مدل‌سازی و ارزیابی ریسک مخزن آمونیاک پتروشیمی مسجد سلیمان

مریم کاویان‌پور[۱]، نعیمه ستاره‌شناس[۲]، یاسر احمدی[۳]، محسن منصوری[۴،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:

پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:

ارزیابی پیامد، رهایش، نرم افزار PHAST، مخزن آمونیاک

چکیده

صنعت پتروشیمی به دلیل ماهیت پرخطر خود، مستعد وقوع حوادثی با پیامدهای جانی و مالی جبران‌ناپذیر است. این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک و تحلیل پیامدهای حوادث در واحد ذخیره‌سازی آمونیاک انجام شده است. مخزن مورد مطالعه با ظرفیت ۳۱۰۰ مترمکعب، دمای عملیاتی ۴/۳۴ درجه سانتیگراد، فشار ۰/۰۰۸ مگاپاسکال و ارتفاع ۲۷ متر، حاوی آمونیاک مایع است. از نرم‌افزار PHAST برای مدلسازی چهار سناریوی بحرانی شامل انفجار، حریق استخری، پخش بخار سمی و جت فایر استفاده (مخزن TK-۵۰۰۱) شد. پارامترهای مدل‌سازی شامل نشتی افقی ۲ اینچی در ارتفاع ۱ متری برای تعیین منطقه آتش، سطوح تابش گرمایی ۴ و ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع، سطوح فشار ناشی از انفجار (۰/۲، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار) و غلظت بحرانی بخار سمی (IDLH) معادل ۳۰۰ ppm در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد شعاع ایمن برای سناریوهای پخش بخار سمی، حریق استخری، انفجار و جت فایر به ترتیب ۴۰۸، ۸۹، ۱۱۳ و ۱۲۰ متر است. این یافته‌ها امکان تعیین دقیق مناطق آسیب‌پذیر و تعیین دامنه ایمن عملیاتی را فراهم می‌کند. مدل‌سازی پیامدها با PHAST اثربخشی بالایی در پیش‌بینی محدوده خطر و تدوین سیاست‌های پیشگیرانه مانند مدیریت فاصله ایمنی، بهینه‌سازی طراحی تجهیزات و آموزش پرسنل دارد. این مطالعه بر ضرورت تلفیق روش‌های تحلیلی نوین با استانداردهای ایمنی برای کاهش خسارات در صنایع پتروشیمی تاکید می‌کند.

۱-مقدمه

مواجهه شغلی با مواد شیمیایی خطرناک، همواره به عنوان تهدیدی جدی برای سلامت و ایمنی نیروی کار مطرح بوده که می‌تواند با سرعتی غیرمنتظره، پیامدهایی فاجعه‌بار از جمله آسیب‌های جبران‌ناپذیر سلامتی، ناتوانی در خروج از محیط آلوده و حتی مرگ را به دنبال داشته باشد [۱]. برای مدیریت این خطرات فوق‌العاده و طراحی سیستم‌های حفاظتی کارآمد، شناخت مرزهای بحرانی آلودگی ضروری است. در این راستا، مفهوم حد مجاورت فوری با خطر برای زندگی یا سلامتی (IDLH)[۲] توسط موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا تعریف شده است. مقادیر IDLH بیانگر آن دسته از شرایط آلودگی هوایی هستند که حتی یک مواجهه کوتاه‌مدت (معمولاً در حد چند دقیقه) می‌تواند منجر به مرگ، اثرات سلامت دائم و ناتوان‌کننده، یا از دست دادن قدرت قضاوت و فرار از محیط گردد [۱،۲].

