

ارائه روشی برای ارزیابی دینامیکی و تخمین قابلیت اطمینان ریسک مخازن استون با استفاده از مدل سازی و شبکه های بیزین

صابر مرادی حنیفی^۱، الهام کیقبادی^۲ حسین ابراهیمی^۱، فریدون لعل^{۳*}

- ۱- استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
 - ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
 - ۳- استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بیرجند، بیرجند، ایران
- * fereydoonlaal@gmail.com

چکیده

حوادث صنایع فرایندی سالیانه خسارات خیران ناپذیری از بعد اقتصادی، انسانی، مالی و زیست محیطی به بار می آورد. برای پیشگیری از این حوادث ارزیابی و تحلیل حوادث با استفاده از روش های نوین ارزیابی ریسک یک ضرورت محسوب می شود. این مطالعه با هدف ارزیابی دینامیکی ریسک مخازن با استفاده از روش های نوین و مقایسه با روش های سنتی انجام شده است. در این مطالعه ابتدا به منظور تجزیه و تحلیل رخداد نشتی و بررسی پیامد های آن و مدل سازی علت پیامد از روش BT و به منظور به روز آوری نرخ احتمال پیامد ها از روش شبکه های بیزین استفاده شد. پس از آن ۴ سناریوی رهایش احتمالی انتخاب و پیامد رهایش با استفاده از نسخه ۵،۴ نرم افزار ALOHA مدل سازی شد. در نهایت با توجه به میزان تکرار پذیری پیامد های احتمالی و مدل سازی، عدد ریسک برای سناریوهای چهار گانه برآورد گردید. نتایج مدل سازی نشان داد که قطر نشتی ۵۰ میلیمتر دارای بیشترین نرخ انتشار و نشتی ۱ میلیمتر دارای کمترین نرخ انتشار است. و عدد ریسک برآورد شده در هر دو مدل در محدوده غیر قابل قبول قرار دارند. میزان قابلیت اطمینان با توجه به سناریوهای شناسایی شده در روش درخت میزان قابلیت اطمینان ۰/۹۰۴ و در رویکرد BN ۰/۹۱۵ برآورد گردید. استفاده از این رویکرد باعث می شود که نتایج ارزیابی ریسک عینی تر از روش های مرسوم باشد.

کلمات کلیدی: ارزیابی دینامیکی ریسک، مدل سازی، شبکه های بیزین، مخازن، استون،

مقدمه

به مرگ بیش از ۲۰۰۰ نفر از ساکنین شهر مجاور گردید و هزاران نفر نیز سال ها بعد در اثر بیماری های ناشی از آن جان خود را از دست دادند. این حادثه نمونه بارز حوادثی است که بدون حریق و انفجار و حتی با سالم ماندن کارخانه منجر به آسیب انسانی در مقیاس وسیع گردید [1]. از این رو پیامد ناشی از رهایش و نشت مواد سمی مخاطره آمیز همواره دارای اهمیت فراوانی در برنامه های ایمنی و بهداشت بوده است [2]. بنابراین بررسی حوادث ناشی از نشت احتمالی مخازن نگهداری مواد و چگونگی مقابله با آن در شرایط اضطراری در

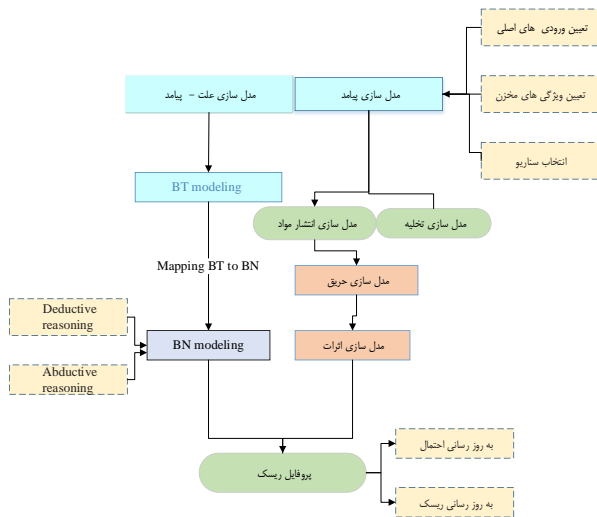
به موازات رشد روزافزون صنایع، استفاده از مواد شیمیایی مخاطره آمیز نیز به شکل چشمگیری افزایش یافته است. حریق، انفجار و رهایش مواد سمی محتمل ترین پیامد زیان بار در این صنایع هستند که علاوه بر ایجاد آسیب به کارکنان، خسارات مالی چشمگیر و خسارات زیست محیطی، می توانند ساکنین مجاور را نیز تحت تاثیر قرار دهند. حادثه بوپال که در سال ۱۹۸۴ در اثر نشت متیل ایزوسیانات رخ داد، منجر

کشورهای بلاخیزی از جمله ایران راهکار پیشگیرانه مهمی محسوب می‌شود [3,4]. حالت اضطراری معمولاً شامل نشت گاز سمی، انفجارها، آتش سوزی‌ها، ریزش مواد شیمیایی و نشت مخاطره آمیز گازهای قابل انفجار و اشتعال در نظر گرفته می‌شود [6]. مواد شیمیایی سمی و قابل اشتعال عموماً در اثر پارگی مخازن، لوله‌های انتقال و سایر اتصالات رها می‌شوند. این حوادث معمولاً پیامدهای زیان باری داشته و در بسیاری از موارد قابل پیشگیری هستند. به عقیده Zarei و همکاران [5] اولین اقدام مؤثر برای پیشگیری از چنین حوادثی ارزیابی کمی ریسک این مکان‌ها است تا بتوان استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی لازم را بر مبنای نتایج این مطالعات طراحی و اجرا کرد. بر اساس نظر Marhavidas و همکاران [6] در تحلیل ریسک دو پارامتر نقش عمده‌ای ایفا می‌کند. پارامتر اول احتمال رخداد و پارامتر دوم شدت پیامد است. احتمال رخداد، امکان وقوع رویداد یا نقص منجر به رویداد در یک بازه زمانی است. شدت پیامدهای یک حادثه به معنای اثرات مضر ناشی از آن حادثه است. پیش‌بینی احتمال حوادث مهم‌ترین گام در آنالیز ایمنی است فیصل خان و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش معتبری برای سناریوهای حوادث بر مبنای احتمال و شدت پیامد ارائه دادند [7]. روش‌های زیادی برای تعیین احتمال در آنالیز ریسک وجود دارد. در میان روش‌های احتمالاتی برای پیش‌بینی احتمال حادثه و تجزیه تحلیل حادثه می‌توان به روش درخت خطا، روش درخت رویداد، روش بایونی و روش شبکه‌های بیزی اشاره نمود، گرچه روش‌های ارزیابی ریسک نقش مهمی در شناسایی ریسک و خطرات دارند اما دارای محدودیت‌هایی هستند که استفاده از آن‌ها در تحلیل ریسک سیستم‌های پیچیده و متقابل محدود کرده است [8-10]. روش درخت خطا به‌طور گسترده‌ای در زمینه تجزیه و تحلیل ریسک [11] و تشخیص خطا [12] استفاده می‌شود. درخت خطای استاندارد برای آنالیز سیستم‌های بزرگ مناسب نیست به‌ویژه اگر سیستم با خطای زیاد، خطاهای با علل معمول یا رویدادهای اولیه‌ای که اثر متقابل باهم داشته باشند از همه مهم‌تر روش درخت خطا همه رویدادها را مستقل در نظر می‌گیرد که معمولاً این فرض معتبر نیست [10].

بنابراین به دلیل ماهیت استاتیک بودن روش‌های درخت خطا و درخت رویداد، این روش‌ها با محیط‌های پویا و دینامیک سازگار نیستند. پویایی محیط می‌تواند ناشی از تغییر در شرایط محیطی (دما، فشار، و ...)، اپراتوری و تغییر در نگرش نسبت به حوادث و شبه حوادث باشد. موضوع نقص روش‌های مرسوم در آنالیز دینامیکی ریسک و کاربرد روش‌های بیزی در ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل ایمنی در اواخر دهه ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفت [13]. روش بیزی روش مؤثری برای شرایطی که داده‌های در دسترس اندک و اطلاعات مختلف وجود دارد می‌باشد و همچنین چارچوب مناسبی برای تعیین دامنه احتمالات برای

مواردی مانند تصمیم‌گیری در شرایط نامطمئن می‌باشد [14]. محققین از شبکه‌های بیزی به‌عنوان روش جایگزین برای نمودار بلوکی قابلیت اطمینان [15]، درخت خطای استاتیک [9]، درخت خطای دینامیک [16] و درخت رویداد استاتیک [17] استفاده کردند. در رویکردهای نوین ایمنی، از پیش‌بینی یا مدل‌سازی پیامد به‌عنوان بخش مهمی از برنامه پیشگیری از بروز این حوادث و یا کاهش زیان‌های احتمالی و تعیین شدت پیامد‌ها استفاده می‌شود. مدل‌سازی پیامد عمدتاً با استفاده از معادلات ریاضی صورت می‌گیرد. مطالعات، مدل‌سازی پیامد را به‌عنوان ابزاری مناسب به منظور طراحی و راه‌اندازی ایمن واحدهای مخاطره آمیز صنعتی توصیه کرده‌اند [18-20]. بعلاوه نتایج این ارزیابی‌ها بخش مهمی از چارچوب تصمیم‌گیری مدیریت ریسک یک سازمان جهت پیشگیری از حوادث را تشکیل می‌دهد. با این حال، مدل‌سازی انتشار آلودگی الزامات خاص خود را دارد و نقش فاکتورهای متعدد می‌بایست به درستی مدنظر قرار گیرد. فاکتورهایی از قبیل: ویژگی‌های ماده رها شده، ویژگی‌های فرآیند تولید، ویژگی‌های محیط بیرونی (شامل آب و هوا و توپوگرافی منطقه) [21]. برای مدل‌سازی پیامد از ابزارهای مختلفی از قبیل نرم افزارها استفاده می‌شود. یکی از مناسب‌ترین نرم افزارهای مدل‌سازی رهاش مواد سمی، آتش سوزی و انفجار، نرم افزار ALOHA است. این ابزار که با همکاری آژانس محیط زیست آمریکا، آژانس اداره امور اقیانوس و اتمسفر آمریکا و دفتر پیشگیری و آمادگی اضطراری مواد شیمیایی تهیه شده است دارای بانک اطلاعاتی مشتمل بر اطلاعات مربوط به ۱۰۰۰ ماده خالص و مخلوط می‌باشد. این نرم افزار برای کاربردهای مختلفی در حیطه ایمنی از جمله کمک به مدیریت بحران مرتبط با مواد شیمیایی، دستیابی، ذخیره، مدیریت اطلاعات و تهیه نقشه جریان هوا در زمان حوادث، ارزیابی میزان تطابق فعالیت‌ها با مقررات زیست محیطی مربوط به نگهداری و استفاده از مواد شیمیایی، مدیریت ریسک و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال دقت نتایج آن می‌تواند در اثر برخی پارامترها از جمله پایداری زیاد جوی، سرعت باد خیلی کم و همراه با تغییرات مکرر جهت جریان باد، حضور مواد خاص، وجود واکنش‌های حریق و غیره کاهش یابد [22-24].

با وجود برخی محدودیت‌ها استفاده از آن می‌تواند نتایج مناسبی را فراهم نماید. مدل‌سازی پیامد نشت مواد با این نرم افزار در مطالعات مختلفی صورت پذیرفته است. هوی و گونینگ (۲۰۱۲) مدل‌سازی پیامد نشت از نیروگاه برق با سوخت طبیعی را با این نرم افزار مورد مطالعه قرار دادند [25]. سینگ و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌سازی پیامد نشت کلر، فشن و اپی کلروهیدرین را با ALOHA انجام و برای پیشگیری از حوادث آینده و تلفیق در ارزیابی ریسک مورد استفاده قرار دادند [26]. جباری و همکاران (۲۰۰۹) برای مدل‌سازی پیامد غلظت‌های مختلف کلر از آن بهره جستند [27]. مدل‌سازی پیامد انتشار گاز آمونیاک و تهیه



شکل ۱: روش اجرای طرح

در این مطالعه به منظور شناسایی رویدادهای پایه در وقوع نشت استون از مخازن از روش درخت استفاده شد. درخت خطا یک نمودار درختی گرافیکی است در این تکنیک تمامی دلایل خرابی در قالب یک رویکرد استقرایی یا ساختاری از بالا به پایین مرتب شده و در نهایت با استفاده از این ساختار احتمال وقوع رویداد نهایی به صورت کیفی یا کمی تعیین می‌شود [33]. تحلیل کیفی به منظور محاسبه مجموعه برش اصلی بکار می‌رود. مجموعه برش اصلی، حداقل مجموعه‌ای از رویدادهای اساسی است که می‌تواند منجر به رویداد نهایی شود. پس از اتمام تجزیه و تحلیل کیفی درخت خطا با تمرکز بر علل وقوع رویداد اصلی، احتمال رخداد رویدادهای پایه با استفاده از تکنیک دلفی، بررسی سابقه حوادث، داده‌های ارائه شده در انجمن مهندسی ریسک آمریکا [34] و اطلاعات استخراج شده از کتب مرجع و مطالعات مشابه [35-38] برآورد گردیده و کمی سازی درخت خطا انجام شد. در تحلیل کمی درخت خطا برای محاسبه احتمال رویداد نهایی احتمال وقوع هر یک از رویدادهای پایه تعیین شد [39]. با معلوم بودن احتمال وقوع رویدادهای پایه و با توجه به نوع دروازه مورد استفاده، احتمال رویداد نهایی تعیین گردید. احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویداد میانی که دروازه آن‌ها از نوع AND است با استفاده از رابطه ۱ و احتمال رویداد نهایی یا رویداد میانی که دروازه بین آن‌ها از نوع OR است با استفاده از رابطه ۲ تعیین گردید [40].

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$

در این روابط P ، احتمال وقوع رویداد خروجی درگاه، n تعداد رویدادهای ورودی درگاه و P_i احتمال وقوع هر یک از رویدادهای ورودی درگاه است. به منظور شناسایی و محاسبه ترتیب رخداد سناریوهای بالقوه دخیل در حادثه، از روش درخت رویداد استفاده

طرح واکنش در شرایط اضطراری در مطالعه لی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [28]. به طور کلی اغلب مطالعات افزایش احتمال رخداد حوادث مربوط به نشت آلودگی از مخازن، لوله و اتصالات حاوی مواد با قابلیت اشتعال و سمیت بالا را بیان کرده‌اند [12,13]. لذا مدل سازی پیامد حوادث این گونه صنایع می‌تواند در کاهش تلفات انسانی و زیست محیطی نقش موثری را ایفا نماید [29]. در صنعت تولید سفره، برای ایجاد طرح‌های متنوع از رنگ‌ها و حلال‌های مختلف از جمله استون استفاده می‌شود. از آنجا که این مواد در مخازن بزرگ نگهداری می‌شوند، همواره امکان نشت احتمالی از این منابع وجود دارد. بنابراین، پیشگیری از وقوع حوادث احتمالی و تهیه طرح‌های واکنش در شرایط اضطراری ایجاب می‌نماید که مدلسازی پیامد نشت این مواد مورد بررسی دقیق قرار گیرد. لذا مطالعه این مطالعه با هدف ارائه روشی برای ارزیابی دینامیکی ریسک مخازن حاوی استون ارائه شده است. برای تعیین احتمال رویدادهای اصلی ناشی از نشت استون از روش درخت رویداد استفاده شد و به منظور به روزرسانی احتمال پیامد های نهایی از روش شبکه‌های بی‌زین به کار گرفته شد. به منظور تعیین شدت پیامدهای ناشی از نشت استون از نرم‌افزار ALOHA استفاده شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در سالن چاپ یکی از شرکت‌های تولید سفره در تهران انجام پذیرفت. در سالن چاپ، نقش و نگاره‌های مختلف بر روی سفره چاپ می‌شود. برای این منظور از حلال‌های تبخیر کننده رنگ از قبیل استون استفاده می‌شود. شکل ۱ روش اجرای ارزیابی دینامیکی ریسک مخازن استون را نشان می‌دهد. شکل ۱ روش اجرای ارزیابی دینامیکی ریسک مخازن استون را نشان می‌دهد.

مدل سازی علت - پیامد سناریو حادثه

روش BT

تکنیک پایبونی BT به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک در صنایع مختلفی به کار گرفته شده است. این تکنیک از موثرترین روش‌ها در زمینه مدیریت و ارزیابی ریسک می‌باشد، سمت راست این تکنیک درخت رویداد و سمت چپ آن درخت خطا قرار دارد. مطالعات متعددی از جمله Markowski و همکاران [30]، Ouache و همکاران [31] و Ruijter و همکاران [32] از این تکنیک در ارزیابی ریسک استفاده کرده‌اند.

مدلسازی پیامد سناریو حادثه

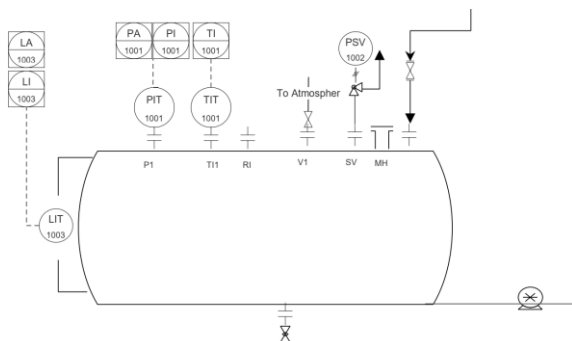
برای مدلسازی انتشار این مواد از نرم افزار ALOHA نسخه ۵,۴ استفاده شد. این ابزار بر مبنای مدل گوسی انتشار مداوم و مجاری شناور آلودگی هوا ایجاد شده است. بر اساس راهنمای استاندارد روش، قبل از استفاده می‌بایست اعتبار بخشی داخلی برای روش صورت گیرد. بدین منظور با اجرای سناریوهای مطرح شده در دستورالعمل راهنمای روش، روش اعتبار بخشی گردید.

تعیین ورودی‌های اصلی نرم افزار

برای مدلسازی انتشار از مخازن ذخیره این مواد، نیاز است برخی اطلاعات به عنوان ورودی‌های اصلی نرم افزار از منابع مختلف جمع آوری شوند. پارامترهای جوی مکان مورد نظر به عنوان یکی از ورودی‌های نرم افزار محسوب می‌شوند، بنابراین در آغاز بررسی اطلاعات مورد نیاز از قبیل متوسط دمای فصل، سرعت جریان هوا، جهت غالب جریان باد، طول و عرض جغرافیایی، رده پایداری و سایر پارامترهای مورد نیاز از سازمان هواشناسی، بانک‌های اطلاعاتی، اینترنت و غیره جمع آوری شدند.

تعیین ویژگی‌های مخزن

اطلاعات مربوط به مخزن ذخیره استون از داده‌های مربوط به شکل منبع، ابعاد فیزیکی و مقدار مواد موجود در آن‌ها از مستندات صنعت مورد نظر دریافت شد. شکل ۲ P&ID مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهد. زمان شبیه سازی فصل تابستان، سرعت باد ۵/۵ مایل بر ساعت، حجم مخازن ۲۲۰ لیتر، رطوبت نسبی ۵۰٪، دمای هوا ۸۰ درجه فارنهایت، نوع مخزن تانک افقی بود.



شکل ۲: دیاگرام P&ID مخزن استون

انتخاب سناریو

انتخاب سناریو مهمترین مرحله در مدلسازی پیامد قلمداد می‌شود. مهمترین پارامتر در این زمینه قطر نشستی از مخازن است که در مطالعات پیشین بر اهمیت آن تاکید شده است. قطر روزه‌های نشستی

گردید. تحلیل درخت رویداد نیز به دو صورت کمی و کیفی انجام می‌شود. در تحلیل کیفی به تعیین حداقل برش‌ها پرداخته شد و در تحلیل کمی احتمال هر برش نیز از طریق رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$P_r = P_r(TE) \times \prod_{j=1}^n P_r(E_j) \quad (3)$$

در این رابطه P_r احتمال رخداد هر یک از پیامد‌ها، $Pr(TE)$ احتمال رویداد اصلی، $P_r(E)$ احتمال شکست یا موفقیت لایه‌های حفاظتی می‌باشد.

شبکه‌های بیزین

شبکه بیزین یک مدل گرافیکی برای نمایش رابطه مابین متغیرهای موردنظر می‌باشد. شبکه بیزین یک نمودار جهت‌دار غیر حلقوی است [41]. شبکه‌های بیزین نه تنها از نظریه بیز برای به روز رسانی احتمالات استفاده می‌کند بلکه دارای یک ویژگی کاملاً انعطاف پذیر و سازگار برای مدل سازی پویای طیف گسترده‌ای از سناریوهای حوادث می‌باشد. شبکه‌های بیزین برای محاسبه توزیع احتمال توام از مجموعه‌ای از متغیرها استفاده می‌کند [42,43].

بر اساس قانون بیز اگر فضای نمونه S را به n مجموعه E_1, E_2, \dots, E_n افراز کنیم و مجموعه A زیرمجموعه‌ای از فضای نمونه باشد آنگاه احتمال وقوع پیشامد E_k به شرط A از رابطه ۴ تعیین می‌شود [44].

$$P(E_k|A) = \frac{P(E_k \cap A)}{P(A)} = \frac{P(E_k) \times P(A|E_k)}{\sum P(E_i) \times P(A|E_i)} \quad (4)$$

قانون بیز اصلی‌ترین سنگ بنای یادگاری بیز است چون روشی برای محاسبه احتمال پسین $P(A|B)$ را از احتمال پیشین $P(A)$ فراهم می‌آورد. ساده ترین قانون بیز به صورت رابطه ۵ می‌باشد.

$$P(A/B) = \frac{P(B/A)P(A)}{P(B)} \quad (5)$$

در این رابطه $P(B)$ احتمال وقوع D و $P(A|B)$ احتمال وقوع A به شرط وقوع B است [41].

الگوریتم انتقال دیاگرام پاپیونی BT به شبکه‌های بیزین

پس از ترسیم دیاگرام BT و تعیین احتمال رویدادهای پایه به روش منطقی فازی، جهت برطرف کردن نواقص آن بایستی این مدل به داخل شبکه‌های بیزین انتقال داده شود. رویکرد شبکه‌های بیزین BN با توجه به توانایی به روزرسانی احتمالات قدیمی و در نظر گرفتن نقص و شکست‌های دارای علت‌های مشترک در یک سیستم، نتایج ارزشمندتری را در زمینه آنالیز ریسک نسبت به BT ارائه می‌دهد [45]. بنابراین به منظور غلبه بر محدودیت‌های BT، دیاگرام پاپیونی مطابق الگوریتم ارائه شده توسط Khakzad و همکاران انتقال یافت [46].

، به عنوان پیامد دز مشخص، معادلات (۷) به کار برده می‌شود [48,49]

$$Pr = C_1 + C_2 \ln D \quad (۶)$$

در این رابطه C_1 و C_2 مقادیر ثابتی هستند که با توجه به جدول ۲ تعیین می‌شوند و D دز گرمای تابشی $(W^{3/8} S. m^{-8})$ [49].

جدول ۲: ضرایب C_1 و C_2 (۵۰)

اثر	C_1	C_2
سوختگی درجه یک	-۳۹/۸۳	۳/۰۱۸۶
سوختگی درجه دو	-۴۳/۱۴	۳/۰۱۸۶
مرگ	-۳۶/۳۸	۲/۵۶

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (۷)$$

برای تعیین مقدار سوختگی‌ها و مرگ و میر از دز گرمای تابشی استفاده می‌شود. دز گرمای تابشی وابسته است به شار گرمایی و زمان قرار گرفتن در معرض آن، که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$D = t_{eff}(q')^{4/3} \quad (۸)$$

در این رابطه q' شار گرمایی (وات بر متر مربع)، t_{eff} (ثانیه) زمان در معرض قرار گرفتن فرد معمولاً برابر است با مجموع زمان واکنش اولیه به علاوه زمان مورد نیاز برای رسیدن به یک نقطه امن که از رابطه (۹) تعیین می‌شود.

$$t_{eff} = t_r + \frac{(x_0 - r)}{u} \quad (۹)$$

با توجه به مطالعه Assael و همکاران [49]. زمان واکنش ۵ ثانیه در نظر گرفته می‌شود x_0 فاصله بین سطح شعله و موقعیتی است که در آن شدت شار گرمایی کمتر از ۱ کیلو وات بر متر مربع است. سرعت فرار U معمولاً ۴ متر بر ثانیه می‌باشد. F_k به تاثیر لباس در احتمال آسیب یا مرگ اشاره دارد و با فرض اینکه هیچ احتراقی در لباس روی نمی‌دهد به منزله یک ضریب تصحیح است. مقدار آن از ۰/۱۴ برای لباس زمستانی و ۰/۹۵ برای لباس تابستانی متغیر است که در این مطالعه مقدار آن ۰/۹۵ برای حالت لباس تابستانی در نظر گرفته شد. با حاصل ضرب احتمال وقوع در شدت پیامد هر کدام از سناریوها، ریسک پیامدهای نهایی محاسبه می‌شود. در این مطالعه به عنوان یک نوآوری از شبکه‌های بیزین برای بروز رسانی احتمال رویدادهای ریشه‌ای و از ALOHA برای برآورد پیامدهای نهایی و پیش بینی میزان گرمای تابشی استفاده شد.

به روزرسانی از طریق اخذ داده‌های مربوط به شدت حوادث، شکست‌های انسانی و تجهیزات در شبکه‌های بیزین صورت می‌گیرد. به منظور تخمین احتمال مرگ و میر با توجه به شار گرمایی برآورد شده توسط نرم افزار ALOHA از روابط (۸ و ۷) استفاده شد [51,52].

با توجه به اندازه لوله‌های متصل به مخازن و همچنین لوله‌های انتقال دو ماده مورد مطالعه تعیین می‌شود [19,20]. با بررسی شرایط، برای استون ۴ سناریو مورد بررسی قرار گرفت. قطر نشستی در ۴ سناریوی انتخاب شده به ترتیب مساوی ۱، ۵، ۱۰ و ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شد. برای هر سناریو کد مشخصی همانام با ماده و قطر نشستی مشخص گردید (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات سناریوهای مورد مطالعه استون

سناریو	کد	نوع ماده	قطر نشستی (mm)
۱	A-50	استون	۵۰
۲	A-10	استون	۱۰
۳	A-5	استون	۵
۴	A-1	استون	۱

مدل سازی اثرات

در این مرحله پیامدهای مختلف ناشی از یک حادثه که می‌تواند سبب تلفات انسانی شود مورد ارزیابی قرار گرفت. آثار ناشی از نشت مواد شیمیایی در دو گروه سمیت، و حریق مورد بررسی قرار گرفته و مدل سازی شد. ارزیابی میزان سمیت مواد با استفاده از یک معیار انجام شد. در مطالعه حاضر معیارهای ERPG و AEGL به عنوان ملاک ارزیابی سمیت انتخاب شدند. معیار AEGL توسط سازمان محیط زیست آمریکا تعیین و سه سطح را مشخص می‌کند. این سطوح مشخص شده مرتبط با مواجهه‌های جمعیت در سطوح تراکم‌های AEGL مواد شیمیایی است [47]. در نهایت با استفاده از داده‌های ورودی ALOHA، شعاع خطر در فواصل ۱، ۲، ۳، ۱۰، ۲۰، ۳۰ ERPG به صورت خطوط رنگی کاملاً مجزا تعیین گردید. محدوده ایمن و غلظت استون در زمان‌های مختلف پس از رهاش از خروجی نمودارهای نرم افزار به دست آمد. در مدل سازی آتش، رهاش ماده قابل اشتعال و قرارگیری در معرض جرقه، چندین نتیجه احتمالی در پی خواهد داشت. بروز نتایج مذکور وابسته به زمان و موقعیت جرقه، فاز ماده، نوع رهاش و شرایط محیط اطراف دارد.

تخمین ریسک

به منظور برآورد پیامدهای آتش بر انسان معمولاً از منحنی دز - پاسخ استفاده می‌شود. رابطه دز - پاسخ به صورت تجربی یا از روی داده‌های میدانی برای پارامترهایی نظیر گرمای تابشی، افزایش فشار، گرما، سروصدا، غلظت گازهای سمی و غیره ساخته شده است. روش‌های بسیاری برای باز تولید منحنی دز - پاسخ وجود دارد. اما روشی که امروزه به طور گسترده استفاده می‌شود روش توابع احتمال است. برای محاسبه احتمال، آسیب (سوختگی درجه ۱ یا ۲) یا مرگ

تعیین احتمال رویدادهای ریشه ای و موانع ایمنی از. داده‌های ارائه شده در انجمن مهندسی ریسک آمریکا [34] و اطلاعات استخراج شده از کتب مرجع و مطالعات مشابه [35-38] استفاده شد جدول ۳ میزان احتمال رویداد های ریشه ای و موانع ایمنی را نشان می دهد.

مدل سازی شبکه‌های بیزین

تحلیل دیاگرام پایبونی منجر به شناسایی آن دسته از رویدادهای ریشه‌ای می‌شوند که باعث رخداد سناریوی اصلی و نهایتاً پیامدهای مربوطه است. هر چند که روش پایبونی، یک تحلیل قوی از علل منجر به وقوع حوادث است اما دارای محدودیت‌هایی است که می‌تواند در تجزیه و تحلیل ریسک اثر قابل توجهی داشته باشد. به منظور غلبه بر محدودیت‌های روش پایبونی، دیاگرام ترسیم شده مطابق الگوریتم ارائه شده توسط Khakzad و همکاران [46] در غالب شبکه‌های بیزین با استفاده از نرم افزار Genie ترسیم شد. شکل ۴ مدل پویایی پیامد نشستی استون از مخزن را نشان می‌دهد.

استدلال استقرایی

یکی از ویژگی‌های مشترک مدل BT و مدل BN استدلال استقرایی است جدول 5 استون دوم و سوم نتایج استدلال استقرایی روش پایبونی BT و شبکه بیزین BN را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در رویکرد پایبونی BT احتمال رخداد رویداد اصلی (IE) یعنی نشستی استون 0.10097097 است. اما نتایج مدل شبکه بیزین BN احتمال رویداد اصلی را 0.08885898 نشان داد که این مقدار کمتر از مقدار بدست آمده در مدل پایبونی BT است دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین رویدادهای با علل مشترک باشد که مدل پایبونی BT این قابلیت را ندارد. نتایج شبکه‌های بیزین نشان داد که در سناریوی ریزش استون پیامدهای حریق استخری، انفجار ابر بخار، حریق ناگهانی و رهایش ایمن مواد شیمیایی خواهد بود که احتمال رخداد آن‌ها در جدول 5 نشان داده شده است.

میزان مرگ و میر ناشی از وقوع هر یک از پیامدها از رابطه (۱۰) تعیین شد [52].

$$N = D_p AP \quad (10)$$

در آن رابطه N تعداد مرگ و میر (تعداد مرگ و میر / حادثه)، D_p توزیع جمعیت (نفر/مترمربع)، A مساحت ناحیه تحت تاثیر پیامد (مترمربع)، P احتمال مرگ و میر

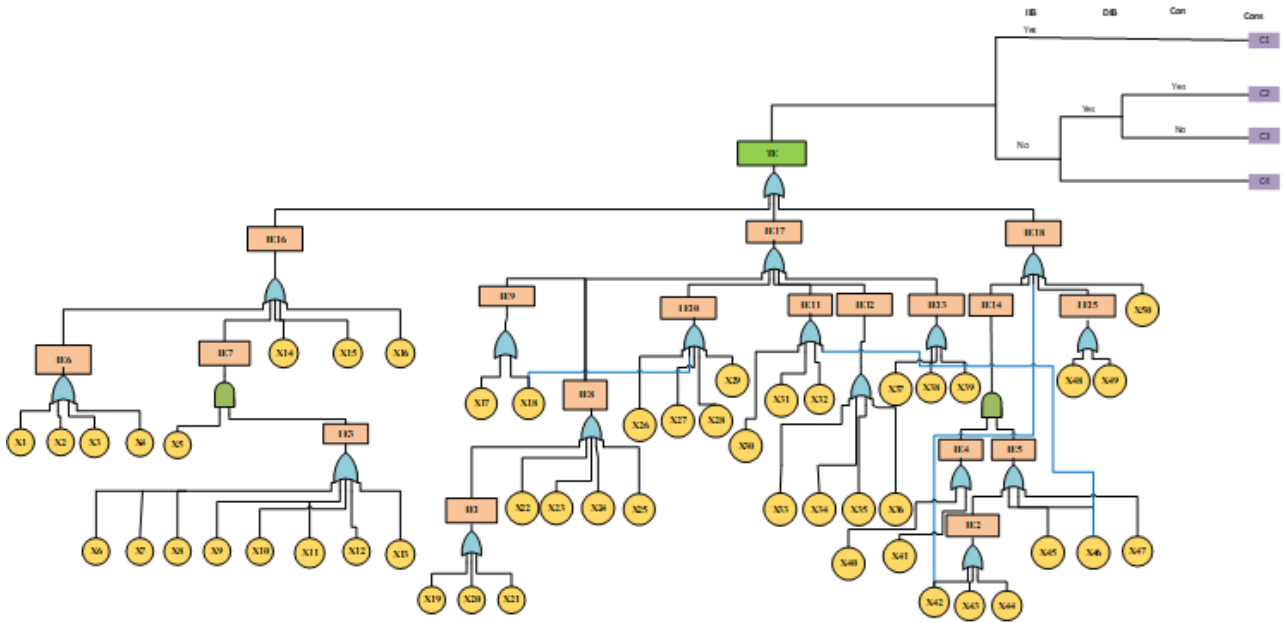
یافته‌ها

ترسیم دیاگرام BT

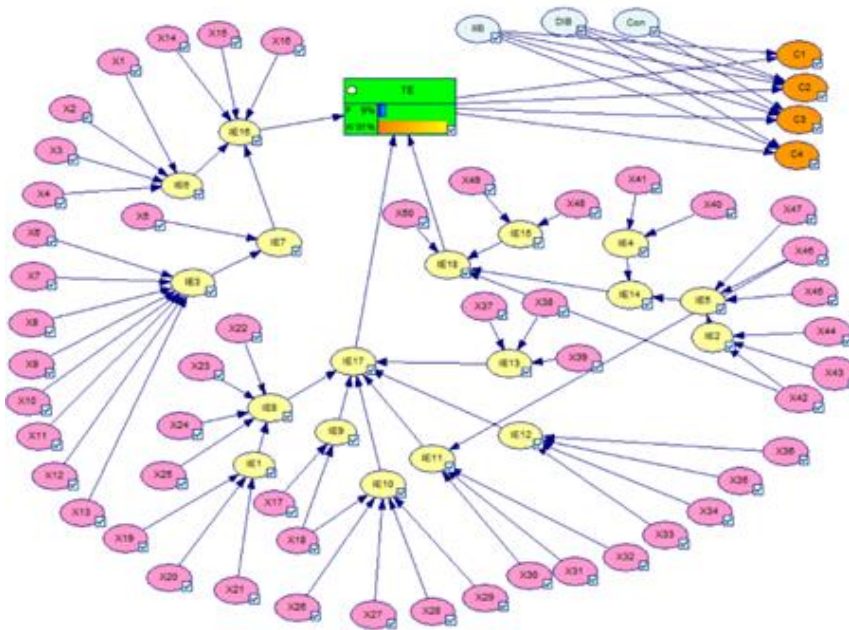
دیاگرام BT مربوط به نشستی استون از مخزن مطابق با شکل ۳ در پنل تخصصی با حضور متخصصان و افراد عملیاتی مربوطه ترسیم گردید. بعد از اینکه ترسیم کیفی دیاگرام BT با تمرکز بر نشستی استون از مخزن انجام شد، احتمال رویداد نهایی و پیامدهای ناشی از نشستی استون برآورد گردید. با توجه به اینکه نقطه اشتعال استون ۱۸- درجه سانتی‌گراد است [53]. و با توجه به دستورالعمل BEVI برای موادی که نقطه اشتعال آن‌ها کمتر از ۲۱ درجه سانتی‌گراد باشد [54]. در موادی که نقطه اشتعال آنها کمتر از ۲۱ درجه سانتی‌گراد است پیامدهای نهایی ناشی از ریزش در صورت نقص موانع ایمنی (جرقه فوری، جرقه تاخیری و فضای محصور) شامل حریق استخری، حریق ناگهانی، انفجار بار بخار و رها شدن ایمن مواد شیمیایی می‌باشد. شکل ۴ دیاگرام پایبونی سناریوهای محتمل را نشان می‌دهد. در دیاگرام پایبونی BT، درخت رویداد با توجه به دستورالعمل BEVI و نقطه اشتعال استون ترسیم گردید. درخت رویداد ناشی از نشستی استون با توجه به قابلیت اشتعال استون مطابق نظر Juan و همکاران [55] ترسیم شد. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است رویدادهای پایه با علامت X و رویدادهای میانی با علامت IE نشان داده شده است جدول ۳ و ۴ توصیف رویدادهای پایه و میانی را نشان می‌دهد.

تعیین احتمال رویداد های پایه و موانع ایمنی

همانگونه که بیان شد به منظور محاسبه احتمال شکست رویداد اصلی نیاز است که نرخ شکست رویداد های ریشه ای تعیین شود. برای



شکل ۳: مدل سازی علت پیامد نشت استون با مدل BT



شکل ۴: مدل سازی پویایی سناریو نشت استون با شبکه های بیزین

جدول ۳: توصیف رویدادهای پایه و موانع ایمنی و میزان احتمال آن

احتمال شکست	رویداد پایه	علامت	احتمال شکست	رویداد پایه	علامت
۰,۰۰۱۱	استفاده نادرست از تجهیزات	X26	۰,۰۰۰۶	تمام شدن باتری بی سیم	X1
۰,۰۰۰۵	ناتوانی در جایگزینی تجهیزات فرسوده	X27	۰,۰۰۰۸۳	نقص الکترونیکی بیسیم	X2
۰,۰۰۰۷	ماهیت ماده شیمیایی	X28	۰,۰۰۰۴۸	عدم استفاده از بیسیم	X3
۰,۰۰۰۴	نقص بازرسی در تشخیص فرسودگی	X29	۰,۰۰۰۴۹	ناکافی بودن تعداد بیسیم ها	X4
۰,۰۰۰۳	آسیب وارده به گسکت	X30	۰,۰۰۰۹۷	عملکرد نامناسب مدیریت	X5
۰,۰۰۰۴	نقص تعمیر و نگهداری	X31	۰,۰۰۰۰۶	ترس از انفجار و آتش سوزی	X6
۰,۰۰۰۳	ضربات خارجی	X32	۰,۰۰۰۲۵	عدم اطلاع رسانی به موقع اتاق کنترل	X7
۰,۰۰۰۳	نقص حفاظت کاتدیک	X33	۰,۰۰۰۲۷	ضعف شنوایی	X8
۰,۰۰۰۱	از بین رفتن لایه ضد خوردگی	X34	۰,۰۰۰۰۱۴	نداشتن مهارت و تجربه کافی	X9
۰,۰۰۰۵	ساییدگی	X35	۰,۰۰۰۷۵	خستگی	X10
۰,۰۰۰۸	نقص در بازرسی خوردگی	X36	۰,۰۰۰۰۶	استرس	X11
۰,۰۰۰۸	تنش برشی	X37	۰,۰۰۰۰۴	نوبت کاری	X12
۰,۰۰۰۸	تنش محوری	X38	۰,۰۰۰۰۲	آموزش ناکافی و غیر اثربخش	X13
۰,۰۰۰۸	تنش مماسی	X39	۰,۰۰۰۰۱	خطای عمدی در اجرای دستورالعملها	X14
۰,۰۰۰۲	بسته شدن ولو بعد از مخزن	X40	۰,۰۰۰۰۷	نقص در صدور پرمیت	X15
۰,۰۰۰۱	عمل نکردن Pressure switch های ورودی	X41	۰,۰۰۰۰۱	برخورد ناخواسته پا با ولوها	X16
۰,۰۰۰۱۲	نقص در کارایی سیستم ارت	X42	۰,۰۰۰۰۲	نقص جوشکاری	X17
۰,۰۰۰۱۴	فرسودگی تجهیزات	X43	۰,۰۰۰۰۱	تغییرات دمایی	X18
۰,۰۰۰۲۴	رعد و برق	X44	۰,۰۰۰۰۵	جایگذاری نامناسب گسکت	X19
۰,۰۰۰۱۴	نقص نرم افزاری	X45	۰,۰۰۰۰۱	ایجاد انحنای در گسکت	X20
۰,۰۰۰۰۱	نقص در ولوهای کنترلی	X46	۰,۰۰۰۰۲	فرسودگی و استهلاک تجهیز	X21
۰,۰۰۰۲۳	کالیبره نبودن سیستم های ابزار دقیق	X47	۰,۰۰۰۰۲۹	خراب بودن اتصالات رزوه	X22
۰,۰۰۰۰۴	برودت هوا	X48	۰,۰۰۰۰۳۱	نقص در نشت یابی	X23
۰,۰۰۰۰۳۶	نقص در فیلترینگ ناخالصی ها	X49	۰,۰۰۰۰۰۳	باز طراحی غیر اصولی	X24
۰,۰۰۰۰۳	طراحی اولیه نادرست	X50	۰,۰۰۰۰۰۶	مونتاز نامناسب تجهیزات	X25
۰/۶	فضای محصور	Con	۰/۱	مانع جرقه فوری	IIB
			۰/۳	مانع جرقه تاخیری	DIB

جدول ۴: توصیف رویداد های میانی و پیامد های نهایی

رویداد	توصیف	رویداد	توصیف
TE	نشستی مخزن استون	IE12	خوردگی
IE1	نقص گسکت	IE13	عامل تنش
IE2	قطع برق سیستم مارشلینگ تجهیزات ابزار دقیق	IE14	بالا رفتن فشار
IE3	عملکرد نامناسب اپراتور	IE15	انسداد لوله های متصل

IE4	نقص تجهیزات اصلی	IE16	علل انسانی
IE5	نقص تجهیزات کنترلی	IE17	علل مکانیکی
IE6	نقص در سیستم ارتباطی	IE18	علل فرایندی
IE7	نقص در بازرسی و بهره برداری تجهیزات	Cons	پیامد ها
IE8	چفت و بست نامناسب	C1	حریق استخری
IE9	ایجاد ترک های ریز	C2	انفجار ابر بخار
IE10	فرسودگی تجهیزات	C3	حریق ناگهانی
IE11	نقص در ولوها	C4	رها سازی ایمن یا سمی مواد

جدول ۵: احتمال رخداد پیامد های نهایی با رویکرد BT و BN

	احتمالات پیشین (BT)	احتمالات پیشین (BN)	احتمالات پسین (BN)
TE	۰/۱۰۰۹۷۰۹۷	۰/۰۸۸۵۸۹۸	۱
C1	۰/۰۱۰۰۹۷	۰۰۸۸۵۸۹	۰/۱
C2	۰/۰۱۶۳۵۷	۰/۰۰۱۵۹۹۴۶	۰/۰۱۸
C3	۰/۰۱۰۹۰۵	۰/۰۰۱۵۹۹۴۶	۰/۰۱۸
C4	۰/۰۹۰۸۷۴	۰/۰۰۲۶۶۵۷۶	۰/۰۳

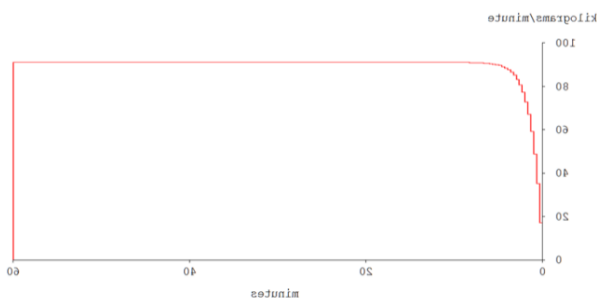
مدل سازی پیامد

نرخ رهاش مواد در ۴ سناریوی مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که در یک ساعت نخست در سناریوی A-50 بیشترین مقدار مواد به میزان ۸۰ کیلوگرم و در سناریوی A-1 و کمترین مقدار مواد به میزان ۰/۳۵ کیلوگرم استون رها خواهد شد.

جدول ۶: مقدار ماده رها شده در یک ساعت نخست پس از حادثه

ماده	استون			
سناریو	A-1	A-5	A-10	A-50
ماده رها شده kg	۰/۳۵	۰/۹۰	۳	۸۰

شکل ۴ پیامد ناشی از سناریوی A-50 رهاش استون را نشان می دهد. بر این اساس میزان رهاش استون پس از حدود هشت دقیقه نرخ رهاش مواد به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن از یک روند ثابت پیروی می کند.



شکل ۴: میزان رهاش استون در سناریو A-50

ب- استدلال قیاسی: یکی از ویژگی های شبکه های بیزین توانایی استدلال قیاسی است. این توانایی اهمیت زیادی در تحلیل پویای ریسک دارد. این امتیاز باعث می شود که ساختار شبکه پویا باشد و امکان به روز رسانی احتمال رخداد رویدادهای پایه را با دریافت داده های پیش درآمد حوادث فراهم می کند این امر سبب می شود که داده های مدل ساخته شده در حالت به روز رسانی به واقعیت نزدیک تر باشد و یک مدل پویای تحلیل ریسک ساخته شود. با به روز رسانی احتمال رخداد رویدادهای پایه و پیامدهای نهایی، امکان انتخاب بحرانی ترین رویداد پایه که بیشترین سهم در وقوع رویداد اصلی را دارد وجود خواهد داشت [56]. ستون آخر جدول ۳ احتمالات به روز شده پیامد های نهایی را با استفاده از شبکه های بیزین نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، حریق استخری دارای احتمال ۰،۱ می باشد که نسبت به سایر پیامد ها بیشترین مقدار است.

تخمین قابلیت اطمینان

با توجه به درخت خطا و نتایج آنالیز کیفی آن میزان نقص مخزن در درخت خطا میزان قابلیت اطمینان برای یک دوره یک ساله ۰/۹۰۱ و در رویکرد شبکه های بیزین ۰/۹۱۵ برآورد گردید همانگونه که بیان شد میزان قابلیت اطمینان در شبکه های بیزین بیشتر از روش درخت خطا است که این موضوع می تواند ناشی از قابلیت شبکه های در نظر گرفتن رویدادهای با علت مشترک است.

جدول ۸: شعاع خطر ناشی از توزیع مواد رها شده در سناریوهای مختلف (متر مربع)

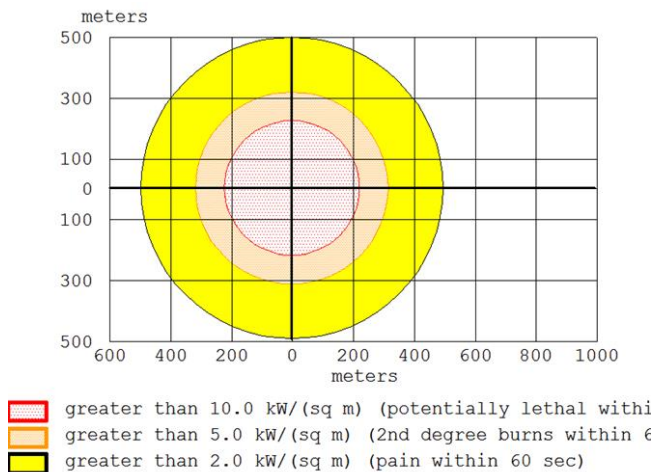
ماده	استون			
	A-1	A-5	A-10	A-50
سناریو	ND	۲۸	۴۲	۵۰
ERPG1	۱۹	۳۶	۵۸	۷۰
ERPG2	۵۶	۸۵	۱۰۳	۱۱۵
ERPG3				

محدوده گرمای تابشی ناشی از حریق مواد رها شده در سناریوهای مختلف در جدول ۹ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود در سناریوی با قطر نشستی ۵۰ میلی متر بیشترین میزان شار گرمایی برآورد شده است.

جدول ۹: محدوده خطر گرمای تابشی ناشی از حریق مواد رها شده در سناریوهای مختلف (متر مربع)

ماده	استون			
	A-1	A-5	A-10	A-50
سناریو	۱۴۸	۱۹۰	۲۰۲	۲۲۰
>10.0 kw/sq m				
>5.0 kw/sq m	۲۱۲	۲۵۶	۲۸۲	۳۱۲
>2.0 kw/sq m	۳۷۸	۴۱۳	۴۵۶	۵۰۰

بر پایه شکل ۶ در صورت وقوع سناریوی شماره A-50، گرمای تابشی در محدوده ۲۲۰ متری کشنده بوده و در محدوده ۳۱۲ متری قابلیت سوراندگی دارد. در این سناریو گرمای تابشی در محدوده ۵۰۰ متری در افراد مواجهه یافته ایجاد درد خواهد نمود.



شکل ۶: محدوده تابشی ناشی از حریق در سناریوی A-50

برآورد ریسک

بعد از مدل سازی پیامد به وسیله ALOHA و ، برآورد احتمال پیامد های ناشی از نشت استون عدد ریسک ناشی از حریق استخری استون در چهار سناریو و در هر دو رویکرد پیشین و پسین برآورد شد. همانطور که بیان شد سناریوهای محتمل ناشی از ریزش و در صورت

مقدار تراکم آلودگی در نواحی مختلف و ۶۰ دقیقه پس از شروع رهاش مواد در سناریوهای مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است. برای سناریوی A-50 و برای AEGL-1 به ترتیب محدوده ای به طول وارتفاع ۴۰۰ و ۸۰ متر به عنوان ناحیه خطر در نظر گرفته می شود. با کاهش قطر نشستی نیز این محدوده ها کاهش می یابند.

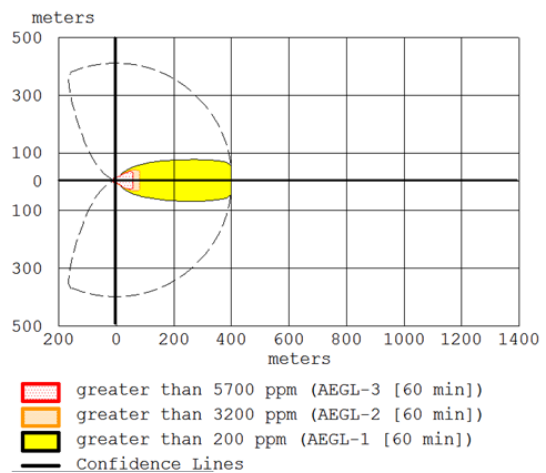
جدول ۷: طول و ارتفاع مواد رها شده در سناریوهای مختلف به تفکیک رده های تراکمی گوناگون (متر)

استون				ماده	سناریو	ناحیه خطر
A-1	A-5	A-10	A-50			
L=ND H=ND	L=ND H=ND	L=۸۰ L=۷۰	۴۰۰ **L= H=۸۰	AEGL-1	>200ppm	
L=ND H=ND	L=ND H=ND	L=ND* H=ND	L=۷۰ H=۷۰	AEGL-2	>3200ppm	
L=ND H=ND	L=ND H=ND	L=ND H=ND	L=۵۰ H=۵۰	AEGL-3	>5700ppm	

ND* (not drawn) : شعاع خطر کمتر از ۱۰ متر

** L و H نیز به ترتیب طول و ارتفاع

نمودار ۵ نتایج حاصل از بررسی سناریوی شماره A-50 برای منبع استون با قطر نشستی ۵۰ میلی متر را نشان می دهد. نتایج نشان داد که یک ساعت پس از رخداد حادثه، محدوده AEGL3 که در آن خطر مرگ وجود دارد شامل فضایی به طول و ارتفاع ۵۰ متر (در جهت باد) خواهد بود. بعلاوه تراکم مواد رها شده تا فضای به طول و ارتفاع ۷۰ متر، بالاتر از محدوده AEGL2 است که می تواند خطر آسیب دایمی و کاهش توانایی های فرد را در پی داشته باشد. در همین مدت محدوده AGEL 1 نیز به فضایی با طول افقی ۴۰۰ متر و ارتفاع ۸۰ متر گسترش خواهد یافت.



نمودار ۵: نمودار انتشار مواد از یک مخزن استون با قطر نشستی ۵۰ میلی متری

همانگونه که در جدول ۸ نیز نشان داده شده است شعاع خطر ناشی از توزیع مواد برای ERPG های مختلف و در سناریوهای گوناگون متفاوت می باشد. بر این اساس این شعاع برای ERPG 3 بیشتر از دو مورد دیگر می باشد.

روش‌های متعددی برای تحلیل و مدل‌سازی علت - پیامد ارائه شده است. Slet و همکاران [57] از دیاگرام بلوک موانع برای بررسی حادثه رهاش هیدروکربن در سکوهای نفتی استفاده کردند. Delvosalle و همکاران [58] از مدل پایبونی BT برای شناسایی سناریوهای فاجعه آمیز در واحدهای فرایندی استفاده کردند. در بین روش‌های تحلیل و مدل‌سازی علت - پیامد، مدل پایبونی BT به خوبی به عنوان یک روش کارآمد اثبات شده است زیرا این روش توانایی ترکیب علل و پیامد یک حادثه را در یک مدل گرافیکی نشان می‌دهد [59].

نتایج اجرای این مدل در مخازن، منجر به شناسایی ۵۰ رویداد ریشه‌ای و ۱۸ رویداد میانی موثر بر نشت استون در مخازن شد. احتمال وقوع رویداد اصلی یعنی نشت استون 0.10097097 محاسبه گردید. در سناریوی نشت استون از مخازن پیامدهای نهایی ناشی از نشت با توجه به اینکه این ماده مطابق دستورالعمل BEVI در گروه مواد قابل اشتعال و فرار قرار می‌گیرد یعنی نقطه اشتعال کمتر از ۲۱ درجه سانتی‌گراد دارد، شامل حریق استخری، آتش ناگهانی، انفجار ابر بخار و رهاش ایمن مواد شیمیایی است. بنابراین در صورت وجود جرقه تاخیری ممکن است آتش ناگهانی یا انفجار رخ دهد. به طور کلی، پس از مشتعل شدن، شعله به استخر مایع برگشته و منجر به حریق استخری می‌شود. در بعضی موارد، به علت تراکم یا اندازه بزرگ ابر بخار قابل اشتعال، شعله با شتاب به سمت جلو حرکت می‌کند که می‌تواند منجر به انفجار شود. در سناریوی نشت استون رویداد آتش استخری به عنوان محتمل‌ترین پیامد نهایی با احتمال 0.010097 در سال شناسایی گردید (جدول ۵). احتمال رویداد انفجار ابر بخار 0.016357 احتمال حریق ناگهانی 0.010905 و احتمال رهاش ایمن مواد شیمیایی 0.090874 می‌باشد.

نقص موانع کنترلی شامل ابر بخار قابل اشتعال، حریق استخری، آتش ناگهانی و رها شدن ایمن مواد شیمیایی می‌باشند. بر اساس مطالعات معیار ارزیابی پیامد حریق میزان، تشعشع ۴ کیلووات بر متر مربع (حد آستانه درد در مدت ۲۰ ثانیه) و ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع (۱۰۰ درصد مرگ در ۱ دقیقه یا ۱ درصد مرگ در ۱۰ ثانیه) می‌باشد. تراکم جمعیت در محوطه مخازن به طور متوسط ۹ نفر می‌باشد. جدول ۱۰ ارزیابی ریسک حریق استخری در محوطه مخازن را نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود بیشترین احتمال مرگ و میر مربوط به حریق استخری با قطر نشستی ۵۰ میلی‌متر با احتمال 3.34 می‌باشد.

جدول ۱۱ نتایج ریسک سناریوی مورد مطالعه را در دو رویکرد ریسک پیشین با روش مدل پایبونی و شبکه‌های بیزین و ریسک پسین یا به روز شده با استفاده از شبکه‌های بیزین نشان می‌دهد. بیشترین عدد ریسک در مدل BT و BN مربوط به سناریو حریق استخری به قطر نشستی ۵۰ میلی‌متر با احتمال 3.3723E-2 و 2.9667E-2 می‌باشد.

بحث

پیش‌بینی دینامیکی ریسک در مخازن یکی از چالش‌های ایمنی در واحد‌های فرایندی است. در تحلیل ریسک دو پارامتر نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند. پارامتر اول احتمال وقوع و پارامتر دوم شدت پیامد است. احتمال وقوع بیانگر تعداد دفعاتی می‌باشد که یک حادثه در بازه زمانی یک سال رخ داده است و شدت پیامد به معنای تعداد تلفات و یا خسارات ناشی از رخداد آن حادثه است.

امروزه بیشترین مطالعات جهت طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی حوادث در صنایع بر روی این مرحله از فرایند مدیریت ریسک تمرکز دارند، چون بعد شدت این حوادث اغلب فاجعه آمیز است و در صورت وقوع حوادث منجر به خسارات مالی، جانی و زیست محیطی جبران ناپذیری بر صنایع می‌شود. بنابراین رویکرد مناسب و کارآمد، تمرکز بر کاهش احتمال وقوع چنین حوادثی است. روش‌های به کار رفته در این مرحله دارای نواقص و محدودیت‌های هستند که می‌توانند در نتایج ارزیابی ریسک بسیار اثرگذار باشند.

جدول ۱۰: نتایج ارزیابی اثرات پیامدهای سناریو مورد مطالعه

پیامد (حریق استخری)	ناحیه تحت تاثیر (مترمربع)	تراکم جمعیت (نفر/مترمربع)	احتمال مرگ و میر	تعداد تلفات
A-50	151976	0.001	0.022	3.34
A-10	128124	0.001	0.0017	0.21
A-5	113354	0.001	0.001	0.11
A-1	68778	0.001	0.0009	0.06

جدول ۱۱: پروفایل ریسک با رویکرد پیشین (BT و BN) و پسین (BN)

ریسک جمعی			مرگ و میر (نفر/ار ویداد)	تکرار پذیری پیامد (رویداد/سال)			پیامد (حریق استخری)
پسین BN	پیشین BN	پیشین BT		پسین BN	پیشین BN	پیشین BT	
3.34E-1	2.9667E-2	3.3723E-2	3.34				A-50
2.1E-2	1.8658E-3	2.1020E-3	0.21				A-10
1.1E-2	9.7735E-3	1.1010E-3	0.11	0.1	0.008885	0.010097	A-5
6E-3	5.3310E-4	6.0058E-4	0.06				A-1

(۸۰ کیلوگرم بر دقیقه) و نشتی ۱ میلی متر کمترین نرخ انتشار (در حد گرم بر دقیقه) بود. اهمیت قطر نشت همراه با فشار درون مخزن، میزان فراریت و خواص ماده می‌تواند بر روی میزان انتشار در گذر زمان نیز موثر باشد. به طوری که برای ماده ی استون، نرخ انتشار پس از ۸ دقیقه به حداکثر مقدار انتشار خود می‌رسند (شکل ۴). مطالعه زارعی و همکاران نیز نشان داد که در مدلسازی پیامد مخازن هیدروژن قطر نشتی مهمترین پارامتر بوده و با افزایش قطر نشتی نرخ انتشار مواد و در نتیجه خطر حریق یا انفجار نیز افزایش یافته است [19] که در تایید نتایج مطالعه حاضر می‌باشد.

برای سناریوی نشتی ۵۰ میلی متر مخزن استون، محدوده خطر مرگ (ERPG1) و محدوده خطر آسیب دائمی و کاهش توانایی های فرد (ERPG2) به ترتیب طول ۵۰ و ۷۰ مترمربع بود. هر چه این فاصله بزرگتر باشد یعنی تا فواصل دورتری از مخزن از نشتی تاثیر پذیرفته و غلظت مواد در این فواصل می‌تواند افراد در معرض را تحت تاثیر قرار دهد. سمیت و ویژگی های مواد نقش بسیار مهمی در تعیین این فواصل دارند، به طوری که در مقادیر ERPG بالاتر، فواصل تاثیر پذیری کمتر می‌شود. نتایج مطالعه مرتضوی و همکاران نشان داد که ERPG1 و ERPG2 برای گاز سمی کلر در فصل تابستان به ترتیب ۱۱ و ۶/۵ کیلومتر بود که ERPG 1,2 برای این ماده به ترتیب ۱ و ۳ پی پی ام می‌باشد. این نتیجه به خوبی نشان دهنده اهمیت تاثیر سمیت ماده بر فواصل تاثیر پذیری می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه آنها نشان داد که این فواصل در فصول تابستان و زمستان متفاوت از یکدیگر است که دلیل آن به پایداری لایه های هوا نسبت داده شده است [60]. تسنگ و همکاران ۲۰۱۲ نیز نشان دادند که در مدلسازی پیامد، پارامترهای سرعت باد، پایداری شرایط جوی و کل زمان انتشار می‌توانند بر روی پراکندگی ابر بخار در سناریوهای مختلف تاثیر گذار باشند [26]. جعفری و همکاران نیز گزارش نموده اند که فاصله تحت تاثیر انفجار گاز هیدروژن در روز بیشتر از شب بوده است [19]. بنابراین می‌توان این پارامترها از جمله پایداری هوا در فصل تابستان، ارزیابی احتمال نشت در هنگام روز و میزان سمیت ناشی از استون را نیز در کسب نتایج مطالعه فعلی موثر دانست.

اگرچه توانایی و قابلیت های ویژه روش پایونی BT در تحلیل کمی ریسک اثبات شده است [46,59]، اما مطالعات جدید نشان می‌دهد که این مدل دارای محدودیت های است. جهت رفع این محدودیت ها در این مطالعه از روش شبکه های بیزین استفاده شد. جدول ۵ نتایج استدلال استقرایی روش پایونی BT و شبکه بیزین BN را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در رویکرد پایونی BT احتمال رخداد رویداد اصلی (TE*) یعنی نشت استون برابر 0.10097097 است. اما نتایج مدل شبکه بیزین BN احتمال رویداد اصلی را 0.08885898 نشان داد که این مقدار کمتر از مقدار بدست آمده در مدل پایونی BT است. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین رویدادهای با علل مشترک باشد که مدل پایونی BT این قابلیت را ندارد. نتایج شبکه های بیزین نشان داد که در سناریوی نشت استون پیامدهای حریق استخری، انفجار ابر بخار، حریق ناگهانی و رهاش ایمن مواد شیمیایی به ترتیب با احتمال رخداد 0.00888589، 0.00159946، 0.00159946 و 0.00266576 به عنوان پیامدهای محتمل ناشی از نشتی استون در مخازن هستند.

یک از ویژگی های منحصر به فرد شبکه های بیزین استدلال قیاسی است. نتایج استدلال قیاسی شبکه های بیزین با به روزسانی شبکه های بیزین در سناریوی نشت استون، احتمال حریق استخری را 0.1 نشان می‌دهد که به عنوان محتمل ترین پیامد ناشی از نشت استون در مخازن شناسایی شد. در هر دو حالت استدلال استقرایی و قیاسی حریق استخری به عنوان رویداد های محتمل ناشی از نشت استون از مخازن شناسایی شدند.

در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار ALOHA، ۸ سناریوی نشتی احتمالی از مخازن نگهداری استون مورد بررسی قرار گرفت و شعاع خطر در فواصل مورد نظر، محدوده ایمن و غلظت استون در زمان های مختلف پس از رهاش به دست آمد.

نتایج نشان داد که میزان رهاش مواد بیشتر از همه پارامترها به قطر نشتی بستگی دارد. بر این اساس هر چه قطر نشتی بیشتر باشد، نرخ انتشار مواد نیز بیشتر و در نشتی های با قطر کمتر نرخ انتشار نیز ناچیز می‌شود. از این رو قطر نشتی ۵۰ میلی متر دارای بیشترین نرخ انتشار

که در این مطالعه در حدود ۲۲۰ متر در جهت باد می‌باشد) می‌بایست نسبت به تخلیه اضطراری افراد از این محدوده در کم‌ترین زمان ممکن اقدام شود. در سطح ۲ که غلظت استون در محدوده ERPG2 است (که در این مطالعه برابر با ۳۱۲ متر می‌باشد) می‌بایست نسبت به آموزش افراد در خصوص خطرات این مواد و استفاده از وسایل حفاظت فردی اقدام شود. برای ERPG1 (که در این مطالعه برابر با ۵۰۰ متر می‌باشد) باید نسبت به آموزش افراد، تاسیس بانک اطلاعاتی افراد (شماره تلفن، محل سکونت و ...) اقدام شود.

به طور کلی میزان تلفات و خسارت‌های ناشی از رهاش و پخش مواد سمی به غلظت ماده سمی و زمان تماس با آن بستگی دارد. یکی از محدودیت این نرم افزار ناتوانی در پیش بینی مقدار دقیق غلظت ماده به خصوص در زمان‌های اولیه بعد از نشتی می‌باشد. از آنجایی که نگهداری این مواد می‌تواند منابع بالقوه خطر باشد، لذا توصیه می‌شود که: حجم مخازن نگهداری و انبارش این مواد کم تر شود، نسبت به بازرسی دوره‌ای از این مخازن جهت آگاهی از هر نوع نشتی و خوردگی بدنه اقدام شود، از قرارگیری مخازن نگهداری این مواد در برابر تابش مستقیم آفتاب و مجاورت با سایر مواد دارای قابلیت اشتعال پرهیز شود، آموزش و آگاهی افراد در مورد خطرات این مواد مدنظر قرار گیرد، هرگونه عملیات در فواصل خطر بدست آمده می‌بایست با در نظر گرفتن آن به عنوان شرایط اضطراری صورت گیرد.

نتیجه گیری

در این مطالعه روشی برای ارزیابی دینامیکی ریسک مخازن با استفاده از مدل سازی به کمک نرم افزار ALOHA و شبکه های بیزین ارائه شد. به منظور شناسایی رویدادهای پایه تاثیرگذار در وقوع رویداد اصلی دیاگرام پاپیونی BT توسط تیمی متشکل از متخصصین ایمنی و واحد مخازن ا ترسیم گردید. به منظور تعیین نرخ شکست احتمال رویداد های ریشه ای شناسایی شده در تجزیه و تحلیل کیفی درخت خطا از پایگاه داده ها استفاده شد. دیاگرام BT در غالب شبکه های بیزین ترسیم شد و استدلال قیاسی و استقرایی بر اساس مدل BN انجام شد.

نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از مدلسازی پیامد، حریم خطر و رهاش مواد شیمیایی از نشت مخزن استون و متیل استات را به خوبی پیش بینی کرده، سطوح اضطرار را مشخص نمود. همچنین می‌توان با استفاده از راهکارهای مناسب از بروز خسارت یا آسیب انسانی و زیست محیطی در این محدوده‌ها پیشگیری نمود. با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی پیامد می‌توان از آن به عنوان یک ابزار مناسب در برنامه های پاسخ در شرایط اضطراری استفاده نمود.

نتایج نشان داد که در قطر نشتی بیشتر تشع حرارتی در فواصل نزدیکتر داری قابلیت کشندگی، و در فواصل دورتر از آن نیز داری قابلیت سوزاندگی و ایجاد درد را دارا هستند. برای سناریوهای با قطر نشت پایین این فواصل قابل ملاحظه نیستند (جدول ۹). از قطر نشتی (که بیشتر توضیح داده شد)، ماهیت مواد (قابلیت انفجار و اشتعال)، شرایط آب و هوایی، نرخ انرژی منتشر شده (بر حسب کیلو وات) و غیره می‌توان به عنوان عوامل تاثیر گذار بر تاثیرپذیری فواصل اشاره نمود [28,19]. اهمیت تعیین این فواصل در این است که در صورت قرار گیری افراد در این فواصل احتمال آسیب ناشی از گرمای تابشی و در صورت وجود منابع قابل اشتعال یا انفجار احتمال وقوع حریق یا انفجار افزایش می‌یابد.

روش تحلیل کمی ریسک یک روش قوی برای تخمین ریسک است، این روش جزء معدود روش‌های است که ریسک را به صورت ریسک فردی و ریسک جمعی بیان می‌کند [61]. در این مطالعه جهت ارزیابی ریسک از معیار ریسک انگلستان که کاربرد بیشتری در مطالعات ریسک داخلی و خارجی دارد استفاده شد. بر اساس این معیار، ریسک قابل قبول برابر 10^{-6} ، قابل تحمل برابر 10^{-5} و ریسک غیر قابل قبول 10^{-4} می‌باشد [62].

جدول ۱۱ نتایج تخمین ریسک را با دو رویکرد پاپیونی BT و شبکه بیزین BN نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود عدد ریسک برآورد شده توسط شبکه بیزین BN کمتر از روش پاپیونی BT است. تفاوت بین نتایج شبکه‌های بیزین و مدل پاپیونی به خاطر ویژگی‌های شبکه‌های بیزین از جمله، در نظر گرفتن رویدادهای با علل مشترک، وابستگی شرطی بین رویدادها و موانع ایمنی و برخورداری از جداول احتمال شرطی در شبکه‌های بیزین می‌باشد که این توانایی در مدل پاپیونی وجود ندارد.

در سناریو A-50 ریسک جمعی مخازن نسبت به سایر سناریوها بستر است. در تمامی سناریوها در محدوده غیر قابل قبول قرار دارند بنابراین می‌بایست توجه نمود که قرارگیری افراد یا مواد خطرناک در این محدوده ها می‌تواند منجر به آسیب‌های بهداشتی و اقتصادی گردد. لذا مهم است که فواصل به دست آمده در برنامه‌های شرایط اضطراری نیز گنجانده و مورد توجه قرار گیرند. به ویژه در زمانی که طراحی‌های بعدی صورت می‌گیرد می‌توان از این نتایج برای جانمایی مخازن به خوبی استفاده نمود. بنابراین اهمیت قرارگیری اپراتورها، پرسنل و ساختمان‌های اداری، پرسنل مراقبت و نگهداری، جمعیت عمومی جامعه می‌بایست در طراحی این مخازن مد نظر قرار گیرد. براون و همکاران نیز داشتن طرح و برنامه ریزی جهت آمادگی افراد و واکنش در شرایط اضطراری و طبقه بندی مناطق و افراد براساس موقعیت قرارگیری، جهت اولویت بندی اجرای برنامه‌های سازمان‌های دخیل را توصیه نموده‌اند [23]. بنابراین در محدوده ERPG3 و بالاتر

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح مصوب شورای پژوهشی کمیته پژوهشی دانشجویان دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی به شماره ثبت ۳۳۸۱ می باشد. از کمیته پژوهشی دانشجویان، و معاونت تحقیقات و فن آوری دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی برای حمایت مالی از این مطالعه قدردانی می‌شود.

مراجع

- [15]. Torres-Toledano JG, Sucar LE, editors. Bayesian networks for reliability analysis of complex systems. Ibero-American Conference on Artificial Intelligence; 1998: Springer.
- [16]. Boudali H, Duga J, editors. A new Bayesian network approach to solve dynamic fault trees. Reliability and Maintainability Symposium, 2005 Proceedings Annual; 2005: IEEE.
- [17]. Bearfield G, Marsh W, editors. Generalising event trees using Bayesian networks with a case study of train derailment. International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security; 2005: Springer.
- [18]. Zarei E, Jafari M, Dormohammadi A, Sarsangi V. The Role of Modeling and Consequence Evaluation in Improving Safety Level of Industrial Hazardous Installations: A Case Study: Hydrogen Production Unit. Iran Occupational Health. 2014;10(6):52-63.
- [19]. Zarei E, Jafari MJ, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. Journal of research in health sciences. 2013;13(2):181-7.
- [20]. Jafari MJ, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. international journal of hydrogen energy. 2012;37(24):19241-9.
- [21]. Srivastava S, Sinha IN, editors. Classification of air pollution dispersion models: a critical review. National Seminar on Environmental Engineering with special emphasis on Mining Environment-NSEEME; 2004.
- [22]. Perry RW, Lindell MK. Preparedness for emergency response: guidelines for the emergency planning process. Disasters. 2003;27(4):336-50.
- [23]. Brown DF, Dunn WE. Application of a quantitative risk assessment method to emergency response planning. Computers & Operations Research. 2007;34(5):1243-65.
- [24]. Cheng C-W, Leu S-S, Cheng Y-M, Wu T-C, Lin C-C. Applying data mining techniques to explore factors contributing to occupational injuries in Taiwan's construction industry. Accident Analysis & Prevention. 2012;48:214-22.
- [25]. Shao H, Duan G. Risk Quantitative Calculation and ALOHA Simulation on the Leakage Accident of Natural Gas Power Plant. Procedia Engineering. 2012;45:352-9.
- [26]. Tseng J, Su T, Kuo C. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. Procedia Engineering. 2012;45:384-9.
- [27]. Gharabagh MJ, Asilian H, Mortasavi S, Mogaddam AZ, Hajizadeh E, Khavanin A. Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines. Journal of Loss Prevention in the process Industries. 2009;22(4):533-9.
- [28]. Li S, Sun X, Liu L. The ALOHA-based Consequence Analysis of Liquefied Ammonia Leakage Accident. Advances in Biomedical Engineering. 2012;6:522-26.
- [29]. El Harbawi M, Mustapha S, Choong TSY, Rashid SA, Kadir S, Rashid ZA. Rapid analysis of risk assessment using developed simulation of chemical industrial accidents software package. International Journal of Environmental Science & Technology. 2008;5(1):53-64.
- [30]. Markowski AS, Kotynia A. "Bow-tie" model in layer of protection analysis. Process Safety and Environmental Protection. 2011;89(4):205-13.
- [31]. Ouache R, Adham A. Reliability quantitative risk assessment in engineering system using fuzzy bow-tie. Int J Curr Eng Technol. 2014;4(2):1117-23.
- [32]. de Ruijter A, Guldenmund F. The bowtie method: A review. Safety science. 2016;88:211-8.
- [1]Crowl DA, Louvar JF. Chemical process safety: fundamentals with applications: Pearson Education; 2001.
- [2].Khan FI, Abbasi S. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. Journal of Loss Prevention in the process Industries. 1999;12(5):361-78.
- [3].Binder D. Emergency Action Plans: A Legal and Practical Blueprint Failing to Plan Is Planning to Fail. U Pitt L Rev. 2001;63:791.
- [4].Muller C, Christie C, Stewart JW. Preventing a Toxic Chemical Disaster: RMPs in Theory and in Practice 2010. Available from: <http://www.purafil.com/PDFs/technical%20papers/water-wastewater/Preventing%20a%20Toxic%20Chemical%20Disaster%20-%20RMPs%20in%20Theory%20and%20in%20Practice.pdf>.
- [5].Zarei E, Jafari M, Dormohammadi A, Sarsangi V. The role of modeling and consequence evaluation in improving safety level of industrial hazardous installations: a case study: hydrogen production unit. Iran Occupational Health. 2013;10(6).
- [6].Marhavilas P-K, Koulouriotis D, Gemeni V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011;24(5):477-523.
- [7].Khan FI, Sadiq R, Husain T. Risk-based process safety assessment and control measures design for offshore process facilities. Journal of hazardous materials. 2002;94(1):1-36.
- [8].Khakzad Rostami N. Dynamic safety analysis using advanced approaches: Memorial University of Newfoundland; 2012.
- [9].Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. Reliability Engineering & System Safety. 2001;71(3):249-60.
- [10].Simon C, Weber P, Levrat E. Bayesian networks and evidence theory to model complex systems reliability. Journal of Computers (JCP). 2007;2(1):33-43.
- [11].Ferdous R, Khan F, Veitch B, Amyotte PR. Methodology for computer aided fuzzy fault tree analysis. Process safety and environmental protection. 2009;87(4):217-26.
- [12]. Kavčič M, Juričić Da. CAD for fault tree-based diagnosis of industrial processes. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2001;14(2):203-16.
- [13]. Apostolaksi G. Probability and risk assessment: the subjectivistic viewpoint and some suggestions. Nuclear Safety. 1978;19(3):305-15.
- [14]. Siu NO, Kelly DL. Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment. Reliability Engineering & System Safety. 1998;62(1-2):89-116.

- [48]. Cozzani V, Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;107(3):67-80.
- [49]. Assael MJ, Kakosimos KE. Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis: CRC Press; 2010.
- [50]. Green-Book T. Method for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials. CPR 16E, TNO–The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research. 1992.
- [51]. Zarei E, Jafari MJ, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. 2013.
- [52]. AIChE C. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. New York, NY. 2000.
- [53]. Howard WL. Acetone. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 2000.
- [54]. (RIVM) NIOPHatE, Safety CfE. Reference Manual Bevi Risk Assessments Introduction. Version 3.2 ed2009.
- [55]. Vilchez JA, Espejo V, Casal J. Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011;24(3):281-7.
- [56]. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of hazardous materials*. 2017;321:830-40.
- [57]. Sklet S. Comparison of some selected methods for accident investigation. *Journal of hazardous materials*. 2004;111(1-3):29-37.
- [58]. Delvosalle C, Fievez C, Pipart A, Debray B. ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;130(3):200-19.
- [59]. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012;104:36-44.
- [60]. Mortazavi SB, Parsarad M, Asilian Mahabadi H, Khavanin A. Evaluation of chlorine dispersion from storage unit in a petrochemical complex to providing an emergency response program. *Iran Occupational Health Journal*. 2011;8(3):68-77.
- [61]. Vinnem J, Bye R, Gran B, Kongsvik T, Nyheim O, Okstad E, et al. Risk modelling of maintenance work on major process equipment on offshore petroleum installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2012;25(2):274-92.
- [62]. Jones D, Berger S, editors. How to Select Appropriate Quantitative Safety Risk Criteria Applications from the Center for Chemical Process
- [33]. Abdelgawad M, Fayek AR. Fuzzy reliability analyzer: quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault-tree analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2010;137(4):294-302.
- [34]. Safety CfCP. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis: Center for Chemical Process Safety/AIChE; 2000.
- [35]. Participants O. OREDA Offshore Reliability Data Handbook. DNV, PO Box; 2002.
- [36]. Khosravirad F, Zarei E, Mohammadfam I, Shoja E, Majidi Daryani M. Explosion risk analysis on Town Border Stations (TBS) of natural gas using Failure Mode & Effect Analysis (FMEA (and Fault Tree Analyses (FTA (methods. *Iran Occupational Health*. 2016;12(6):16-27.
- [37]. rahimi r, Mohammadfam I, varshosaz k. Fuel oil tank explosion risk assessment using fault tree analysis. the 2nd conference on environmental planing and management2012.
- [38]. Tan Q, Chen G, Zhang L, Fu J, Li Z. Dynamic accident modeling for high-sulfur natural gas gathering station. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(6):565-76.
- [39]. Rajakarunakaran S, Kumar AM, Prabhu VA. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015;33:109-23.
- [40]. Miri Lavasani M, Wang J, Yang Z, Finlay J. Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines. *International Journal of MARine Science and Engineering*. 2011;1(1):29-42.
- [41]. Jensen FV. An introduction to Bayesian networks: UCL press London; 1996.
- [42]. Nielsen TD, Jensen FV. Bayesian networks and decision graphs: Springer Science & Business Media; 2009.
- [43]. Kjaerulff UB, Madsen AL. Bayesian networks and influence diagrams. Springer Science+ Business Media. 2008;200:114.
- [44]. Nielsen TD, Jensen FV. Bayesian networks and decision graphs. 2009.
- [45]. Zerrouki H, Smadi H. Bayesian belief network used in the chemical and process industry: a review and application. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017;17(1):159-65.
- [46]. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 2013;91(1-2):46-53.
- [47]. Bruckner JV, Keys DA, Fisher JW. The Acute Exposure Guideline Level (AEGl) program: applications of physiologically based pharmacokinetic modeling. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2004;67(8-10):621-34.