HP Stripper شده و یک مرحله با انجام فرآیند استریپینگ تغلیظ و سپس کاهش فشار و فرآیند Evaporation غلظت به ۹۵ درصد با دمای ۱۳۰ تا ۱۳۳ درجه رسیده و سپس با اضافه کردن اوره فرمالدیید به آن به واحد گرانول ارسال می‌شود. محلول اوره ۹۶ درصد از طریق P-4109 وارد واحد گرانول شده و به وسیله هوای متمایز داخل بستر سیال جامد اسپری می‌گردد تا با هوای فلودایز انتقال جرم انجام داده و آب محلول اوره وارد هوا گردد و اوره جذب دانه‌های ریز داخل گرانولاتور می‌گردد. سپس دانه‌های گرانول از گرانولاتور خارج و در داخل کولر اولیه خنک و سپس وارد سیستم سایزبندی شده و محصول نرمال بعد از خروج از کولر نهایی به سیستم توزین هدایت شده و از آنجا به واحد بالک و بسته‌بندی فرستاده می‌شود (شکل ۳) (PFD and PI&D in the K.P.I.C).



شکل ۳- دیاگرام فرآیند تولید آمونیاک و اوره پتروشیمی کرمانشاه بر اساس روش شرکت کلاگ

Fig. 3- Diagram of production process of ammonia and urea in Kermanshah petrochemicam complex

در این تحقیق ابتدا ارزیابی ریسک محیط زیستی با استفاده از روش FMEA سنتی انجام گرفت، که بنابراین روش پس از بررسی منابع و مستندات و همچنین گردآوری داده‌ها با روش‌های مختلف تعداد بیش از ۵۰ ریسک مهم محیط زیستی شناسایی و ثبت شد. پس از واردکردن داده‌های ریسک‌های شناسایی شده در کاربرگ مخصوص روش FMEA، با کمک اعضای تیم اقدام به تکمیل کردن ستون‌های مربوط به حالت خرابی بالقوه، اثرهای خرابی، علت‌های بالقوه خرابی و همچنین کنترل روند فعلی گردید. پس از تکمیل ستون‌های مختلف و اصلاح لیست ابتدایی به کمک اعضای تیم، تعداد ۳۸ ریسک دارای اهمیت محیط زیستی به عنوان ریسک‌های اصلی که نمونه‌ای از آن در جدول (۲) نشان داده شده، شناسایی و نهایی گردید. سپس با استفاده از شاخص‌های احتمال وقوع (O)، قابلیت کشف یا ردیابی (D) و شدت یا

وخامت رخدادها (S) که هر کدام در ۱۰ رتبه به همراه عبارت‌های توصیفی در جدول (۱) شرح داده شده، با استفاده از نظرهای کارشناسان و خبرگان و اعضای تیم ارزیابی ریسک به هر کدام از ریسک‌های شناسایی شده مقدار عددی متناسب با آن‌ها از جدول (۱) انتخاب و در کاربرگ FMEA وارد و سپس با حاصل‌ضرب این ۳ شاخص مقدار عدد اولویت ریسک (RPN) برای آن‌ها محاسبه شد که نتایج آن‌ها در جدول شماره (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۱- شرح شاخص‌های شدت، احتمال و کشف ۱۰ رتبه‌ای

Table 1. Severity, occurrence and detection scales (Bozdag et al, 2015)

امتیاز Score	عبارات توصیفی Description of terms		
	شدت Severity	احتمال وقوع Occurrence	ردیابی یا کشف Detection
10	بسیار شدید و فاجعه آفرین/ اتلاف یا مصرف بسیار زیاد منبع‌ها Hazardous without warning/ Losing or consuming too much resources	احتمال وقوع حادثه یا نقص هر روز یک‌بار Likely occurrence of an incident or defect every day	غیرقابل شناسایی، نبود سیستم‌های ردیابی و اپراتور Unidentifiable, lack of tracking systems and operators
9	شدید و مخرب بدون احتمال ترمیم / اتلاف یا مصرف زیاد منابع Hazardous with warning/ Losing or consuming much resources	وقوع حادثه بسیار محتمل هر ۳ تا ۴ روز یک‌بار Very likely occurrence every 3 to 4 days	به ندرت قابل ردیابی و شناسایی با آزمایش-های مرحله‌ای و بسیار دقیق Rarely detectable and identified by step-by-step and highly accurate tests
8	جدی و مضر با احتمال ترمیم کم/ تخریب و اتلاف منابع نسبتاً زیاد Very high/ Losing or consuming relatively high resources	احتمال وقوع خرابی یا حادثه در هر هفته The probability of a failure or incident per week	با قابلیت ردیابی کم با استفاده از آنالیزهای دوره‌ای و دقیق Low traceability using periodic and accurate analyzes
7	خسارت زیاد با هزینه ترمیم زیاد/ تخریب و اتلاف منابع High damage with high cost / destruction and waste of resources	وقوع حادثه یا خرابی هر ماه یک‌بار Occurrence or failure once a month	قابل ردیابی با روتین‌های منظم و دوره‌ای به همراه آزمایش‌های ساده Trackable with regular and periodic routines with simple tests
6	خسارت زیاد اما مخرب بالقوه نیست/ با امکان آلایندگی و تخریب منابع Damage is not high but destructive / with the possibility of pollution and destruction of resources	احتمال متوسط در وقوع حادثه یا خرابی هر سه ماه یک‌بار Average probability of occurrence of an accident or failure every three months	قابلیت ردیابی و شناسایی خطر با احتمال ۵۰-۵۰ Ability to trace and identify the risk with a probability of 50-50
5	خسارت متوسط و اثرهای منطقه‌ای/ تخریب متوسط و اتلاف انرژی و منابع Moderate damage and regional impacts / Moderate destruction and waste of energy and resources	وقوع حادثه یا خرابی هر ۶ ماه تا یکسال یک‌بار Incident or failure every 6 months to one year	قابل ردیابی و تشخیص در روتین‌های معمولی و عینی Can be detected in normal and objective routines
4	ضرر به‌نسبت کم/ اتلاف زیاد منابع و امکان آلایندگی زیاد در سطح‌های محدود Relatively low loss / high waste of resources and high contamination at limited levels	احتمال وقوع حادثه یا خرابی خیلی کم هرسال یک‌بار probability of an accident or destruction is very low every year once	ردیابی به کمک آلارم‌های دیداری و شنیداری و روتین‌های روزانه Tracking with visual and audio alarms and daily routines
3	ضرر کم با اثرهای محلی و آلایندگی‌های کوتاه‌مدت و تخریب و اتلاف محدود منابع Low losses with local impacts and short-term pollution	وقوع حادثه یا خرابی به صورت نادر هر سه سال Accident or failure is rare every three years	احتمال بالا در شناسایی و ردیابی به کمک آلارم‌ها High probability of detecting and tracking alarms
2	جزئی با اثرهای محلی و کوتاه‌مدت Minor and short-term local effects	احتمال خیلی نادر هر ۵ سال یک‌بار Very rare probability every 5 years	احتمال خیلی بالا در ردیابی و تشخیص خطر بدون نیاز به ابزار و آزمایش‌ها Very high probability of tracking and detecting risk without the need for tools and experiments
1	بسیار ناچیز و محلی و قابل چشم پوشی Very negligible and locally indescribable	احتمال بعید هر ۱۰ سال یک‌بار Likely probability every 10 years	به‌طور کامل قابل ردیابی و مشخص Completely traceable and distinguished

جدول ۲- نمونه‌ای از کاربرگ تکمیل‌شده روش FMEA در فرآیند ارزیابی ریسک محیط زیستی پتروشیمی کرمانشاه

Table 2. An example of a completed worksheet for FMEA method in the process of environmental risk assessment in Kermanshah petrochemical complex

RPN	D	O	S	کنترل روند فعلی Actions for evidence	عامل‌های بالقوه خرابی Potential failure causes	اثرهای خرابی Effects of failure	حالت‌های خرابی بالقوه Potential failure modes	فعالیت‌ها Activity
14	5	7	4	عمل کردن طبق دفترچه راهنمای[18]واحد آمونیاک Operating manual of Ammonia unit	نقص در سیستم و اتصال‌ها Defect In the system and connections	آلودگی هوا air pollution	انتشار آلاینده‌های CH4, CO, CO2 Emissions of CH4 , CO, CO2	فشرده‌سازی گاز طبیعی در کمپرسور ۲۱۰۲ Compressing natural gas In the compressor of 2102
90	3	10	3	وجود زهکشی آب روغنی[19]و شستشو با بخاردادن بعد از لود- عمل کردن طبق دفترچه راهنمای واحد آمونیاک Existence of oily water and washing with steam after loading- Operating manual of Ammonia unit	لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها Inappropriate oil loading And lack of timely collection of networks	آلودگی خاک Soil pollution	ریزش و نشت روغن از فلنج‌ها، اتصال‌ها، لوپ روغن Oil leaks from flanges, connections, Loop oil	فشرده‌سازی گاز طبیعی در کمپرسور ۲۱۰۲ Compressing natural gas In the compressor of 2102
90	3	5	6	نگهداری در انبارهای ضایعاتی ویژه- عمل کردن طبق دفترچه راهنمای واحد آمونیاک Keeping in Special waste warehouses- Operating manual of Ammonia unit	تعویض و تخلیه کاتالیست‌ها Switch And unloading of catalysts	آلودگی خاک Soil pollution	تولید پسماند Waste production	هیدروژناسیون و گوگردزدایی از گاز Hydrogenation and desulphurisation of gas
126	3	6	7	سیستم‌های کنترلی فرآیند- بازیابی آب خنک کاری- عمل کردن طبق دفترچه راهنما Process control systems- Cooling Water Recovery - Operating manual of Ammonia unit	بروز مشکل‌های فرآیندی Appearance Process problems	تحلیل منابع Destruction Sources	مصرف بی‌رویه انرژی Extra energy consumption	تبدیل گاز طبیعی به گاز سنتز در فرآیند ریفرمینگ Conversion of Natural Gas to Synthesis Gas in the Reforming Process
280	4	10	7	تنظیم میزان اکسیژن سوخت احتراق- عمل کردن طبق دفترچه راهنما Adjust the amount of oxygen fuel combustion- Operating manual of Ammonia unit	فرایند احتراق در کوره و خروج از دودکش Combustion process in the furnace and Exiting Flue	آلودگی هوا air pollution	انتشار گازهای آلاینده SOx ,NOx Emissions of NOx , SOx	تبدیل گاز طبیعی به گاز سنتز در فرآیند ریفرمینگ Conversion of Natural Gas to Synthesis Gas in the Reforming Process
60	2	10	3	وجود زهکشی آب روغنی و شستشو با بخاردادن بعد از لود Existence of oily water and washing with steam after loading	لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها Inappropriate oil loading And lack of timely collection of networks	آلودگی خاک Soil pollution	ریزش و نشت روغن از فلنج‌ها، اتصال‌ها و لوپ روغن Oil leaks from flanges, connections, Loop oil	فشرده‌سازی هوا در کمپرسور ۲۱۰۲ Compressing air In the compressor of 2102

ادامه جدول ۲- نمونه‌ای از کاربرگ تکمیل‌شده روش FMEA در فرآیند ارزیابی ریسک محیط زیستی پتروشیمی کرمانشاه

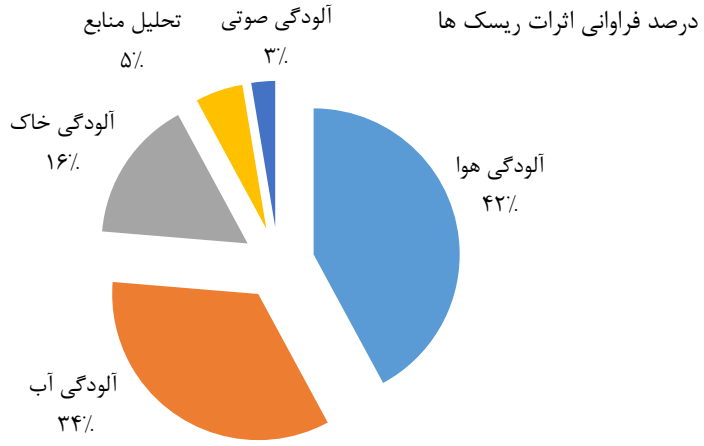
Table 2. An example of a completed worksheet for FMEA method in the process of environmental risk assessment in Kermanshah petrochemical complex

فعالیت‌ها Activity	حالت‌های خرابی بالقوه Potential failure modes	اثرهای خرابی Effects of failure	عامل‌های بالقوه خرابی Potential failure causes	کنترل روند فعلی Actions for evidence	S	O	D	RPN
جذب و دفع CO2 توسط محلول aMDEA Adsorption and desorption CO2 By soluble of aMDEA	نشت aMDEA۲۰ و آنتی فوم از فلنج ها، اتصال‌ها و دستگاه‌ها aMDEA leaks And antifoam from the flanges and connections	آلودگی آب water pollution	لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها Inappropriate oil loading And lack of timely collection of networks	وجود حوضچه بازیابی- چک روزانه- تعمیرهای به موقع Existence Recovery pond-Daily check-Timely repairs	5	6	3	90
جذب و دفع CO2 توسط محلول aMDEA Adsorption and desorption CO2 By soluble of aMDEA	انتشار گاز CO2 CO2 emission	آلودگی هوا air pollution	ونت برج دفع در مواقعی که به واحد اوره فرستاده نمی‌شود Went Tower Disposal if not sent to urea unit	سیستم‌های کنترلی فرآیند- عمل کردن طبق دفترچه راهنمای واحد آمونیاک Process control systems-Operating manual of Ammonia unit	7	6	5	210
جذب و دفع CO2 توسط محلول aMDEA Adsorption and desorption CO2 By soluble of aMDEA	ریزش و نشت روغن از فلنج ها، اتصال‌ها و لوپ روغن Oil leaks from flanges, connections, Loop oil	آلودگی خاک Soil pollution	نقص در سیستم و اتصال‌ها Defect In the system and connections	ورود به سیستم آب روغنی entering the system of Oily water	4	5	3	60
شستشوی عقب فیلترهای ۲۱۱۵ و ۲۱۰۴ Back wash of the 2115 and 2104 Filters	تولید پساب Wastewater production	آلودگی آب water pollution	فرآیند سیستم System process	عمل کردن طبق دفترچه راهنما Operating manual	4	7	1	28
جمع‌آوری آب پروسس درام ۲۱۰۲ Collection of water processing 2102 tower	تولید پساب آمونیاکی Production Ammoni a wastewater	آلودگی آب water pollution	در سرویس نبودن T-2150 و تخلیه آب پروسس جدا شده از گاز discharge process Water due to the lack of service T-2150	ورود به سیستم آب روغنی عمل کردن طبق دفترچه راهنمای واحد آمونیاک entering the system of Oily water-Operating manual of Ammonia unit	4	6	3	72
فرایند گرم سازی محلول aMDEA در زمان راه‌اندازی aMDEA solution heating process At startup	تولید پساب آمونیاکی Production Ammoni a wastewater	آلودگی آب water pollution	دورریز کندانس Condensate waste	سیستم‌های کنترلی فرآیند Process control systems	4	7	4	112

لازم به ذکر است که عبارت‌های توصیفی در جدول (۱) گاهی از مواقع نمی‌توانند به طور کامل و روشن معیارهای یک ریسک شناسایی شده را پوشش و بیان کنند چرا که بیشتر سلیقه‌ای بوده و از جنبه‌ی علمی مستند و معتبری برخوردار نیست، بنابراین نظر کارشناس برای اختصاص دادن هر رتبه‌ای از شاخص‌های سه‌گانه رتبه، به یک ریسک، می‌تواند با کارشناسان دیگر تا حدودی متفاوت باشد بنابراین ناگزیر باید نسبت به انتخاب کارشناسان خبره و با سابقه‌ی زیاد و نیز میانگین‌گیری این نظرها اقدام نمود که در این تحقیق نیز

در برخی موارد که نظرها با یکدیگر اختلاف ناچیز داشتند میانگین نظرها به عنوان رتبه‌ی نهایی لحاظ شده است.

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها در واحدهای اوره و آمونیاک مورد بررسی قرار گرفته و حالت‌های بالقوه‌ی خرابی، تأثیرهای هر نوع خرابی یا نقص و دلیل‌های بالقوه این خرابی‌ها، در ستون‌های بعدی این کاربرگ ثبت شده است. همچنین بنابر مشاهده‌ها و بررسی‌های صورت گرفته و مصاحبه و گفتگو با مدیران بخش‌های مختلف و برخی از اپراتورها ستون مربوط به کنترل روند فعلی، تکمیل شده و نشان می‌دهد که در بیشتر موارد دستگاه‌ها و اپراتورها هر کدام بنابر وظایف تعیین شده توسط دستورالعمل‌های کاری اقدام می‌کنند. با توجه به اینکه تعیین دقیق تاثیر هر کدام از نقص‌ها و خرابی‌ها بر روی محیط‌زیست نیاز به انجام آزمایش پارامترهای کیفی و نیز دوره‌های زمانی تقریباً بلندمدت دارد، بنابراین در این کاربرگ تاثیرهای بالقوه این ریسک‌ها و خرابی‌های سیستمی با دید کلی در بخش محیط‌زیست و در ۵ بخش آلودگی هوا، آلودگی آب، آلودگی خاک، تحلیل منابع و آلودگی صوتی در نظر گرفته شده است. تحلیل و ارزیابی اثرات چنین ریسک‌هایی نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی مربوط به آلودگی در بخش هوا و پس از آن در بخش آب می‌باشد (شکل ۴) که چنین اثراتی به دلیل حجم زیاد بخارات ناخالص و گازهای خروجی و نیز میزان بالای پساب‌های آلوده در زمان خرابی‌ها و یا حتی در زمان از سرویس خارج شدن[۲۱] در چنین سیستم‌هایی است زیرا در زمان خرابی و یا تعمیرها، کل محتوای لوله‌ها و اتصال‌ها و گاهی حتی مخزن‌ها و پمپ‌ها نیز باید تخلیه و دفع شود که در چنین مواقعی ریسک آلودگی آب به شدت بالا می‌رود. نکته قابل تأمل در چنین مواقعی، نادیده انگاشتن مسئله محیط‌زیست به دلیل تقدم دانستن مسئله‌های ایمنی، بهداشتی و حتی مالی بر محیط‌زیست می‌باشد.



شکل ۴- توزیع فراوانی اثرات بالقوه ریسک‌ها

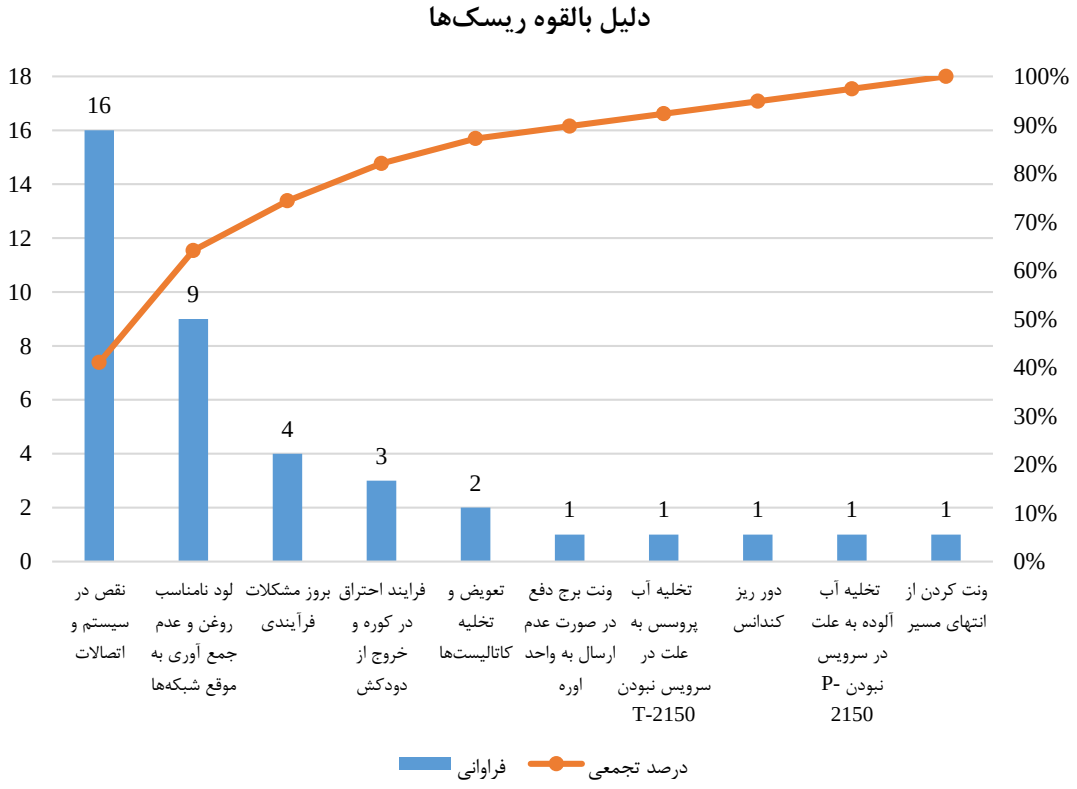
Fig. 4- Distribution of potential effects of risks

همچنین تحلیل دلیل‌های بالقوه خرابی‌ها در ارزیابی ریسک به روش FMEA نشان می‌دهد که بیشتر دلیل‌های خرابی‌ها و در نتیجه‌ی آن ریسک‌های محیط‌زیستی مربوط به تعداد محدودی از عامل‌ها می‌باشند (جدول ۳). به گونه‌ای که در تحقیق حاضر از تعداد ۳۹ ریسک شناسایی شده ۱۶ مورد از ریسک‌ها در حالت‌های مختلف دارای منشاء یکسانی بوده و ناشی از نقص در سیستم و اتصال‌ها است. همین طور لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها، منشاء ۹ مورد و نیز بروز مشکل‌های فرآیندی، دلیل ۴ مورد از ریسک‌ها است (جدول ۳). که در این مورد نیز تا حدودی می‌تواند از اصل مدیریتی پارتو[۲۲] (یا اصل نسبی ۸۰:۲۰) پیروی کند.

جدول ۳- مهم‌ترین دلیل‌های بالقوه ریسک‌های شناسایی شده در ارزیابی ریسک

Table 3. Potential causes of the identified risks in the risk assessment

فراوانی Frequency	علت بالقوه Potential cause	
16	نقص در سیستم و اتصال‌ها (Defect In the system and connections)	**1**
9	لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها (Inappropriate oil loading And lack of timely collection of networks)	**2**
4	بروز مشکل‌های فرآیندی (Occurrence of process problems)	**3**
3	فرآیند احتراق در کوره و خروج از دودکش (Combustion process in the furnace and Exiting Flue)	**4**
2	تعویض و تخلیه کاتالیست‌ها (Switch And unloading of catalysts)	**5**
1	ونت برج دفع در صورت ارسال نکردن به واحد اوره (Went Tower Disposal if not sent to urea unit)	**6**
1	تخلیه آب پروسس به دلیل در سرویس نبودن T-2150 (discharge process Water due to the lack of service T-2150)	**7**
1	دورریز کندانس (Condensate waste)	**8**
1	تخلیه آب آلوده به دلیل در سرویس نبودن P-2150 (Discharged contaminated water due to the lack of service T-2150)	**9**
1	ونت کردن از انتهای مسیر (Went from end of the path)	**10**



شکل ۵- مهم‌ترین دلیل‌های بالقوه ریسک‌های شناسایی شده در ارزیابی ریسک

Fig. 5- Potential causes of the identified risks in the risk assessment

تئوری پارتو بیان می‌دارد که تقریباً ۸۰ درصد رخدادها از ۲۰ درصد دلیل‌ها به وجود می‌آید. ابتدا یک اقتصاددان ایتالیایی به نام Vilfredo Pareto مفهوم بهینگی پارتو را در موقعیت‌های پایدار و متعادل توسعه داد. بعدها این تئوری ۸۰/۲۰ برای انواع دیگری از فعالیت‌های انسانی گزارش گردید. به گونه‌ای که محققان مختلف، تعریف‌های مشترکی را در فعالیت‌های گوناگون نشان دادند. به‌عنوان نمونه ۸۰ درصد فروش یک محصول مربوط به ۲۰ درصد از مشتری‌هاست، ۸۰ درصد سودمندی‌ها می‌تواند با ۲۰ درصد کار به‌دست آید (Chen *et al*., 1994). گاهی اوقات به این تئوری اصل ۷۰/ ۳۰ نیز گفته می‌شود. بنابراین بر طبق تئوری مدیریتی پارتو در برخی از سیستم‌ها عامل تقریباً ۸۰ درصد از شکست‌ها و یا خرابی‌ها به حدود ۲۰ درصد از موارد مربوط است. که در این تحقیق نیز طبق محاسبه بیش از ۷۰ درصد از ریسک‌ها مربوط به حدود ۳۰ درصد از موارد است. نحوه‌ی توزیع فراوانی هر کدام از علل بالقوه‌ی ریسک‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.

عدد اولویت ریسک (RPN) نیز بنابر آنچه در جدول (۲) گفته شد از حاصل‌ضرب ۳ شاخص احتمال (O)، شدت (S) و کشف (D) به‌دست‌آمده و بررسی و مقایسه این مقادیر برای کل ریسک-های شناسایی شده نشان می‌دهد که بیشترین عدد اولویت ریسک مربوط به مؤلفه از سرویس خارج شدن واحد آمونیاک و انتشار حجم زیادی از گازهای هیدروژن و آمونیاک به دلیل هر نوع مشکل فرآیندی و ایجاد آلودگی هوا با عدد اولویت ریسک ۴۹۰ می‌باشد و پس از آن عملیات فلراسیون با عدد اولویت ریسک ۴۴۱ که حالت بالقوه خرابی آن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا است که به دلیل احتراق گاز در فلر صورت می‌گیرد.

FMEA فازی

به‌منظور فائق آمدن بر یک یا بیشتر کاستی-های بیان شده در بالا رویکردهایی در منابع پیشنهاد شده است به گونه‌ای که منابع مختلفی عدم قطعیت-ها را بررسی کرده و رویکردهای همچون تئوری شواهد[۲۳] (Yang *et al*., 2011)، تئوری گری[۲۴] (Chang *et al*., 2001)، تئوری مجموعه‌های ناهموار[۲۵] (Song *et al*., 2014) و مجموعه‌های فازی شهودی و مجموعه‌های فازی بر اساس قواعد را پیشنهاد دادند. (Bozdag *et al*., 2015). در این مقاله از روش مجموعه‌های فازی برای برطرف کردن عدم قطعیت‌ها استفاده شده است.

جدول ۴- رتبه‌های فازی برای احتمال شکست‌ها و نقص‌ها
Table 4. Fuzzy ratings for probability of failures and defects

رتبه Rank	احتمال وقوع Occurrence	عدد فازی Fuzzy number
خیلی کم (**Very low**)	رخداد غیرمحتمل Unlikely event	(1,1,3)
کم (**low**)	با احتمال نسبتاً کمی With a small probability	(1,1,3)
متوسط (**Moderate**)	رخدادهای اتفاقی Occasional Events	(3,5,7)
زیاد (**high**)	رخدادهای پی‌درپی Successive events	(5,7,9)
خیلی زیاد (**Very high**)	رخداد تقریباً اجتناب ناپذیر و حتمی Almost inevitable and definite events	(8,10,10)

جدول ۵- رتبه‌های فازی برای شدت رخدادها و وقایع

Table 5. Fuzzy ratings for the severity of events

رتبه Rank	شدت اثر Severity	عدد فازی Fuzzy number
خطرناک بدون هشدار (Hazardous without warning)	شدت رخداد بسیار بالا بدون هشدار Very high incidence without warning	(10,10,9)
خطرناک با هشدار (Hazardous with warning)	شدت رخداد خیلی بالا با هشدار Very high incidence with warning	(10,9,8)
خیلی زیاد (Very high)	عملکرد غیرطبیعی با نقص‌های تخریبی Abnormal performance with degradation defects	(9,8,7)
زیاد (high)	عملکرد غیرطبیعی با خسارت به تجهیزات Abnormal performance with equipment damage	(8,7,6)
متوسط (Moderate)	عملکرد غیرطبیعی با خسارت‌های قابل‌ترمیم و کم‌هزینه Abnormal performance with Repairable and low cost damages	(7,6,5)
کم (low)	عملکرد غیرطبیعی با خسارت اندک Abnormal performance with minor damage	(6,5,4)
خیلی کم (Very low)	عملکرد طبیعی با کاهش کارایی Natural performance with reduced performance	(5,4,3)
جزئی (minor)	عملکرد طبیعی با کاهش اندک کارایی Natural function with a slight decrease in efficiency	(4,3,2)
خیلی جزئی (Very minor)	عملکرد طبیعی با اثرهای جزئی Natural function With minor effects	(3,2,1)
هیچ (None)	بدون اثر No effect	(2,1,1)

جدول ۶- رتبه‌های فازی برای کشف و ردیابی نقص‌ها

Table 6. Fuzzy Ratings to detection of defects

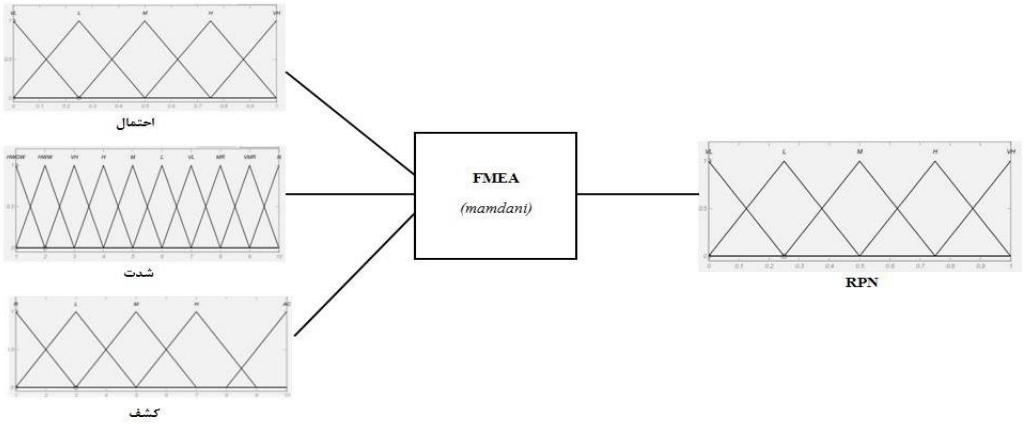
رتبه Rank	احتمال کشف Detection	عدد فازی Fuzzy number
تقریباً قطعی (Almost certain)	شانس کشف خیلی بالا و تقریباً قطعی The chance of discovery is very high and almost definitive	(1,1,3)
زیاد (high)	شانس زیاد با آلارم ها و روتین‌ها high chance With alarms and routines	(1,3,5)
متوسط (Moderate)	احتمال ۵۰- ۵۰ Chance of discovery 50-50	(3,5,7)
کم (low)	شانس کم و به وسیله آنالیزها Little chance And by analyzes	(5,7,9)
بعید (Rare)	بدون شانس برای کشف و ردیابی No chance to discover and track	(8,10,10)

جدول ۷- متغیرهای زبانی برای RPN در رویکرد FMEA فازی

Table 7. Linguistic variables for RPN in the fuzzy FMEA approach

علامت sign	متغیرهای زبانی Linguistic variables	وزن فازی Fuzzy weight
VL	خیلی کم (very Low)	(0, 0, 0/25)
L	کم (Low)	(0, 0/25, 0/5)
M	متوسط (medium)	(0/25, 0/5, 0/75)
H	زیاد (High)	(0/5, 0/75, 1)
VH	خیلی زیاد (very High)	(0/75, 1, 1)

مراحل FMEA فازی به صورت کلی در بخشی از شکل ۲ نمایش داده شده است. به‌منظور پیاده‌سازی این رویکرد، ابتدا متغیرهای زبانی و تابع‌های عضویت فازی برای ۳ شاخص احتمال، شدت و کشف و همچنین طبقه‌های RPN به صورت جدول‌های ۵ تا ۸ و مانند شکل ۵ تعریف شد. سپس پایگاه قواعد اگر- آنگاه فازی را برای سه شاخص بیان شده، به عنوان ورودی و RPN به عنوان خروجی تعریف و الگوریتم ممدانی را به عنوان موتور استنتاج فازی و الگوریتم مرکز ثقل را به عنوان نا فازی ساز تعریف گردید. در این بخش سپس با خلاصه‌سازی جدول (۲)، در برخی از مهم‌ترین ریسک‌ها در حوزه‌ی HSE یعنی در سه بخش بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست اقدام به فازی سازی روش FMEA گردید. همان‌طور که در جدول‌های ۴ تا ۷ نیز قابل مشاهده است، شاخص‌های سه‌گانه احتمال، شدت و کشف سنتی به صورت متغیرهای زبانی به اعداد فازی تبدیل شده‌اند. در این راه بر اساس نظرخواهی از اعضای تیم ارزیابی ریسک و خبرگان خواسته شد تا به هر کدام از زیر معیارهای مشخص شده در جدول ۸ و بر اساس متغیرهای زبانی فازی در جدول‌های ۴ و ۵ و ۶ امتیازدهی کنند سپس با توجه به قواعد اگر-آنگاه در جعبه‌ابزار فازی در نرم‌افزار MATLAB، خروجی FMEA به فازی به صورت جدول ۸ محاسبه گردید. نحوه‌ی ترکیب سه متغیر ورودی و خروجی بر طبق روش فازی به صورت ساده‌شده در شکل (۶) قابل مشاهده است. در این روش ورودی‌ها با استفاده از عملگر (AND) و با اهمیت یکسان برای هر کدام از سه فاکتور بیان شده با یکدیگر ترکیب می‌شوند و RPN فازی را به دست می‌دهند.



شکل ۶- نحوه‌ی تعریف و ترکیب تابع‌های عضویت سه متغیر ورودی و متغیر RPN به عنوان خروجی

Fig. 6- Definition and composition of the membership functions of the three input variables and the output RPN variable

لازم به ذکر است که در این بخش، ریسک‌های شناسایی شده به صورت کلی در نظر گرفته شده است و مربوط به کل زیر سیستم‌های مجتمع پتروشیمی است به عبارتی دیگر کل ریسک‌هایی که پیشتر در تمام بخش‌های سیستم شناسایی شده در این بخش در ۱۵ حالت خرابی که ۱۵ اثر بالقوه مهم طبق نظر خبرگان را در بر می‌گیرد مورد ارزیابی فازی قرار گرفته است. در این مرحله به‌منظور خلاصه کردن و تکرار نکردن مراحل انجام گرفته در جدول (۲) برخی از ستون‌های کاربرگ FMEA حذف و ستون مربوط به خروجی فازی اضافه شده است. ستون‌های احتمال، شدت و کشف را بنابر نظرهای خبرگان و اعضای تیم FMEA و نیز نتیجه‌گیری از جدول (۲) که پیشتر به صورت کامل‌تری ترسیم شده بود، تکمیل و امتیازدهی شد. نکته قابل توجه اینکه در این بخش شاخص‌های احتمال و کشف ۵ رتبه‌ای و شاخص شدت ۱۰ رتبه‌ای در نظر گرفته شدند. بررسی جدول ۸ نشان می‌دهد که بالاترین عدد اولویت فازی در بخش بهداشت و سلامت مربوط به حالت خرابی و با پیامد آلودگی صوتی که عدد فازی ۰/۷۵ و طبقه متغیر زبانی زیاد (H) را کسب کرده،

می‌باشد و پس از آن حالت خرابی ۴ با اثر تماس با سطح‌های داغ و سوختگی است که با عدد فازی ۰/۶۱۳ در طبقه زیاد (H) قرار گرفته است. در بخش ایمنی نیز بالاترین عدد اولویت ریسک مربوط به حالت خرابی ۶ با عدد اولویت فازی ۰/۷۵ که اثر بالقوه این حالت خرابی سقوط از ارتفاع است، می‌باشد. در بخش محیط زیستی اثرات بالقوه‌ی آلودگی هوا، خاک، آب، تحلیل منابع و ردپای اکولوژیک[۲۶] مورد امتیازدهی قرار و ارزیابی ریسک قرار گرفته است. در این بخش نیز بالاترین عدد اولویت ریسک فازی مربوط به حالت‌های خرابی ۱۴ با اثر بالقوه تحلیل و اتلاف منابع اکولوژیکی ۰/۶۱۳ است. در این بخش، ریسک افزایش ردپای اکولوژیک نیز مورد بررسی قرار گرفته که این مفهوم مربوط به تحلیل میزان جای پای اکولوژیکی یک سیستم بر اساس ۵ پارامتر قابل‌محاسبه بر اساس هکتار جهانی مانند مصرف آب و مواد غذایی، مصرف انرژی، میزان ساخت‌وساز، میزان نابودی جنگل و درختان و میزان تولید زباله است.

جدول ۸- نتایج FMEA فازی برای پیامدها و اثرهای ریسک‌ها در کل مجتمع برای HSE

Table 8. Fuzzy FMEA results for the consequences and effects of risks for HSE in the entire complex

حالت خرابی Failure modes	معیار Criteria	اثرات بالقوه خرابی Potential failure effects	احتمال Probability	شدت Severity	کشف Detection	خروجی FMEA فازی Fuzzy FMEA output	
FM1	بهداشت و سلامتی (Health)	آلودگی صوتی (Noise Pollution)	9	7	3	H	0/75
FM2		غبار (Dust)	8	5	6	M	0/5
FM3		تماس با گازها (Contact with gases)	5	6	7	M	0/395
FM4		تماس با سطح‌های داغ (Contact hot surfaces)	7	7	4	H	0/613
FM5		خفگی (asphyxiation)	6	8	6	L	0/375
FM6	ایمنی (Safety)	سقوط از ارتفاع (Fall from height)	9	7	5	H	0/75
FM7		انفجار (Explosion)	6	8	7	L	0/375
FM8		آتش‌سوزی (fire)	9	5	7	M	0/5
FM9		نشتی گازها (Gas leaks)	10	6	7	M	0/5
FM10		برق‌گرفتگی (electrocution)	6	8	6	L	0/375
FM11	محیط‌زیست (Environmental)	آلودگی هوا (air pollution)	9	6	8	M	0/5
FM12		آلودگی خاک (Soil pollution)	7	5	4	M	0/5
FM13		آلودگی آب (water pollution)	6	5	7	L	0/375
FM14		تحلیل منابع (Reduce resources)	7	6	۴	H	0/613
FM15		افزایش ردپای اکولوژیک (Increasing ecological footprint)	5	6	8	L	0/387

امروزه صنعت‌ها و شرکت‌های تولیدی به‌ویژه صنایع پتروشیمی در محیط پیچیده و متغیری فعالیت می‌کنند در چنین شرایطی برای رسیدن به هدف‌های خود ممکن است ریسک‌هایی را بر روی محیط‌زیست از خود بر جای بگذارند. بدین منظور رسیدن به هدف‌های خود در کنار کاهش تأثیرهای نامطلوب بر روی محیط‌زیست و مدیریت چنین ریسک‌هایی در راستای توسعه پایدار از اهمیت زیادی برخوردار است. روش FMEA یک روش تحلیلی در ارزیابی ریسک است که بر اساس شناسایی و امتیازدهی به خطرهای بالقوه موجود در محدوده‌ای که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌شود، به‌کار می‌رود. همان‌طور که پیشتر بیان شد در ارزیابی ریسک به روش FMEA، سه مشکل اساسی به ترتیب شامل ۱- در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از شاخص‌های ریسک (شدت، احتمال و کشف)، ۲- بیان امتیاز هر یک از حالت‌های نقص در مقابل شاخص‌های ریسک به صورت عددی (بین ۱ تا ۱۰) و ۳- اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس عدد RPN، است که در برخی از مواقع ممکن است این اعداد با هم یکسان بوده و یا در صورت داشتن فاصله کم از یکدیگر، اولویت‌بندی ریسک‌ها با مشکل مواجه شود. برای بر طرف کردن مشکل عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرهای متخصصان) از تابع‌های عضویت فازی مثلثی بهره گرفته شده است. با توجه به اینکه در روش FMEA فازی اعداد اولویت ریسک (RPN) در بازه‌ی بین صفر و یک است بنابراین مشکل اولویت‌بندی ریسک‌ها تا حدودی رفع خواهد شد. در رابطه با وزن‌های یکسان شاخص‌های شدت، احتمال و کشف باید اقرار کرد که اگرچه در ریسک‌های بهداشتی و ایمنی در صنایع وزن هر کدام از عامل‌ها می‌تواند متفاوت باشد اما با عنایت به اینکه در ریسک‌های محیط زیستی که دارای گستره بزرگ‌تر و دوره اثرگذاری طولانی‌تری هستند، در این تحقیق با توجه به نظر خبرگان و کارشناسان وزن‌های هر سه شاخص ریسک یکسان در نظر گرفته شد. در این تحقیق ابتدا با شناخت دقیق فرآیندها در پتروشیمی کرمانشاه اقدام به شناسایی ریسک‌ها و سپس امتیازدهی و ارزیابی آن‌ها با استفاده از روش FMEA سنتی گردید. در بخش اول این تحقیق برای نمایش اولویت ریسک‌های شناسایی شده از نمودار پارتو استفاده شده است. که فراوانی دو علت بالقوه یعنی نقص در سیستم و اتصال‌ها و لود نامناسب روغن و جمع‌آوری نکردن به موقع شبکه‌ها عامل حدود ۷۰ درصد از ریسک‌های محیط زیستی است. این نشان می‌دهد که با تمرکز بر ۳۰ درصد از علل بالقوه می‌توان ۷۰ درصد ریسک‌های محیط زیستی را بر طرف کرد. همچنین در این تحقیق به‌منظور ارزیابی کاهش عدم قطعیت در ارزیابی ریسک به روش FMEA سنتی، از روش فازی برای ارزیابی ریسک‌ها استفاده شد. در بخش محیط زیستی اثرهای بالقوه‌ی آلودگی هوا، خاک، آب، تحلیل منابع و ردپای اکولوژیک مورد امتیازدهی و ارزیابی ریسک قرار گرفته است. نتایج ارزیابی ریسک به روش FMEA فازی نشان می‌دهد که بالاترین عدد اولویت فازی در این بخش مربوط به FM14 با اثر بالقوه تحلیل و اتلاف منابع اکولوژیکی با عدد فازی ۰/۶۱۳ است. در این بخش، ریسک افزایش ردپای اکولوژیک نیز مورد بررسی قرار گرفته که این مفهوم مربوط به تحلیل میزان جای پای اکولوژیکی یک سیستم بر اساس ۵ پارامتر قابل محاسبه بر اساس هکتار جهانی مانند مصرف آب و مواد غذایی، مصرف انرژی، میزان ساخت‌وساز، میزان نابودی جنگل و درختان و میزان تولید زباله است. در ارزیابی ریسک به روش فازی امتیازهای اختصاص یافته به ریسک‌های محیط زیستی در بازه بین صفر و یک است و تا حدودی از امتیازهای تکراری برای ریسک‌ها جلوگیری می‌شود. اگرچه از حیث موضوع مورد بررسی یعنی ریسک‌های محیط زیستی پژوهش‌های مشابهی که به‌طور کامل منطبق بر موضوع این تحقیق باشد صورت نگرفته است لیکن از جنبه روش‌شناسی و مقایسه با روش FMEA سنتی، این تحقیق هم سو با نتیجه بررسی‌های (Liu *et al.*, 2012؛ Chin *et*

Jozi *et al*., 2011 و Shariati, 2014 ،*al*., 2008) است. به‌گونه‌ای که در این تحقیق‌ها به فراخور موضوع‌های بررسی شده توانمندی رویکرد فازی نسبت به رویکرد سنتی در روش FMEA در اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری برای مدیریت ریسک‌ها مورد تایید و تأکید قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

در کاربردهای دنیای واقعی، تصمیم گیران یا اعضای تیم FMEA نمی‌توانند دقت ارزیابی‌شان را با ارزش‌های عددی بیان کنند و ارزیابی‌ها به‌طور معمول بر اساس متغیرهای زبانی بیان می‌شوند. FMEA برای بالا بردن قابلیت اطمینان تولید و پایداری فرآیندها استفاده می‌شود و به تابع‌های کاربردپذیر نیاز دارد و قابلیت نشان دادن وزن، اهمیت نسبی برای شاخص‌های ریسک مانند احتمال، شدت و کشف را ندارد. بنابراین روش فازی به عنوان یک روش انعطاف‌پذیر برای حل چنین نقطه ضعف‌های پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد FMEA فازی می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای رویکرد سنتی FMEA در مواقع نیاز به بیان نتایج، با دقت بیشتر باشد. به عنوان نتیجه‌گیری کلی از ارزیابی ریسک انجام گرفته در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه می‌توان اظهار داشت که ریسک‌ها و اثرهای محیط زیستی به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر صنایع و سیستم‌های بزرگ مانند صنایع نفتی و پتروشیمی باید همانند ریسک‌های مالی و ریسک‌های جانی موردتوجه و مدیریت قرار گیرند. همچنین در صنایع بزرگ استفاده از چنین روش‌هایی از این نظر که ریسک‌ها را از نقطه شروع و امکان بالقوه آن‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهد می‌تواند در شناسایی و مدیریت ریسک‌ها بسیار مؤثر و مفید باشد.

بر اساس نتایج این تحقیق، به برخی از مهمترین پیشنهادها در ادامه اشاره می‌شود:

- در بررسی‌های آتی در زمینه‌ی ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی از رویکرد فازی به عنوان یک ابزار قدرتمند در کمی سازی نظرهای خبرگان استفاده شود.
- استفاده از نمودار پارتو برای ترسیم تصویری بهتر برای تصمیم‌گیران و مدیران به‌منظور مدیریت ریسک‌ها
- مستندسازی ریسک‌های محیط زیستی برای تحلیل‌های بلندمدت و پایش ریسک‌ها تا زمان حذف آن‌ها
- یکی از مهمترین راهکارهای مدیریت ریسک‌های محیط زیستی، آموزش و فرهنگ‌سازی تأثیرها و پیامدهای ریسک‌های محیط زیستی در بین کارکنان و مدیران شرکت‌ها و صنایع بزرگ است بنابراین پیشنهاد می‌شود که در شرکت صنایع پتروشیمی کرمانشاه نیز به این موضوع توجه شود و آموزش و فرهنگ‌سازی مناسب انجام گیرد.
- یکی از نکاتی که در این تحقیق موردتوجه است در نظر گرفتن وزن شاخص‌های شدت، احتمال و کشف برای محاسبه RPN هاست، پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های آینده نسبت به وزن دهی مناسب و منطقی به این شاخص‌ها برای ارزیابی ریسک با روش FMEA اقدام شود.

سپاس‌گزاری

این تحقیق از حمایت مالی شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران برخوردار شده است. مؤلفان از همکاری مؤثر رئیس واحد HSE مجتمع پتروشیمی کرمانشاه مهندس محمد سعید پور سلیمان و همچنین کارشناسان آقایان ناصر پورسیاه و هادی محمدی و کلیه پرسنل محترم واحد HSE و دیگر واحدهای شرکت صنایع پتروشیمی کرمانشاه، که در انجام این تحقیق ما را یاری کردند، سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1 Flixborough
2 Bhopal
3 Mexico city
4 British Petroleum
5 Kellogg
6 Process Flow Diagram (PFD)

7 Piping and Instrument Diagram (P&ID)
8 Walking-Talking Through
9 Mamdani
10 Center of Gravity
11 linguistic terms
12 If- Then…?
13 Takagi-Sugeno
14 Fuzification
15 Defuzification
16 Pool condanser
17 suction compressor

۱۸ منظور از Operating manual در این تحقیق فعالیت بر طبق دستورالعمل‌های بازنگری شده و بهینه‌ی هر کدام از تجهیزات و ابزارهای صنعتی می‌باشد.

19 Oily water
20 activated methyldiethanolamine
21 shut down
22 Parto theory
23 evidence theory
24 grey theory
25 Rough Set Theory
26 Ecological Footprint

منابع

Bowles, J.B. and Pelaez, C.E., 1995. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. Reliability Engineering and System Safety. 50(2), 203–213.

Bozdag, E., Asan, U., Soyer, A. and Serdarasan, S., 2015. Risk prioritization in failure mode and effects analysis using interval type-2 fuzzy sets. Expert Systems with Applications. 42(8), 4000–4015.

Chang, C.L., Liu, P.H. and Wei, C.C., 2001. Failure mode and effects analysis using grey theory. Integrated Manufacturing Systems. 12, 211–216.

Chen, Y.S., Chong, P.P. and Tong, M.Y., 1994. Mathematical and computer modelling of the pareto principle. Mathematical and Computer Modelling. 19(9), 61-80.

Chen, Zh., Wu, X. and Qin, J., 2014. Risk assessment of an oxygen-enhanced combustor using a structural model based on the FMEA and fuzzy fault tree. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 32, 349- 357.

Chin, K.S. Chan, A. and Yang, J.B., 2008. Development of a fuzzy FMEA based product design system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 36, 633-649.

Deshpande, A., 2011. Fuzzy fault tree analysis: revisited. International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2(1), 3–13.

Health and Safety Executive, 2016. Understanding the task. http://www.hse.gov.uk/humanfactors/resources/understanding-the-task.pdf.

Jozi, S.A., Farbod, Sh., Arjmandi, R. and Noori, J., 2013. Environmental risk assessment and management of the utility plant of the 15 and 16 phases in the south pars area using efmea method. Journal of Environmental Researches. 4(2), 135- 147.

Jozi, S.A., Goleiji, N. and Mohammadfam, I., 2011. Environmental risk assessment and management of the Olefin Plant inArya Sasol Petrochemical Complex usingEFMEA method. Journal of Sciences and Techniques in Natural Resources. 6(4), 147- 159.

Khasha, R., Sepehri, M.M., Khatibi, T. and Soroosh, A.R., 2013. Application of fuzzy FMEA to workflow improve in the operating room. Journal of Industrial Engineering. 47(2), 135-147.

Khodaee, R. and Roghanian, E., 2012. The new model for risk assessment projects, Monthly Oil & Energy, 7(66), 52-71.

Liu, H.C., Liu, L. and Lin, Q.L., 2013. Fuzzy failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and belief rule-based

methodology. IEEE Transactions on Reliability. 62, 23–36.

Liu, H.C., Liu. L., Liu, N. and Mao. L.X., 2012. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended vikor method under fuzzy environment. Expert Systems with Applications. 39, 12926–12934.

Liu, Y., Fan, Z.P., Yuan, Y. and Li, H., 2014. A FTA-based method for risk decision-making in emergency response. Journal of Computers and Operations Research. 42, 49-57.

Morris, P. and Therivel, R., 2005. Methods of environmental impact assessment: Part II; Brookes. An environmental risk assessment and risk management. Second Edition. Spon Press. Taylor and Francis. London. 492 pp.

Nadal, M., Schuhmacher, M. and Domingo, J.L., 2004. Metal Pollution of Soils and Vegetation in an Area with Petrochemical Industry. Science of the Total Environment. 321, 59–69.

Nivolianitou, Zoe, Risk analysis and risk management: a European insight, Law, Probability and Risk, 2002, I <https://doi.org/10.1093/lpr/1.2.161>

Omidvar, M. and Nirumand, F., 2017. Risk assessment using FMEA method and on the basis of MCDM, fuzzy logic and grey theory: A case study of overhead cranes. Journal of Health and Safety at Work. 1(7), 63-77.

Ricci, P.F., 2006. Environmental and health risk assessment and management principles and practices. Springer. Netherland.479 pp.

Riplova. K., 2007. Tool of risk management: failure mode and effects analysis and failure modes, effects and criticality analysis. Journal of Information, Control and Management Systems. 5(1), 111-120.

Roghanian, E. and Mojibian, F., 2015. Using fuzzy FMEA and fuzzy logic in project risk management. Iranian Journal of Management Studies (Ijms). 8(3), 373-395.

Shahriar, A., Sadiq, R. and Tesfamariam, S., 2012. Risk analysis for oil & gas pipelines: a sustainability assessment approach using fuzzy based Bow-Tie analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 25, 505-523.

Shao, C.,Yang, J., Tian, X., Ju, M. and Huang, L., 2013. Integrated environmental risk assessment and whole-process management system in chemical industry parks. International Journal of Environmental Research and Public Health. 10, 1609-1630.

Shariati, Sh., 2014. Underground mine risk assessment by using FMEA in the presence of uncertainty. Decision Science Letters. 3, 295- 304.

Song, W., Ming, X., Wu, Z. and Zhu, B., 2014. A rough topsis approach for failure mode and effects analysis in uncertain environments. Quality and Reliability Engineering International. 30, 473–486.

Tarr, M.A., 2003. Chemical degradation methods for wastes and pollutants, environmental and industrial applications. Marcel Dekker, Inc. New York Rasel.

Teoh, Ping Chow & Case, Keith. (2004). Failure modes and effects analysis through knowledge modeling. Journal of Materials Processing Technology. 153. 253-260. 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.298.

Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O. and Gaston, D., 2002. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the

Process Industries. 15, 291–303.

Yang, J., Huang, H.Z., He, L.P., Zhu, S.P. and Wen, D., 2011. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster–Shafer evidence theory under uncertainty. Engineering Failure Analysis. 18, 2084–2092.

Yang, Z. and Wang, J., 2015. Use of fuzzy risk assessment in FMEA of offshore engineering systems. Ocean Engineering. 95. 195-204.

Zade, L.A. (1965). Fuzzy Sets. Information and Control. 8. 338-353.

Zhang, Z. and Chu, X., 2011. Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. Expert Systems with Applications. 38, 206–214.

Website of Kermanshah Petrochemical Industries Company, KPIC.ir /2014. September/. https://www.kpic.ir/

Environmental Sciences Vol.16 / No.3 / Autumn 2018

1-24

Environmental risk assessment of Kermanshah petrochemical complex using FMEA method

Sajjad Bahrami[1*], Ahad Sotoudeh[1], Naser Jamshidi[2] and Mohammad Reza Elmi[1]

[1] Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

[2] HSE Training Planning and Performance Assessment Manager, National Petrochemical Company, Tehran, Iran

Received: 2017.02.16 **Accepted:** 2017.10.09

Bahrami, S., Sotoudeh, A., Jamshidi, N. and Elmi, M.R., 2018. Environmental risk assessment of Kermanshah petrochemical complex using FMEA method. Environmental Sciences. 16 (3), 1-24.

Introduction: Development of various industries, despite providing human welfare, has potential risks for mankind. Due to its extensive operations and activity and also the potential risk for humans and the environment, the petrochemical industry is considered a high-risk industry. The purpose of this study was to assess and prioritize the risks resulting from process activities in Kermanshah petrochemical complex using two approaches (i.e., the traditional and fuzzy FMEA method).

Material and methods: The present study was an analytical-field research that has been conducted in Kermanshah petrochemical complex for 10 months. In this study, the product lines (urea and ammonia) were investigated and also a team of five experts was formed. In addition, an initial list of the most important risks and hazards in the environmental field was prepared and then, by using Brainstorming and Delphi Technique, the list was corrected. Finally, environmental risk assessment in the form of traditional and fuzzy FMEA methods was evaluated.

Results and discussion: According to the results, 38 risks were identified by traditional FMEA. The highest priority risk was related to hydrogen and ammonia gas emissions when the ammonia unit was out of service by RPN number of 491. The lowest priority risk belonged to ammonia effluents by RPN number of 28. Also, the highest risks to air pollution, as well as the causes of the risks were related to defects in the system and connections. The results of input fuzzification and output FMEA method showed that among the 15 identified risks in the petrochemical complex, the highest number of fuzzy priority in the health section was related to noise pollution (0.75), in the safety section was falling from the heights (0.75), and in the environmental sector for the reduction of ecological resources (0.613).

[*] Corresponding Author. *E-mail Address*: s.bahrami98@gmail.com

Conclusion: Comparing these two approaches suggest that the traditional FMEA is powerful in the early stages of risk assessment process, and on the other hand, the fuzzy approach is more flexible and user-friendly in the stage of prioritizing the risks.

Keywords: Risk assessment, Environment, fuzzy- FMEA, Kermanshah Petrochemical.