آمونیاک به شکل مایع اشباع شده، می‌تواند تحت فشار، تبرید یا هر دو وجود داشته باشد. این ماده علاوه بر سمیت قابلیت اشتعال‌پذیری و پتانسیل انفجاری نیز دارد. نکته قابل توجه این است که حوادث گذشته در ایالات متحده در طول دو دهه گذشته ۱۶ مورد مرگ و میر را گزارش کرده است که عمدتاً به پارگی مخازن ذخیره‌سازی آمونیاک نسبت داده شده است. به طور مشابه، چین بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ شاهد ۸۲ حادثه مرتبط با تبرید آمونیاک بود که منجر به ۱۸۹ مورد مرگ و میر و ۱۰۸۱ مورد جراحت شد که همگی ناشی از پارگی خط لوله تبرید آمونیاک بودند [۳،۴]. بنابراین ارزیابی پیامدهای انتشار آمونیاک و ایجاد مناطق ایمنی در واحدهای صنعتی

*پست الکترونیک نویسنده مسئول m.mansouri@ilam.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

[2] IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health)

UNCORRECTED PROOF

که از این ماده استفاده می‌کنند برای کاهش خطرات عملیاتی بسیار مهم است.

با توجه به اهمیت ایمنی در صنایع پتروشیمی و نفت و گاز، مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی ریسک و مدلسازی خطرات مخازن ذخیره‌سازی انجام شده است. در این راستا، شبیه‌سازی حوادث مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی همچون PHAST به یکی از روش‌های محبوب برای بررسی اثرات و پیامدهای ناشی از حریق، انتشار و انفجار مواد قابل اشتعال و سمی می‌باشد. این نرم‌افزار قادر به مدلسازی مراحل مختلف رهایش مواد (اعم ازخالص یا مخلوط) در محیط شامل تخلیه، تبخیر از حوضچه‌های مایع و در نهایت پخش مواد می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط یانگ و لام [۵] انجام شد، خطرات بالقوه مرتبط با مخازن ذخیره‌سازی گازهای مایع بررسی شد و نتایج نشان داد که بیشترین میزان خطر در اثر نشت آمونیاک و آتش‌سوزی ناشی از این مواد رخ می‌دهد. همچنین، رامپراساد و گاونکار [۶] مدل‌سازی پخش گازهای خطرناک و ارزیابی پیامدهای آن را در شرایط مختلف جوی و با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند PHAST انجام دادند که نتایج آن به شناسایی نقاط بحرانی و مناطق نیازمند اقدامات ایمنی ویژه منجر شد. سالوآ و همکاران [۴] در تحقیقی مشابه به بررسی خطرات مربوط به انفجار و آتش‌سوزی در پالایشگاه‌های پتروشیمی پرداخته‌اند و نشان دادند که شبیه‌سازی‌های پیشرفته با ابزارهایی چون PHAST می‌توانند به طور چشمگیری خطرات بالقوه را کاهش دهند و از وقوع حوادث بزرگ جلوگیری کنند. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط قیصر [۸] ، مدل‌سازی ایمنی در مخازن ذخیره‌سازی آمونیاک با تأکید بر ارزیابی ریسک و پیاده‌سازی اقدامات پیشگیرانه مورد بررسی قرار گرفت و توصیه‌هایی برای بهینه‌سازی طراحی مخازن و کاهش خطرات ارائه شد. مطالعه پاسکولسکو و همکاران [۹] و پاندیا و همکاران [۱۰] بر اهمیت طراحی صحیح و ارزیابی خطرات با استفاده از نرم‌افزارهایی همچون PHAST تأکید می‌کنند و بر لزوم نظارت مستمر بر فرآیندهای ذخیره‌سازی مواد خطرناک به ویژه آمونیاک و سایر گازهای سمی تأکید دارند.

ناکیای و همکاران [۲] ارزیابی ریسک نشت آمونیاک در کارخانه یخ سازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج، ۲۲ سناریوی بالقوه را که در نشت آمونیاک نقش داشتند، شناسایی کرد. هنگام اولویت‌بندی این سناریوها، تجمع گرد و غبار و گرفتگی فن، لوله‌های انتقال آمونیاک بدون عایق، انسداد کویل به دلیل رسوب‌گذاری، موتور بلبرینگ شفت نادرست و استفاده از روان‌کننده‌های غیر مقاوم در برابر حرارت، عوامل مؤثر قابل توجهی بودند. تحلیل ارزیابی ریسک، ریسک متوسط و بالای نشت آمونیاک را نشان داد. استفاده از یاتاقان نادرست و روان‌کننده غیر مقاوم در برابر حرارت در پمپ‌ها به عنوان ریسک بالا شناسایی شد. برای کاهش این ریسک، لازم است یاتاقان‌ها با یاتاقان‌های استاندارد جایگزین شوند و از روان‌کننده‌های مقاوم در برابر حرارت استفاده شود تا از خرابی پمپ جلوگیری شود و ناکارآمدی‌های خنک‌کننده که می‌تواند منجر به نشت آمونیاک شود، کاهش یابد. داناسا و همکاران [۳] مدل‌سازی سناریوهای انتشار آمونیاک، فرار از تأسیسات ذخیره‌سازی، صنعت کود اوره واقع در اندونزی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که انتشار آمونیاک تأثیر قابل توجهی بر مساحت ۴۱.۷ کیلومتر مربع دارد و به طور بالقوه جمعیت عظیمی از ساکنان را با ضریب تخلیه بالا و جمعیت آسیب‌دیده کمتر تهدید می‌کند. بدترین حالت در شب رخ می‌دهد، زیرا جو بسیار پایدار مانع از اختلاط عمودی هوا و ابر آلاینده می‌شود .این خطر به عنوان خطر بالا در نظر گرفته شد. ارزیابی پیامد انتشار آمونیاک بی‌آب توسط نامبوتیری و سومان [۴] مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ارزیابی پیامد انتشار آمونیاک بی‌آب از یک مرکز ذخیره‌سازی انجام و استراتژی کاهش تدوین گردید .یک انتشار تصادفی فرضی آمونیاک از یک مرکز ذخیره‌سازی در یک صنعت فرآوری شیمیایی فرض شد .تبخیر حوضچه آمونیاک تشکیل شده توسط انتشار تخمین زده و پراکندگی آمونیاک مشخص گردید .سه سرعت باد مختلف برای تجزیه و تحلیل پیامدها را در نظر گرفتند. احتمال مرگ افراد ساکن در منطقه تهدید با استفاده از تحلیل پروبیت تخمین زده شد .یک استراتژی کاهش بر اساس اصل جذب با استفاده از نانوذرات کربن اصلاح شده تدوین شد. یانگ و لام [۱۱] ارزیابی خطر عملیات سوخت‌گیری آمونیاک در مقیاس‌های انتشار کوچک، متوسط و بزرگ مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ارزیابی پیامد بر روی عوامل تأمین، انتشار و هواشناسی سوخت‌گیری آمونیاک انجام گرفت .نتایج آنها نشان داد

UNCORRECTED PROOF

که سرعت باد مهم‌ترین عامل در انتشارهای کوچک و متوسط است، در حالی که قطر شلنگ مهم‌ترین عامل در انتشارهای بزرگ است .تحت ورودی‌های داده شده، تغییر ۵۰ درصدی در سرعت باد توانست تا ۱۰۰ درصد تغییر در حداکثر ردپای ابر ۱۱۰۰ ppm برای انتشارهای کوچک و ۶۶۳ درصد تغییر برای انتشارهای متوسط داشته باشد .به طور مشابه، تغییر ۵۰ درصدی در قطر شلنگ منجر به تغییر ۱۶۸۹ درصدی در حداکثر ردپای ابر ۱۱۰۰ ppm برای انتشارهای بزرگ گردید.

این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از شبیه‌سازی‌ها و مدل‌های ریاضی ارزیابی دقیقی از شدت حوادث را در صورت وقوع ارائه می‌دهد و به جلوگیری از وقوع آنها و کاهش خسارت‌های جانی و مالی منجر می‌گردد. به ویژه، توجه به فرآیندهای ذخیره‌سازی مواد خطرناکی مانند آمونیاک می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت ایمنی ایفا کند.

اغلب پژوهش‌های پیشین بر مخازن تحت فشار بالا یا دمای محیط متمرکز بوده‌اند. این تحقیق به طور خاص به ارزیابی ریسک مخزن آمونیاک با فشار ناچیز نزدیک به شرایط اتمسفریک ولی با حجم بسیار بالا می‌پردازد که الگوهای پخش و تبخیر ماده در آن متفاوت و کمتر مطالعه شده است. همچنین در بسیاری از تحقیقات گذشته تنها یک یا دو سناریوی حریق یا انتشار سمی را بررسی کرده‌اند، این مطالعه به طور همزمان چهار سناریوی بحرانی و متقابل (پخش بخار سمی، انفجار، حریق استخری و جت فایر) از یک منبع نشتی واحد را شبیه‌سازی و مقایسه کرده است. این رویکرد یکپارچه، درک واقع‌بینانه‌تری از حدود مناطق خطر و تداخل آنها ارائه می‌دهد.

در پژوهش حاضر مخزن آمونیاک (TK-5001) پتروشیمی مسجد سلیمان با مشخصات عملیاتی منحصربه‌فرد (ظرفیت ۳۱۰۰ مترمکعب، فشار عملیاتی پایین ۰.۰۰۸ مگاپاسکال و دمای ۳۴.۴ درجه سانتیگراد) جهت مطالعه شبیه سازی با استفاده از نرم افزار PHAST مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه مستقیماً ناظر بر واقعیات یک دارایی حیاتی در صنعت پتروشیمی ایران است و مدل‌سازی آن با در نظر گرفتن شرایط جوی و جغرافیایی محل انجام شده است. بنابراین دستاوردهای آن شامل پیشنهادهای اجرایی مانند مدیریت فاصله ایمنی، بهینه‌سازی طراحی و برنامه آموزش پرسنل، مبتنی بر داده‌های عینی و منطبق بر نیازهای واحد مورد مطالعه است و می‌تواند به عنوان یک مطالعه موردی معیار برای سایت‌های مشابه در کشور مورد استناد قرار گیرد.

۲- تعیین سناریو

با توجه به برگه اطلاعات ایمن[1] آمونیاک (گاز سمی، قابل اشتعال و انفجار) سناریوهای مورد نظر جهت مدل‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

سناریو ۱- به دلیل نشتی از مخزن TK-5001 ذخیره سازی آمونیاک (مشخصات جدول ۱) مواد فرار تبخیر شده و ابر بخار سمی در محیط پراکنده می‌شود. هدف از شبیه سازی این سناریو محاسبه فاصله جهت شناسایی حداقل غلظت خطر آفرین جهت سلامت انسان می‌باشد.

سناریو ۲- مخزن TK-5001 ذخیره سازی آمونیاک به دلیل خوردگی در نقاط پایینی دچار نشتی شده و پس از مدتی بعد از خروج ماده و رهایش در محیط و وجود جرقه، آتش به صورت استخری به وجود می‌آید. هدف از شبیه سازی این سناریو محاسبه تشعشعات ساطع شده از حریق به صورت استخری می‌باشد.

سناریو ۳- مخزن شماره TK-5001 ذخیره سازی آمونیاک به دلیل خوردگی، دچار نشتی شده و به دلیل وجود جرقه و عدم عملکرد صحیح لایه‌های ایمنی تعریف شده، دچار انفجار می‌گردد. هدف از شبیه سازی این سناریو محاسبه حداقل فاصله ایمن از تاسیسات خطرناک و طبقه‌بندی مناطق خطرناک می‌باشد.

سناریو ۴- در مخزن TK-۵۰۰۱ ذخیره سازی آمونیاک، به دلیل خوردگی و سوراخ شدن قسمت های پایینی و افزایش فشار بخار و وجود جرقه آتش از نوع جت فایر، به وجود می‌آید. هدف از شبیه سازی این سناریو، محاسبه تشعشعات ساطع شده، از آتش به صورت جت فایر می‌باشد. شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه برای سناریوهای مطرح شده در جدول ۲ آمده است.

[1]MSDS (Material Safety Data Sheet)

UNCORRECTED PROOF

جدول ۱. مشخصات مخزن آمونیاک پتروشیمی مسجد سلیمان

کاربری	ذخیره سازی آمونیاک
نوع سقف	محدب گنبدی[1]
سیال	آمونیاک مایع
چگالی سیال	۶۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب
دمای عملیاتی	۳۴.۴- درجه سانتی‌گراد
فشار عملیاتی	۰.۰۰۳ تا ۰.۰۰۸ مگاپاسکال گیج
دمای طراحی	۴۰- تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد
فشار طراحی	۰.۰۰۰۵ تا ۰.۰۱۵ مگاپاسکال گیج
حجم مخزن	۳۵۰۰ متر مکعب
حجم عملیاتی مخزن	۳۱۰۰ متر مکعب
ابعاد مخزن (میلی متر)	۴۰۷۰۰ (قطر) در ۲۷۰۰۰ (ارتفاع)

جدول ۲. شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه

دمای تر در تابستان	۲۸ درجه سانتی گراد
دمای خشک در تابستان	۴۴ درجه سانتی گراد
ماکزیمم رطوبت	۸۰ درصد در ۳۱ درجه سانتی گراد
مینیمم رطوبت	۱۵ درصد
رطوبت نسبی	۵۰ درصد
دما و رطوبت جهت طراحی	۳۱ درصد در ۴۴ درجه سانتی‌گراد
فشار طراحی	۸۴۰ میلی بار
میانگین سرعت باد	۲۰ کیلومتر بر ساعت
سطح تشعشع خورشید	۰.۹۸ کیلووات بر متر مربع
پایداری جوی پاسکویل	آفتابی و مقداری بادی (سطح A/B پاسکویل)
جهت وزش باد	از سمت شمال شرقی و شمال

۲- ۱- طبقه‌بندی مناطق خطرناک

گازها و بخارات قابل اشتعال و گرد و غبار قابل احتراق در صورت انتشار در جو ممکن است مشتعل شوند. یک مطالعه طبقه‌بندی منطقه خطرناک شامل تجزیه و تحلیل مورد نیاز برای به حداقل رساندن اشتعال‌پذیری مواد قابل اشتعال می‌شود. در حالی که نقشه‌های طبقه‌بندی مناطق خطرناک اغلب به عنوان بخشی از یک پروژه طراحی تاسیسات ایجاد می‌شوند، بسیاری از جزئیات به صورت بهینه مستند نمی‌شوند. طراحان کارخانه‌جات اغلب از مفروضات محافظه کارانه استفاده می‌کنند. این رویکرد محافظه کارانه اغلب به تجهیزاتی با درجه بالاتر از استانداردهای مناسب نیاز دارد که منجر به افزایش هزینه در طول ساخت و همچنین هزینه های عملیاتی اضافی در طول عمر تاسیسات می‌شود. مطالعه طبقه‌بندی مناطق خطرناک برای ارزیابی نواحی مختلف تاسیسات براساس وجود مواد قابل اشتعال انجام می‌شود. مطالعه طبقه‌بندی مناطق خطرناک جزئیات مناطق خطرناک و غیر خطرناک را در تاسیسات ارائه می‌دهد. برای انجام این گونه مطالعات از دو سیستم کلاس‌بندی یا تقسیم‌بندی (کلاس I، کلاس II و کلاس III) و دیگری سیستم منطقه‌بندی استفاده می‌شود.

هدف اساسی از انجام مطالعه طبقه‌بندی مناطق خطرناک، جلوگیری از حضور منابع اشتعال مانند دستگاه های الکتریکی در مناطق خطرناک است. اگر تجهیزات الکتریکی در محلی وجود داشته باشد که امکان حضور مداوم یا متناوب مایع یا بخار مواد قابل اشتعال وجود داشته باشد، گرد و غبار قابل احتراق منجر به آتش سوزی و انفجار می‌شود. این مناطق به راحتی توسط این مطالعه شناسایی و طبقه‌بندی می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

نتایج به تفکیک سناریوهای مطرح شده تحلیل خواهد شد. لازم به ذکر است در تمامی نمودارهای خروجی نرم افزار به صورت گراف، جهت پیش فرض شمال در سمت چپ نمودار می‌باشد. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به آب و هوا جهت بررسی سناریوها در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به اهمیت شرایط آب و هوایی در اثرگذاری حادثه، وضعیت جوی منطقه در نرم افزار وارد می‌شود. اطلاعات مورد نیاز نرم افزار در بخش شرایط جوی شامل سرعت باد، پایداری پاسکویل، درجه حرارت جوی، رطوبت نسبی، سطح تشعشعات خورشیدی و درجه حرارت سطح مخزن می‌باشد.

جدول ۳. شرایط آب و هوایی جهت بررسی سناریوها

پارامتر	مقدار
سرعت باد	۲۰ کیلومتر بر ساعت
پایداری پاسکویل	A/B
دمای جوی فصل گرم	۴۴ درجه سانتی‌گراد
دمای جوی فصل سرد	۲۲ درجه سانتی‌گراد
رطوبت جوی	۵۰ درصد
سطح تشعشع خورشیدی	۰.۹۸ کیلووات بر متر مربع

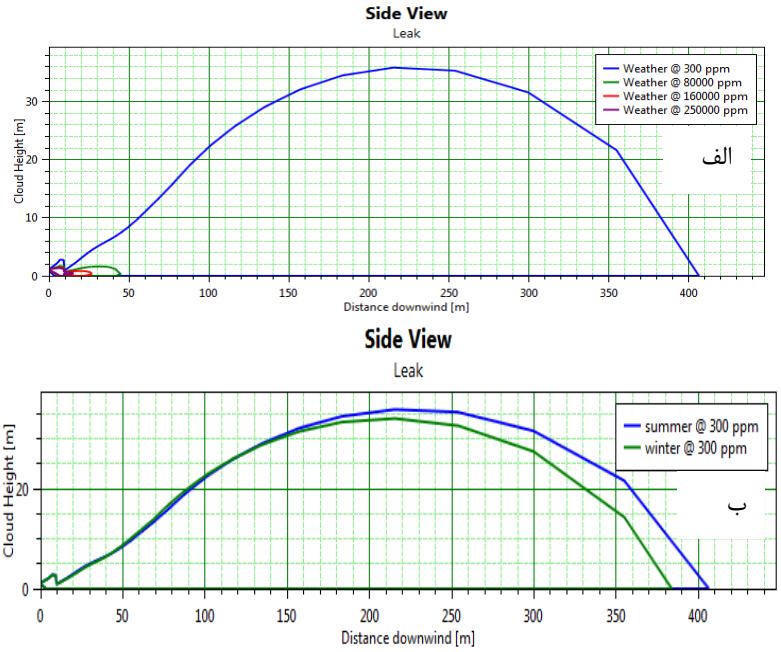
[1]Dome

UNCORRECTED PROOF

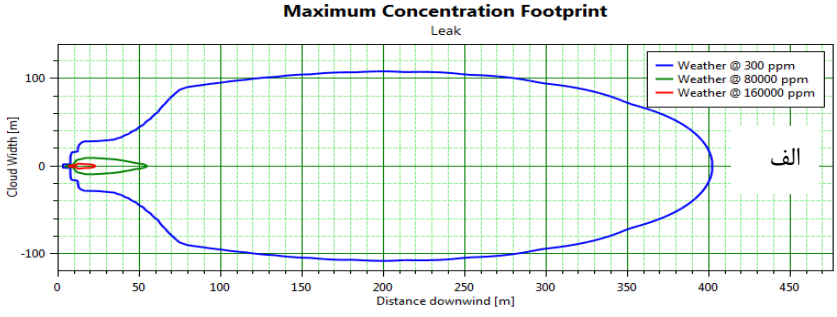
۳-۱- سناریو پخش ابر سمی

با توجه به نمای کنار پخش مخلوط بخار سیال در شکل ۱ سناریویی در قالب پخش ابر بخار سمی به این شکل ارائه شده است. مفهوم این نمودار به این معناست که اگر در مخزن نشتی به وجود آمده باشد، مخلوط بخار مواد سمی تا چه شعاعی از مخزن منتشر خواهد شد. همانطور که در شکل پیداست در صورت نشتی، مخلوط به شکل شبه کروی پخش خواهد شد و این انتشار به عواملی مانند قطر نشتی (۲۵۰ میلی‌متر)، سرعت باد، فراریت سیال، چگالی سیال و... بستگی دارد. نرم افزار با توجه به غلظت بحرانی و خطرناک ماده سمی، غلظت‌های بحرانی با واحد ppm برای تعیین محدوده خطر مخزن مشخص کرده است. در صورت عبور سیال منتشر شده از غلظت 300 ppm در فاصله طولی بیشتر از ۴۰۸ متر و ارتفاع ۳۶ متری از محل نشتی در مخزن، سلامت انسان به خطر نخواهد افتاد.

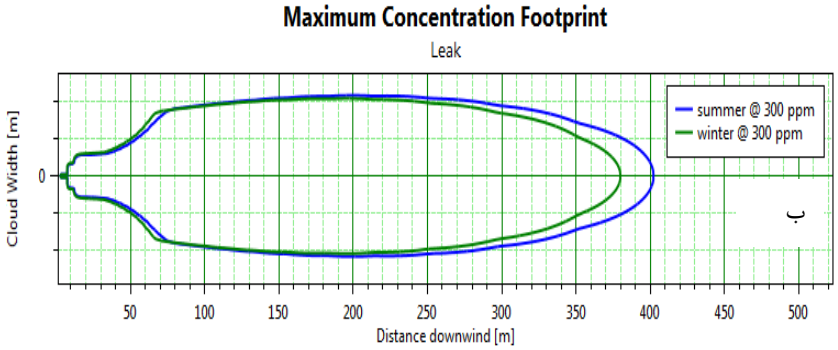
شکل شماره ۲ نمای بالایی پخش ابر بخار سمی سیال منتشر شده از مخزن شبیه سازی شده توسط نرم افزار را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه نمای کنار و بالایی انتشار ابر بخار می‌توان یک توده ابری تخم مرغی شکل در حالت سه بعدی برای سیال منتشر شده تصور کرد. این شکل نشان دهنده نحوه توزیع مخلوط ابر بخار سمی با توجه به عامل مهم سرعت و جهت باد می‌باشد. همانطور که مشخص است غلظت 300 ppm از آمونیاک در فاصله طولی ۴۰۸ متر و عرضی ۲۱۵ متری از محل نشتی در مخزن، گسترده خواهد شد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از مرکز هواشناسی میانگین سرعت و جهت گلباد منطقه به ترتیب ۲۰ کیلومتر بر ساعت و در جهت شمال به جنوب می‌باشد. به این ترتیب سیال نشت یافته در جهت جنوب مخزن منتشر خواهد شد و از نظر ساخت، تاسیسات دیگر در سمت غربی مخزن واقع شده اند. این مسئله یک مورد ایمن در ساخت مخزن به شمار می‌رود.



شکل ۱ الف) نمودار پخش ابر بخار سیال از نمای کنار. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال. (سبز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)



PROOF



شکل ۲ الف) نمودار پخش ابر بخار سیال از نمای بالا. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال. (سبز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)

اشکال ۱و ۲ یک شبیه سازی واقع گرایانه از نشت سیال با توجه به سرعت و جهت باید می‌باشد. اما جهت باد به دلایل مختلف هواشناسی در صورت وجود نشتی می‌تواند تغییر کند. در این حالت نرم افزار از نمودار منطقه تاثیر استفاده خواهد کرد. شکل ۳ با چرخش ۳۶۰ درجه‌ای شکل ۲ حول نقطه صفر به وجود خواهد آمد. مفهوم شکل بالا به این معنی است که در صورت وزیدن باد با سرعت مشخص در تمام جهات نشت سیال به صورت یک کره کاملا متقارن با شعاع ۴۰۸ متر خواهد بود. در واقعیت جهت وزش باد در یک سمت مشخص است و واقعیت با شکل ۳ متفاوت می‌باشد، اما نمودار منطقه تاثیر درک مناسبی از نشت سیال در جهات مختلف وزش باد ارائه خواهد داد.



شکل ۳. نمودار منطقه تاثیر پخش ابر بخار سیال سمی از نمای بالا

۳- ۲- سناریو آتش استخری

شکل ۴ مربوط به سناریو حرق سیال منتشر شده می‌باشد. با توجه به سناریو پخش نشت سیال، اگر در محدوده مشخص شده برای انتشار سیال منبع اشتعال وجود داشته باشد حریق و یا انفجار رخ خواهد داد. در صورت آزاد شدن میزان خاصی از انرژی در اشتعال اولیه سیالات، حریق رخ خواهد داد. در صورتی که انرژی بیشتری نسبت به حالت احتراق آزاد شود انفجار رخ خواهد داد. در سناریوی مربوط به این بخش حالت احتراقی سیال مد نظر قرار گرفته است. نمودار ۴ بیانگر این موضوع است که در صورت ریزش سیال و احتراق استخری آن قدرت حرارت آتش در فواصل مختلف به چه میزان است. همانطور که در شکل پیداست تا فاصله ۴۳ متری از منبع اشتعال، تشعشع خالص حریق بسیار بالا و در محدوده ۳۵ کیلووات بر متر مربع می‌باشد. بعد از فاصله ۴۳ متری از مخزن قدرت تشعشع با یک شیب منفی کم شده و در نهایت در فاصله ۸۹ متری از منبع حریق بدون تاثیر شده است.

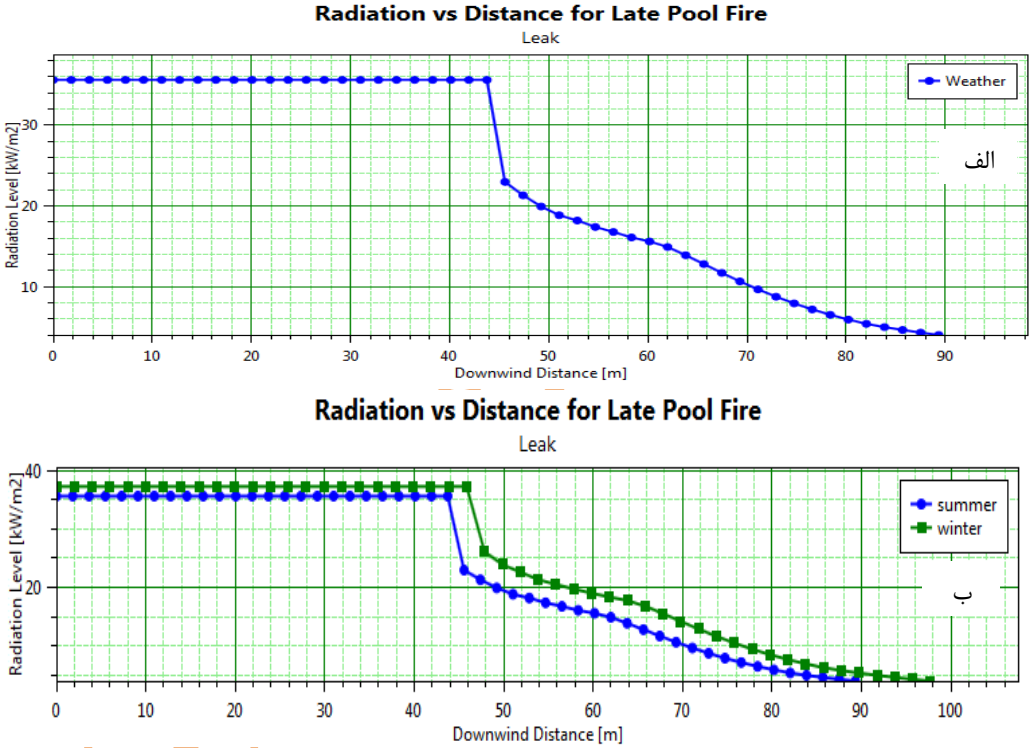
نمودار ۵ تکمیل کننده نمودار ