مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
مقاله پژوهشی
دوره ۲، شماره ۴، زمستان ۹۴

جدول ارزیابی ایمنی مخازن شارژ آمونیاک با استفاده از روش آنالیز لایه‌های حفاظتی فازی

محسن امیدوار [۱،*]، فرشته نیرومند [۲]

[۱] دکتری مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲] کارشناس مهندسی محیط زیست، گرایش کنترل آلاینده‌ها، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران

* **نویسنده مسئول:** محسن امیدوار، دکتری مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. ایمیل: m-omidvar@razi.tums.ac.ir

DOI: 10.21859/johe-02043

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۹/۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

واژگان کلیدی:
آنالیز لایه‌های حفاظتی
ریسک
مجموعه‌های فازی
شدت
احتمال
امکان فازی

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

مقدمه: ارزیابی ریسک فرایندهای خطرناک یکی از اولویت‌های مدیریت ریسک می‌باشد. یکی از روش‌های مورد استفاده در ارزیابی ریسک، آنالیز لایه‌های حفاظتی (LOPA) است. به دلیل ناکافی بودن و یا عدم قطعیت اطلاعات موجود در مورد نرخ نقص (PFD) لایه‌های حفاظتی، ارزیابی ریسک به روش سنتی LOPA همواره دارای خطا می‌باشد. لذا هدف از این مطالعه، استفاده ازتئوری فازی جهت ارزیابی ایمنی مخازن شارژ آمونیاک با استفاده از روش آنالیز لایه‌های حفاظتی می‌باشد.

روش‌کار: ابتدا با استفاده از نظر متخصصین، نرخ نقص لایه‌های حفاظتی به صورت فازی بدست آمد. سپس با استفاده از عملگرهای فازی، امکان فازی به احتمال فازی تبدیل شده و در نهایت به نرخ نقص قطعی تبدیل شد. در مرحله بعد با استفاده از سیستم منطق فازی شدت، شدت رویداد به صورت فازی محاسبه شده و در انتها با استفاده از ماتریس ریسک، شاخص ریسک فازی محاسبه گردید.

یافته‌ها: در سناریوی آزاد شدن آمونیاک، شدت، احتمال و ریسک محاسبه شده با روش کلاسیک و فازی LOPA به ترتیب برابر با (احتمال: کم، شدت: بالا، و ریسک: (قابل تحمل- غیر قابل قبول)) در روش کلاسیک و احتمال فازی = ۲/۶۶، شدت فازی= ۳/۹۹ و ریسک فازی = ۳/۷۹ (۰/۸ غیر قابل قبول، ۰/۲ قابل تحمل- غیر قابل قبول) در روش فازی تعیین گردید. هم چنین پس از اضافه شدن لایه حفاظتی، شاخص ریسک فازی از ۳/۷۹ (۰/۸ غیر قابل قبول، ۰/۲ قابل تحمل- غیر قابل قبول) به ۱/۹ (۰/۱ قابل قبول، ۰/۸ قابل قبول- قابل تحمل، ۰/۱ قابل تحمل) تغییر یافت.

نتیجه‌گیری: در شرایط عدم قطعیت و یا موجود نبودن اطلاعات مربوط به احتمال و شدت سناریوی ریسک، می‌توان با استفاده از نظرات متخصصین در قالب متغیرهای زبانی و روابط مجموعه‌های فازی، تا حد امکان خطای محاسباتی را در ارزیابی ریسک کاهش داد.

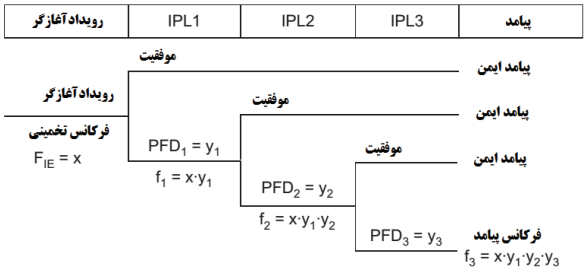
مقدمه

پیشگیری از حوادث و رویدادهای نامطلوب که به صورت اتفاقی در طول فعالیت فرایندهای صنعتی و یا کار با مواد شیمیایی خطرناک اتفاق می‌افتد، مستلزم ارزیابی ریسک می‌باشند. در طی فرایند ارزیابی ریسک اصولاً دو متغیر احتمال و شدت رویداد نامطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. به طور کلی سه روش کلی (کیفی، نیمه کمی و کمی) جهت ارزیابی ریسک به کار می‌رود. یکی از این روش‌ها آنالیز لایه‌های حفاظتی فازی (LOPA) می‌باشد، که به طور گسترده‌ای در فرایندهای شیمیایی جهت اختصاص سطح یکپارچگی ایمنی (SIL) مناسب به کار برده می‌شود. LOPA یک روش سیستماتیک و نظام یافته جهت شناسایی و تجزیه و تحلیل اهمیت سناریوی حوادث بزرگ بالقوه، در فراوری و یا حمل و نقل مواد شیمیایی بسیار خطرناک می‌باشد [۱] استفاده از LOPA به عنوان یک روش آنالیز ریسک در صنایع شیمیایی در اواخر دهه ۱۹۹۰ آغاز شد. صنایع Arthur Dowell [۲, ۳] و William Bridges [۴] جزء اولین صنایعی بودند که اولین بار از این روش به عنوان ابزاری جهت تجزیه و تحلیل سیستم‌های حفاظتی ایمنی مستقل، بدون نیاز به سطح بالایی از آنالیز کمی، استفاده نمودند. با فراگیر شدن این روش در ایالات متحده و اروپا، مرکز ایمنی فرایندهای شیمیایی (CCPS) راهنماهای خود در زمینه استفاده از این روش را منتشر نمود [۵]. همچنین سایر سازمان‌ها و استانداردهای بین المللی نظیر کمیسیون الکتروتکنیکی بین‌المللی (IEC) [۶, ۷] و جامعه بین

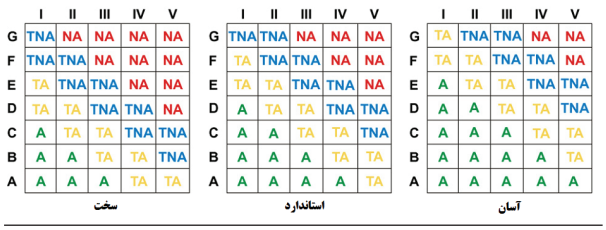
[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]
[DOI: 10.21859/johe-02043]

المللی اتوماسیون (ISA) [۸] شروع به پذیرش LOPA به عنوان روش مرجع جهت تعیین سطح یکپارچگی ایمنی (SIL) مورد نیاز سیستم‌های ابزار دقیق ایمنی (SIS: Safety Instrumented Systems) نمودند.

اصولاً LOPA یک سناریوی تک علتی- تک معلولی می‌باشد که در نتیجه نقص لایه‌های حفاظتی مستقل (IPL) بوجود می‌آید. محاسبه نرخ (فرکانس) وقوع پیامد (F) یک سناریوی خاص، بر اساس آنالیز درخت پیامد (ETA) می‌باشد که در تصویر ۱ نشان داده شده است. در نهایت، پس از محاسبه نرخ فرکانس و شدت وقوع پیامد، شاخص ریسک در چهار سطح ریسک (A: acceptable (قابل قبول)، TA: tolerable–acceptable (قابل قبول-قابل تحمل)، tolerable–unacceptable (قابل تحمل- غیر قابل قبول) و NA: unacceptable (غیر قابل قبول)) تعیین می‌گردد (تصویر ۲) [۹].



تصویر ۱: آنالیز درخت پیامد جهت تعیین فرکانس رویداد نامطلوب در روش آنالیز لایه‌های حفاظتی



تصویر ۲: ماتریس ریسک مورد استفاده جهت ارزیابی ریسک در LOPA (الف-سطح آسان ب- استاندارد ج- سختگیرانه)

اگر چه استفاده از ماتریس ریسک ساده بوده و جهت ارزیابی‌های شخصی (سوبژکتیو) مناسب می‌باشد، لیکن به دلیل عدم قطعیت داده‌های ورودی آن (شدت و احتمال) همواره در کاربرد آن ممکن است خطاهایی را ایجاد نمایند، که استفاده از مجموعه‌های فازی می‌تواند این مشکل را مرتفع سازد.

منطق فازی، روشی متفاوت را برای مسائلی فراهم می‌آورد که پیچیدگی زیاد داشته و نیاز به کنترل دقیق دارند. به‌کارگیری منطق فازی، ساده بوده و قادر است مسائل پیچیده‌ای را که با روش‌های معمولی ریاضی حل نمی‌شوند، به سادگی و در زمانی کمتر حل کنند. این منطق، همانند دانش فرد خبره، عمل می‌کند. نظریه مجموعه‌های فازی برای اقدام در شرایط عدم اطمینان طراحی شده و این کار را با استفاده از متغیرهای زبانی و عادی روزمره انجام می‌دهد که می‌توان با کمک آنها مسائل و متغیرهای کیفی را کمی کرده و مورد ارزیابی قرار داد. بنابراین، منطق فازی منطقی مناسب برای مبحث مدیریت ریسک می‌باشد که در بیشتر مواقع با متغیرهای کیفی و عدم قطعیت سروکار دارند. مشکلی که در ارزیابی پیامد رخدادها بر اساس ماتریس ریسک وجود دارد این است که معمولاً در ارزیابی‌ها بدترین سناریو (بدترین حالت) مبنای ارزیابی قرار می‌گیرد. این موضوع اگر چه از یک سو باعث افزایش سطح ایمنی می‌گردد، لیکن از سوی دیگر به دلیل به کارگیری لایه‌های حفاظتی بیشتر باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. همچنین در ماتریس ریسک حرکت از یک سلول ماتریس ریسک به سلول دیگر به صورت ناگهانی صورت گرفته و محدوده مقادیر بین دو سلول با شیب تند تعریف شده‌اند. به عنوان مثال در تصویر ۲ (الف)، در صورتی که سطح احتمال برابر IV و سطح شدت برابر D باشد، سطح ریسک معادل TNA (قابل تحمل) برآورد می‌گردد. این در حالی است که اگر سطح احتمال برابر IV و سطح شدت برابر E باشد (یک سطح تغییر در شدت)، سطح ریسک معادل NA (غیر قابل تحمل) می‌گردد. سئوالی که پیش می‌آید این است که ریسک را باید قابل تحمل و یا غیر قابل تحمل در نظر گرفت. اگر سطح ریسک، قابل تحمل در نظر گرفته شود از یک سو هزینه‌ها کاهش یافته ولی ازسوی دیگر سطح ایمنی نیز کاهش می‌یابد. همچنین اگر سطح ریسک، غیر قابل تحمل در نظر گرفته شود از یک سو هزینه‌ها افزایش یافته ولی ازسوی دیگر نیز سطح ایمنی افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل این است که مرز بین دو سطح ریسک با شیب تند تعریف شده‌اند. علاوه بر این در روش سنتی ارزیابی ریسک جمع نمودن نظرات افراد مختلف در قالب یک نظر کلی، به سهولت امکان پذیر نیست، به همین دلیل در اکثر ارزیابی‌ها بدترین سناریو به عنوان مبنای ارزیابی قرار می‌گیرد. مجموعه‌های فازی این مشکل را به بهترین نحو و بر اساس منطق تفکر انسانی حل می‌نمایند. بدین صورت که ابتدا یک سطح فازی (تغییر

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

تدریجی) بر اساس توابع عضویت فازی، برای ارزیابی ایجاد نموده و علاوه بر این مجموع نظرات را محاسبه نموده و در نهایت یک خروجی قابل اطمینان‌تر نسبت به روش‌های کلاسیک ارزیابی فراهم می‌کنند.

از سوی دیگر هر چند که به نظر می‌رسد LOPA دارای چندین مزیت است، لیکن برخی از مواقع، محدودیت‌هایی از قبیل در دسترس نبودن اطلاعات و یا عدم قطعیت نرخ نقص سیستم‌های حفاظتی را نیز دارا می‌باشد [۱۰]. لذا محدودیتهای فوق الذکر باعث شد که در این مطالعه از ویژگی مجموعه‌های فازی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده شود.

روش کار

در این مطالعه که در واحد انتقال آمونیاک یک مجتمع پتروشیمی انجام گرفت، جهت ارزیابی ریسک انتشار آمونیاک به هنگام انتقال به مخزن دریافت کننده، ابتدا احتمال وقوع رویداد آغازگر و نرخ نقص لایه حفاظتی با استفاده از مجموعه‌های فازی و نظرات متخصصین برآورد شده و سپس شدت رویداد نامطلوب تعیین گردیده و در انتها با استفاده از ماتریس ریسک فازی، شاخص ریسک تعیین می‌گردد. به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات مربوط به نرخ نقص و احتمال وقوع رویداد آغازگر، از نظرات یک تیم ۵ نفره متخصص فرایندی استفاده شد. نحوه میانگین گیری نظرات با استفاده از روش Hsu and Chen [۱۱] به شرح زیر می‌باشد:

گام اول: محاسبه مجموع امکانهای فازی بدست آمده

به صورت تحت الفظی، منظور از محاسبه مجموع امکان‌های فازی، عبارت است از جمع کردن نظرات متخصصین برای یک رویداد خاص. Hsu و Chen [۱۱] از یک روش ساده تحت عنوان "روش محاسبه مجموع بر اساس شباهت (Similarity Aggregation Method: SAM) برای این کار بهره گرفتند. فرض شود که هر متخصص (E_k $(k = 1, 2, \ldots, M)$ نظر خود را در مورد یک ویژگی خاص، در یک زمینه در قالب یک سری متغیرهای زبانی (جدول ۱) اعلام کند. این متغیرهای زبانی را می‌توان از طریق توابع عضویت به اعداد فازی معادل تبدیل نمود. جزئیات الگوریتم محاسباتی آن را می‌توان به شرح ذیل تشریح نمود.

۱. محاسبه درجه شباهت $S_{uv}(\widetilde{R}_u, \widetilde{R}_v)$: بر اساس این نگرش، اگر $\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ و $\widetilde{B} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ دو عدد فازی باشند، درجه شباهت بین دو عدد فازی را می‌توان از طریق تابع درجه شباهت (S)، به صورت زیر بدست آورد:

$$(\widetilde{A}, \widetilde{B}) = 1 - {}^1\!/_4 \sum_{i=1}^{4} |a_i - b_i| \qquad (۱)$$

۲. محاسبه درجه موافقت (Average Agreement: AA_{Eu}) نظرات متخصصین با استفاده از رابطه (۲)

$$AA(E_u) = \frac{1}{M-1} \sum_{u \neq v}^{M} S(\widetilde{R}_u, \widetilde{R}_v) \qquad (۲)$$

۳. محاسبه درجه موافقت نسبی (Relative Agreement degree) (RA_{Eu}) بین نظرات متخصصین با استفاده از رابطه (۳)

$$RA(E_u) = \frac{A(E_u)}{\sum_{u=1}^{M} A(E_u)} \qquad (۳)$$

۴. تخمین میزان ضریب توافق نظرات متخصصین (Consensus Coefficient degree: CC_{Eu}) با استفاده ازرابطه (۴)

$$CC(E_u) = \beta . w(E_u) + (-1\ \beta) . RA(E_u) \qquad (۴)$$

۵. محاسبه نتیجه مجموع نظرات متخصصین (R_{AG}) با استفاده ازرابطه (۵)

جدول ۱: اصطلاحات زبانی مورد استفاده جهت طراحی توابع عضویت احتمال فازی

اصطلاح زبانی	نماد	A	B	δ	γ
خیلی بالا	VH	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۱
بالا	H	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۹
نسبتاً بالا	FH	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
متوسط	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶
نسبتاً پایین	FL	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
پایین	L	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳
خیلی پایین	VL	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۲

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

(۵)

$$\widetilde{R}_{AG} = C(E_1).\widetilde{R}_1 + C(E_2).\widetilde{R}_2 + \ldots + C(E_m).\widetilde{R}_m$$

گام دوم: تبدیل امکان فازی به احتمال فازی

در مورد خطاهای سخت افزاری (نظیر نرخ نقص تجهیزات)، Onisawa جهت تعیین نرخ خطا، یک معادله برای تبدیل امکان فازی به احتمال فازی پیشنهاد داد [۱۲, ۱۳] این معادله بر اساس تناسب پاسخ احساسی انسان به مقادیر لگاریتمی یک کمیت فیزیکی می‌باشد. (رابطه ۶).

(۶)

$$pr = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, FP_s \neq 0 \\ 0, FPs = 0 \\ K = \left[\frac{1-FPs}{FPs}\right]^{1/3} * 2.301 \end{cases}$$

گام سوم: اعمال محاسبات ریاضی حسابی بر روی اعداد فازی

یک عدد فازی ذوزنقه‌ای $\widetilde{A} = (\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۷):

(۷)

$$\mu_{\widetilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \left(\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & \beta \leq x \leq \gamma \\ \left(\frac{\delta-x}{\delta-\gamma}\right) & \gamma \leq x \leq \delta \\ 0 & x > \delta \end{cases}$$

در صورتی که دو عدد فازی ذوزنقه‌ای $\widetilde{A} = (a1, a2, a3, a4)$ و $\widetilde{B} = (b1, b2, b3, b4)$ داشته باشیم نتیجه اعمال محاسبات ریاضی حسابی بر روی $\widetilde{A}$ و $\widetilde{B}$ به صورت زیر می‌باشد [۱۱] (جدول ۲):

گام چهارم: غیر فازی سازی (Deffuzification)

فرایند تبدیل اعداد فازی به اعداد معمولی (مطلق)، غیر فازی سازی نامیده می‌شود. در مقالات روشهای متعددی نظیر Center of Gravity (COG)، Right Most Maximum (RMM)، Left Most Maximum (LMM) برای غیر فازی سازی ذکر شده‌اند [۱۵]. در این مطالعه از روش مرکز ثقل (COG) استفاده شده است. در صورتی که $\widetilde{A} = (s_-, q_-, s_+, q_+)$ یک عدد TPFN باشد، با استفاده ازروش مرکز ثقل می‌توان، عدد معادل غیر فازی این TPFN را از معادله زیر بدست آورد [۱۴]:

(۸)

$$defuzz_{(A)} = \frac{(-s_- * q_-) + (s_+ * q_+) + \frac{1}{3}(q_+ - s_+)^2 - \frac{1}{3}(q_- - s_-)^2}{-s_- - q_- + s_+ + q_+}$$

پس از به دست آوردن احتمال فازی مربوط به احتمال رویداد آغازگر و نرخ نقص لایه‌های حفاظتی با استفاده از نظر متخصصین، احتمال رویداد نهایی را بایستی تعیین نمود. معادله ریاضیاتی برای تعیین احتمال رویداد نهایی بر اساس نرخ نقص لایه‌های حفاظتی در LOPA را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۱۵]:

(۹)

$$fi_C = IEF_i \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \ldots \times PFD_{ij}$$

در معادله فوق، fi_c، IEF، PFD به ترتیب نمایانگر فرکانس وقوع سناریوی i ام (بر حسب تعداد در سال و یا در ساعت)، فرکانس وقوع رویداد آغازگر برای سناریوی i ام و احتمال نقص در زمان تقاضای لایه مستقل حفاظتی j ام برای سناریوی i ام می‌باشد.

با در دست داشتن احتمال و شدت پیامد نامطلوب و با استفاده از ماتریس ریسک و شاخص ریسک فازی، می‌توان در مورد ریسک ارزیابی شده، تصمیم گیری نمود.

آنالیز لایه‌های حفاظتی فازی (FLOPA)

FLOPA بر مبنای ساختار سیستم منطق فازی (FLS) عمل می‌کند، که از سه جزء شدت، فرکانس و ریسک فازی تشکیل شده است. ساختار اصلی FLS در تصویر ۳ نشان داده شده است. سیستم منطق فازی (FLS) از اجزاء زیر تشکیل شده است:

۱. بخش فازی کننده که متغیرهای مطلق (غیرفازی) ورودی (فرکانس (F)، شدت (S)) و خروجی سیستم

جدول ۲: عملگرهای فازی

عملگر	نتیجه
جمع	$\widetilde{A} \oplus \widetilde{B} = [a+1\ b1, a+2\ b2, a+3\ b3, a+4\ b4]$
تفرق	$\widetilde{A} \ominus \widetilde{B} = [a-1\ b1, a-2\ b2, a-3\ b3, a-4\ b4]$
ضرب	$\widetilde{A} \otimes \widetilde{B} = [a1.b1, a2.b2, a3.b3, a4.b4]$
تقسیم	$\widetilde{A} \oslash \widetilde{B} = [a1/b1, a2/b2, a3/b3, , a4/b4]$

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

(سطوح ریسک (R)) را به اعداد فازی تبدیل می‌کند ($\tilde{F}, \tilde{S}, \tilde{R}$). یک نمونه ازمجموعه های فازی که نشان دهنده F، S و R می‌باشد در تصویر ۴ نشان داده شده است.

۲. موتور استنباطی FLS که مجموعه‌های فازی ورودی را از طریق بخش دانش بنیان به مجموعه‌های فازی خروجی تبدیل می‌کند. این کار از طریق قواعد "اگر- بنابراین – درغیراین صورت" که بر پایه دانش فردی (برای شدت و شاخص ریسک) و یا محاسبات ریاضیاتی برای یک عملیات خاص (در بخش محاسبه درخت خطا) می‌باشند، صورت می‌گیرد.

۳. بخش غیرفازی کننده که فرایند وزن دهی و متوسط‌گیری خروجی تمام قواعد فازی را انجام داده و آن را به صورت یک عدد خروجی غیرفازی، مطلق ارائه می‌کند.

روند کلی مدل محاسباتی آنالیز لایه‌های حفاظتی فازی در تصویر ۵ نشان داده شده است. فازی LOPA از یک سناریوی حادثه مشخص، که بوسیله یک جفت رخداد (رویداد آغازگر و پیامدهای ویژه این رویداد) نشان داده می‌شوند آغاز می‌شود. این سناریو را می‌توان به‌وسیله هر یک از روش‌های آنالیز مخاطرات فرایندی به خصوص Hazop بدست آورد. سیستم FLOPA دارای سه زیرسیستم اصلی می‌باشد: دو زیرسیستم موازی شامل سیستم منطق فازی فرکانس ((FLS (F)) جهت محاسبه فرکانس فازی سناریوی حادثه و سیستم منطق فازی شدت ((FLS (S)) جهت تخمین شدت فازی سناریوی حادثه (تصویر ۶). هر دوی این سیستم‌ها، ورودی لازم برای زیر سیستم سوم یعنی سیستم منطق فازی ریسک (FLS (R)) را فراهم می‌کنند (تصویر ۷). مقادیر استفاده شده جهت ترسیم توابع عضویت سه پارامتر اصلی FLOPA در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. با استفاده از عملیات ریاضی و استدلال فازی مناسب، عدد نهایی مطلق ریسک بدست می‌آید که می‌توان ازآن جهت تصمیم‌گیری در فرایند مدیریت ریسک استفاده نمود [۱۴, ۱۵].

سیستم منطق فازی شدت ((FLS (R)

جهت تعیین شدت آسیب، دو متغیر تعداد افراد آسیب دیده و میزان اقدامات درمانی موردنیاز به عنوان ورودی FL S (R) قرار گرفته و با توجه به ماتریس پذیرش ریسک IIAR's OSHA، شدت آسیب به عنوان خروجی سیستم استخراج گردید (جدول ۴).

جدول ۳: مجموعه‌های فازی مورد استفاده برای طراحی ماتریس ریسک

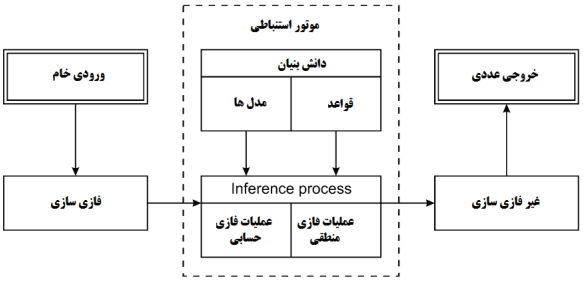
فرکانس (F)			شدت (S)			ریسک (R)		
طبقه	اصطلاح فازی	محدوده	طبقه	اصطلاح فازی	محدوده	طبقه	اصطلاح فازی	محدوده
G	خیلی بالا	$1 < F < 10^{-2}$	۵	قابل اغماض (فاقد خسارت)	$1 < C \leq 2$	A	قابل قبول- بدون نیاز به اقدام خاص	$0 < R \leq 2$
F	بالا	$10^{-1} \leq F < 10^{-3}$	۴	پایین (روز ازدست رفته کاری)	$2 < C \leq 3$	TA	قابل تحمل- قابل قبول (اقدام اصلاحی باتوجه به ALARP)	$1 < R \leq 3$
E	متوسط	$10^{-2} \leq F < 10^{-4}$	۳	متوسط (جراحت بدنی)	$3 < C \leq 4$	TNA	قابل تحمل- غیر قابل قبول (نیاز به بهبود)	$2 < R \leq 4$
D	پایین	$10^{-3} \leq F < 10^{-5}$	۲	بالا (معلولیت)	$3 < C \leq 5$	NA	غیر قابل قبول (اقدام آنی)	$3 < R \leq 5$
C	خیلی پایین	$10^{-4} \leq F < 10^{-6}$	۱	فاجعه بار (مرگ)	$C > 5$	-	-	-
B	غیر محتمل	$10^{-5} \leq F < 10^{-7}$	-	-	-	-	-	-
A	بعید	$F < 10^{-6}$	-	-	-	-	-	-

جدول ۴: قواعد مورد استفاده جهت طراحی سیستم منطق فازی شدت

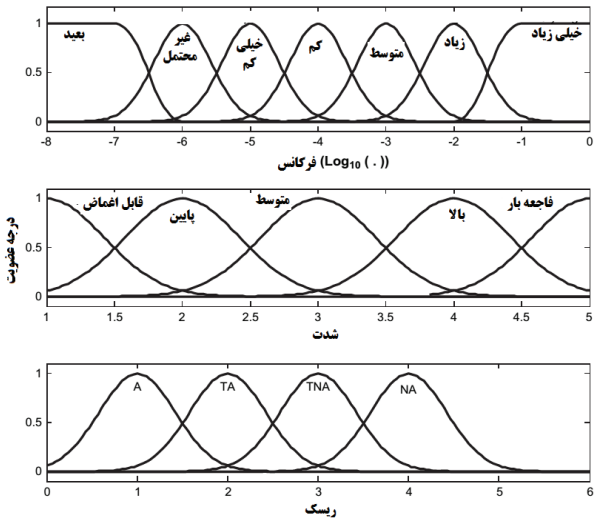
تعداد افراد آسیب دیده	میزان اقدامات درمانی موردنیاز		
	کمک‌های اولیه	اقدامات پزشکی	اقدامات پیشرفته
زیاد	متوسط	بالا	فاجعه بار
متوسط	متوسط	بالا	بالا
کم	پایین	متوسط	متوسط

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

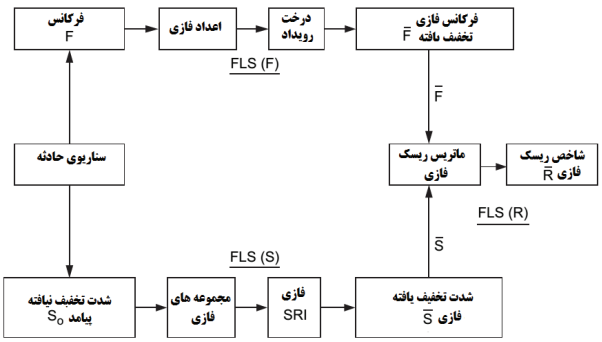
[DOI: 10.21859/johe-02043]



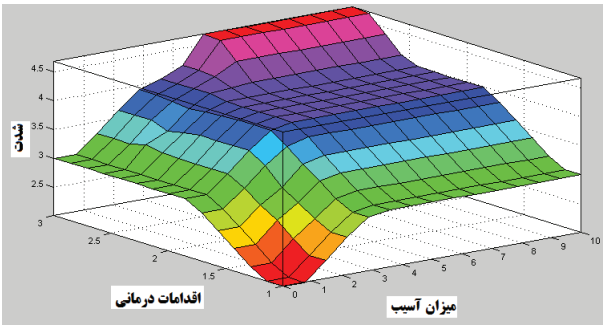
تصویر ۳: ساختار سیستم منطق فازی (FLS)



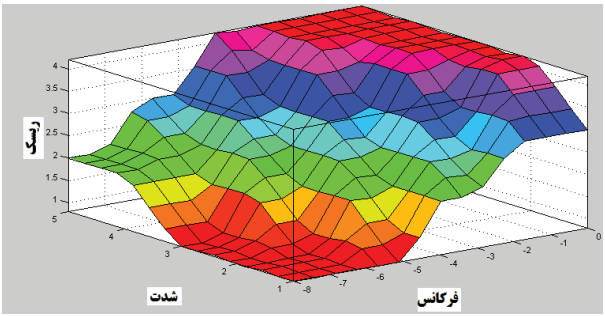
تصویر ۴: توابع عضویت مورد استفاده جهت فازی سازی فرکانس، شدت و ریسک



تصویر ۵: ساختار آنالیز لایه‌های حفاظتی فازی (FLOPA)



تصویر ۶: سطوح خروجی سیستم منطق فازی شدت FLS (S)



تصویر ۷: سطوح خروجی سیستم منطق فازی ریسک FLS (R)

یافته‌ها

در این مطالعه، سناریوی آزاد شدن آمونیاک در نتیجه پارگی شیلنگ شارژ مخزن و ناتوانی اپراتور در توقف فرایند مورد بررسی قرار گرفت. تنها IPL موجود در این سناریو، توقف عملیات شارژ مخزن توسط اپراتور می‌باشد که به دلیل متفاوت بودن PFDهای مربوط به این IPL، از نظر متخصصین استفاده شده است. با در دست داشتن نرخ نقص مربوط به توقف عملیات توسط اپراتور و احتمال پارگی شیلنگهای شارژ، با استفاده از رابطه ۹ می‌توان احتمال رخداد پیامد را تعیین نمود.

در نتیجه استنشاق آمونیاک و سوختگی شیمیایی ناشی از آن، پرسنل فعال در محل آزاد شدن آمونیاک شدیداً آسیب می‌بینند (سناریوی اصلی مورد مطالعه). هم چنین بسته به میزان محدود بودن مخزن دریافت کننده آمونیاک ریسک انفجار نیز وجود دارد. علاوه بر این آسیب‌های زیست محیطی نیز ایجاد می‌شود ولی میزان آسیب آن کمتر از آسیب به پرسنل می‌باشد. لذا در این مطالعه تنها ریسک مربوط به سلامتی افراد در نتیجه انتشار آمونیاک مورد بررسی قرار گرفته است.

جهت تعیین فرکانس رویداد رخداد آغازگر (پاره شدن شیلنگ) از ۵ نفر از متخصصین خواسته شد تا نظر خود را در مورد احتمال وقوع این رویداد بیان کنند. به منظور تعیین وزن و اهمیت نظر هر یک از متخصصین، ۴ پارامتر پست سازمانی، تجربه، تحصیلات، سن مبنا قرار گرفته و وزن هر متخصص در جدول ۵ نشان داده شده است.

شدت رویداد را می‌توان از طریق سیستم استنتاج فازی شدت ((FLS (S)) تعیین نمود (تصویر ۶). به دلیل مایع بودن آمونیاک، این حادثه، بیشتر پرسنل فعال در محل آزادشدن آمونیاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تعداد افراد صدمه دیده برابر ۳ نفر بوده و هم چنین سطح اقدامات درمانی مورد نیاز در حد مراقبت پزشکی می‌باشد. بنابراین شاخص شدت

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

تخمینی فازی برابر ۳/۹۹ بدست می‌آید. هم چنین با توجه به داده‌های جداول ۵ و ۶ فرکانس رخداد نامطلوب (آسیب پرسنل) به صورت زیر بدست می‌آید.

$fi_C = IEF_i \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \ldots \times PFD_{ij} = 3.37E - 01 \times 6.46E - 03 = 2.18E - 03$

ازآنجایی که مقیاس توابع عضویت مورد استفاده در سیستم فازی لگاریتمی می‌باشد، لذا بایستی ابتدا مقدار احتمال بدست آمده به صورت لگاریتمی تبدیل شود که برابر با ۲/۶۶ – بدست می اید. با وارد نمودن مقادیر فازی شدت و احتمال در سیستم FLS، سطح ریسک فازی برابر با ۳/۷۴ بدست می اید.

از آنجایی که ریسک در محدوده غیر قابل قبول می‌باشد، بنابراین بایستی از لایه‌های حفاظتی بیشتری استفاده شود. بدین منظور توصیه شد تا از یک هواکش صنعتی جهت تخلیه بخارات آمونیاک، در صورت نقص شیلنگ‌ها استفاده گردد. هم چنین تعداد پرسنل فعال در محدوده بارگیری به دو نفر محدود شده و توصیه گردید تا از لباس حفاظتی مخصوص استفاده کنند. از آنجایی که نرخ نقص هواکش برابر با PFD= 4E-3 بوده و میزان شدت حادثه، با پوشیدن لباس از ۳/۹۹ به ۲/۶ کاهش می‌یابد، لذا با محاسبه مجدد fi_c خواهیم داشت:

$fi_C = IEF_i \times PFD_{i۱} \times PFD_{i۲} \times \ldots \times PFD_{ij} = ۳,۳۷E - ۰۱ \times ۶,۴۶E - ۰۳ \times ۴\ E - ۳ = ۸,۷۱E - ۰۶$

با قرار دادن مقادیر فوق در سیستم استنتاج ریسک فازی، مقدار ریسک تغییر یافته به ۱/۹۲ کاهش می‌یابد که در سطح قابل قبول واقع می‌شود (جداول ۶-۱۰).

جدول ۵: مشخصات افراد متخصص جهت ارزیابی ریسک در سناریوی آزاد شدن آمونیاک در FLOPA

	E۵	E۴	E۳	E۲	E۱
پست سازمانی	۱	۳	۳	۳	۵
تجربه	۴	۴	۴	۵	۳
تحصیلات	۱	۳	۳	۳	۵
سن	۴	۲	۳	۳	۳
فاکتور وزنی	۱۰	۱۲	۱۳	۱۴	۱۶
امتیاز وزن دهی شده	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۵

جدول ۶: نظر متخصصین در مورد احتمال نرخ نقص پاره شدن شیلنگ شارژ مخزن آمونیاک

متخصص	رأی	α	β	δ	γ
E۱	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶
E۲	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶
E۳	FH	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
E۴	FH	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
E۵	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶

جدول ۷: نظر متخصصین در مورد احتمال نرخ نقص اپراتور در متوقف کردن فرایند

متخصص	رأی	α	β	δ	γ
E۱	L	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳
E۲	FL	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
E۳	L	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳
E۴	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶
E۵	M	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

جدول ۸: امکان فازی و احتمال غیرفازی شده در سناریوی پاره شدن شیلنگ شارژ مخزن آمونیاک

	مجموع امتیازات			
	A	B	Δ	Γ
CC(E1)*R1	۰/۰۶۳	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵	۰/۱۲۶
CC(E2)*R2	۰/۰۶۶۹	۰/۱۱۱۵	۰/۱۱۱۵	۰/۱۳۳۸
CC(E3)*R3	۰/۰۹۰۵	۰/۱۰۸۶	۰/۱۲۶۷	۰/۱۴۴۸
CC(E4)*R4	۰/۰۹۹	۰/۱۱۸۸	۰/۱۳۸۶	۰/۱۵۸۴
CC(E5)*R5	۰/۰۵۶۴	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	۰/۱۱۲۸
امکان فازی	۰/۳۷۵۸	۰/۵۳۷۹	۰/۵۷۵۸	۰/۶۷۵۸
امکان غیرفازی شده	۰/۵۳۷			
K	۲/۱۹			
احتمال غیرفازی شده	6/46E-03			

جدول ۹: امکان فازی و غیرفازی شده در سناریوی نقص اپراتور در متوقف کردن فرایند

	مجموع امتیازات			
	A	B	Δ	Γ
CC(E1)*R1	۰/۰۲۰۷	۰/۰۴۱۴	۰/۰۴۱۴	۰/۰۶۲۱
CC(E2)*R2	۰/۰۴۴۹	۰/۰۶۷۳۵	۰/۰۸۹۸	۰/۱۱۲۲۵
CC(E3)*R3	۰/۰۱۸۲	۰/۰۳۶۴	۰/۰۳۶۴	۰/۰۵۴۶
CC(E4)*R4	۰/۰۶۰۱۵	۰/۱۰۰۲۵	۰/۱۰۰۲۵	۰/۱۲۰۳
CC(E5)*R5	۰/۰۵۵۶۵	۰/۰۹۲۷۵	۰/۰۹۲۷۵	۰/۱۱۱۳
جمع فازی	۰/۱۹۹۶	۰/۳۳۸۱۵	۰/۳۶۰۶	۰/۴۶۰۵۵
جمع غیرفازی شده	3/37E-01			

جدول ۱۰: نتایج مقایسه ارزیابی ریسک بر مبنای فرکانس، شدت، و ریسک فازی و سنتی (کلاسیک) در سناریوی انتشار آمونیاک

	PFD پاره شدن شیلنگ	PFD نقص اپراتور در توقف فرایند	احتمال آزاد شدن آمونیاک	شدت رویداد	شاخص ریسک
روش سنتی	۵/۰۰E-۰۳	۱/۰۰E-۰۱	۵/۰۰E-۰۴ (کم)	زیاد	TNA
روش فازی (مقادیر ارزیابی اولیه)	۶/۴۶E-۰۳	۳/۳۷E-۰۱	۲/۱۸E-۰۳ (مقدار فازی ۲/۶۶-)	۳/۹۹	TNA ،۰/۸ NA) ۳/۷۹ (۰/۲
روش فازی (مقادیر بعد از کنترل)	۶/۴۶E-۰۳	۳/۳۷E-۰۱	PFD هواکش ۴×۱۰^{-۳}	۱/۹	۸/۷۱E-۰۵ (مقدار فازی ۴/۱-) TA ،۰/۱ TNA) ۱/۹۲ (۰/۱ A ،۰/۸

بحث

در این مطالعه به منظور ارزیابی ریسک لایه‌های حفاظتی موجود در فرایند دریافت آمونیاک در مخازن ذخیره این محصول از روش فازی LOPA استفاده شد. همان گونه که از نتایج ذکر شده در جدول ۱۰ مشخص است، با استفاده از روش ارزیابی ریسک متداول (سنتی) (ردیف اول جدول ۱۰)، که از داده‌های موجود در دیتابیسهای نقص تجهیزاتی بدست آمده‌اند، احتمال آزاد شدن آمونیاک پایین= PFDHR × PFDHE) 5.00E-3 × 1.00E-1 = 5.00E-4) بوده و شدت رویداد با توجه به مصدوم شدن سه اپراتور، "بالا" برآورد می‌گردد و در نتیجه مقدار ریسک برآورد شده با توجه به ماتریس ریسک سختگیرانه (تصویر ۲)، در محدوده TNA (قابل تحمل-غیرقابل قبول) قرار می‌گیرد. سئوالی که پیش می‌آید این است که ریسک مورد نظر، قابل تحمل و یا غیرقابل قبول در نظر گرفته شود. در صورتی که میزان ریسک، قابل تحمل در نظر گرفته شود، سطح اقدامات مورد استفاده با زمانی که ریسک

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

مورد نظر غیرقابل قبول در نظر گرفته شود، قاعدتاً متفاوت خواهد بود. بنابراین بهتر است میزان غیر قابل قبول و یا قابل تحمل بودن ریسک، به صورت کمی مشخص گردد تا سطح اقدامات کنترلی با دقت و صحت بیشتری تعیین گردد. بدین منظور می‌توان از سیستم استباط فازی بهره گرفت. اگر چه از طریق روش سنتی، یک برآورد اولیه حاصل شده است، لیکن به دلیل عدم اطمینان به داده‌های موجود (به دلیل متفاوت بودن این اطلاعات از دیتابیسهای مختلف)، از تیم متخصصین خواسته شد تا نظرات خود را در مورد احتمال پاره شدن شیلنگ و نقص اپراتور در توقف فرایند بارگیری مخزن بیان کنند. از آنجایی که از ویژگیهای توابع عضویت مجموعه‌های فازی، در محاسبه مجموع نظرات استفاده شده است، تغییر اعداد از یک سطح شدت و یا احتمال به سطح بعدی به صورت تدریجی صورت گرفته و لذا سطح ریسک فازی بدست آمده از این طریق، کل محدوده طبقه بندی ریسک را پوشش داده ومعطوف به یک سطح خاص نمی‌گردد. با استفاده از نظرات متخصصین، سطح احتمال نقص مربوط به پاره شدن شیلنگ و خطای اپراتور به ترتیب برابر با ۳/۳۷E-۰۱ (جدول ۸) و ۶/۴۶E-۰۳ (جدول ۹) بدست می ایید. همانگونه که قبلاً بیان شد در صورتی که نظرات افراد در مورد خطای انسانی صورت گیرد، می‌توان به صورت مستقیم از مجموع نظرات استفاده نمود ولی در صورتی که نقص تجهیزاتی مورد ارزیابی قرار گیرد بایستی ابتدا امکان خطای فازی شخصی، به نرخ خطای فازی عینی تبدیل شود سپس از این عدد به عنوان نرخ خطای تجهیزاتی استفاده شود. از آنجایی که نقص شیلنگ، نقص تجهیزاتی محسوب می‌شود لذا به جای محاسبه امکان فازی بایستی احتمال فازی آن محاسبه شود که برابر است با ۶/۴E-۰۳. با قرار دادن این مقادیر در سیستم FLS، و با توجه به اینکه در اثر آزاد شدن آمونیاک، سه اپراتور مصدوم می‌شوند (سطح شدت فازی ۳/۹۹)، لذا سطح ریسک فازی برابر با ۳/۷۹ (NA ۰/۸، TNA ۰/۲) بدست می‌آید. این بدین معناست که ریسک انتشار آمونیاک در اثر نقص شیلنگ و خطای اپراتور در متوقف کردن فرایند، تا حدود کمی (۲۰%) قابل تحمل می‌باشد. ولی به دلیل اینکه تا ۸۰% غیر قابل قبول می‌باشد، بایستی احتمال و یا شدت را کاهش داده تا اینکه ریسک در سطح قابل قبول واقع گردد. بدین جهت در این سناریو توصیه گردید تا به منظور کاهش احتمال آزاد شدن آمونیاک، ازیک هواکش استفاده شده و جهت کاهش شدت، تعداد پرسنل به دو نفر کاهش یافته و از لباس حفاظتی مخصوص استفاده کنند. بدین ترتیب با محاسبه مجدد fic فرکانس انتشار آمونیاک از ۲/۱۸E-۰۳ (مقدار فازی ۲/۶۶-) به ۸/۷۱E-۰۵ (مقدار فازی ۴/۱-) کاهش می‌یابد. هم چنین شدت فازی نیز از ۳/۹۹ به ۱/۹ کاهش یافته و در نهایت شاخص ریسک فازی از ۳/۷۹ (NA ۰/۸، TNA ۰/۲) به ۱/۹۲ (TNA ۰/۱، TA ۰/۸، A ۰/۱) تغییر می‌یابد. عدد ۱/۹۲ به این معناست که ریسک انتشار آمونیاک در صورت آزاد شدن تا حدود ۱۰% قابل قبول بوده و ازسوی دیگر تا ۸۰% قابل تحمل می‌باشد. هر چند بایستی اقدامات بیشتری صورت گیرد تا ریسک از محدوده قابل تحمل نیز به محدوده قابل قبول کاهش یابد.

نتیجه‌گیری

در شرایط عدم قطعیت و یا موجود نبودن اطلاعات مربوط به احتمال و شدت سناریوی ریسک، می‌توان با استفاده از نظرات متخصصین در قالب متغیرهای زبانی و روابط مجموعه‌های فازی، تا حد امکان خطای محاسباتی در ارزیابی ریسک را کاهش داد. این در حالی است که در مورد بیشتر تجهیزات و یا خطاهای انسانی نرخ نقص (PFD) مربوطه در دسترس نبوده و یا در صورت در دسترس بودن دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد. بنابراین می‌توان با استفاده از نظرات متخصصین هر حوزه و با ویژگی مجموعه‌های فازی در برخورد با شرایط عدم قطعیت، ضمن استخراج داده‌های نقص در موارد فقدان اطلاعات، عدم اطمینان موجود در داده‌های استخراج شده را تا حد ممکن کاهش داد. این روش به خصوص در مورد رخدادهای نادر، که اطلاعات مربوطه بسیار کمیاب می‌باشند، بسیار مفید و راهگشا می‌باشد.

تضاد منافع

هیچگونه تضاد منافعی برای این مقاله و نویسندگان آن وجود ندارد.

REFERENCES

1. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment: Wiley; 2011.
2. Dowell AM, editor Layer of protection analysis: a new PHA tool after HAZOP, before fault tree analysis. International Conference and Workshop on Risk Analysis in Process Safety; 1997.
3. Dowell AM. Layer of protection analysis and inherently safer processes. Proc Safe Progress. 1999;18(4):214-20. DOI: 10.1002/prs.680180409
4. Bridges WG, Williams TR, editors. Risk acceptance criteria and risk judgment tools applied worldwide within a chemical company. International conference and workshop on risk analysis in process safety; 1997.
5. AIChE. Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, Center for Chemical Process Safety. New York: John Wiley & Sons; 2001.
6. International Standard IEC 61511-1, Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector, IEC. Geneva, Switzerland: International Standard ICE, 2003.
7. International Standard IEC 61508: Functional Safety of Electrical/

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2010.
8. International Society of Automation. Guidelines for the Implementation of ANSI/ISA 84.00.01 -2004 (IEC 61511) ISA TR84.00.04. USA: Research Triangle Park; 2005.
9. Markowski AS, Mannan MS. Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA). J Loss Prevent Proc Indust. 2009;22(6):921-7. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.06.011
10. Markowski AS. Layer of protection analysis for the process industries. Poland: Polska Akademia Nauk; 2006.
11. Liu H-C, Liu L, Liu N, Mao L-X. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. Expert Sys Applicat. 2012;39(17):12926-34. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.05.031
12. Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. Fuzzy Set Sys. 1988;27(2):87-103. DOI: 10.1016/0165-0114(88)90140-6
13. Lin C-T, Wang M-JJ. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets. Reliabil Engineer Sys Safe. 1997;58(3):205-13. DOI: 10.1016/s0951-8320(97)00072-0
14. Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis: Wiley; 2015.
15. Dubois DJ. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications: Elsevier Science; 1980.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]

Journal of Occupational Hygiene Engineering **Original Article**

No 8, Volume 2, Issue 4

Risk Assessment of Ammonia Tanks Using Fuzzy Layer of Protection Analysis (FLOPA)

Mohsen Omidvar [1,*], Fereshteh Nirumand [2]

[1] *Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2] *Department of Pollution Control, School of Environmental Engineering, Applied Sciences and Technology University, Tehran, Iran*

** Corresponding author: Mohsen Omidvar, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. E-mail: m-omidvar@razi.tums.ac.ir*

DOI: 10.21859/johe-02043

Received: 11.29.2015

Accepted: 02.06.2016

Keywords:
Layer of Protection Analysis
Risk
Fuzzy Sets
Severity
Probability
Fuzzy Possibility

How to Cite this Article:
Omidvar M, Nirumand F. Risk Assessment of Ammonia Tanks Using Fuzzy Layer of Protection Analysis (FLOPA). J Occup Hyg. 2016;2(4):14-24. DOI: 10.21859/johe-02043

© 2016 Hamedan University of Medical Sciences.

Abstract

Introduction: Risk assessment of hazardous processes is the priority of risk management. Layer of protection analysis (LOPA) is one of the most popular methods used for risk assessment. Due to the insufficient information or uncertainty in failure rates (PFD) of protective layers, risk assessment based on the conventional LOPA can result in error in calculations. In this study, we tried to use the fuzzy set theory to evaluate the ammonia receiving tank safety, using the LOPA method.

Methods: Initially, the fuzzy failure rate of protective layers were calculated using the subjective opinions of professionals. Then, by applying the fuzzy operators, fuzzy possibilities transformed to fuzzy probabilities and subsequently they were deffuzified to crisp failure rate. Afterwards, using the severity fuzzy logic, severity of the outcome event was calculated in the fuzzy form, and subsequently, fuzzy risk index was calculated using the fuzzy matrix.

Results: In the ammonia release scenario, calculated severity, probability and risk levels were determined as P: Low, S: High, and R: TNA, and PF = -2.66, SF = 3.99, RF = 3.79 (0.2 TNA, 0.8 NA) for classic and fuzzy LOPA methods, respectively. In addition, after inserting additional layers of protection, the fuzzy risk index reduced from 3.79 (0.2 TNA, 0.8 NA) to 1.92 (0.1 A, 0.8 TA, 0.1 TNA).

Conclusions: In the condition of uncertainty and lack of information relating to probability and severity of risk scenarios, the experts' opinions can be used in forms of linguistic variables and fuzzy relations to reduce calculation errors in risk assessment as much as possible.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-17]

[DOI: 10.21859/johe-02043]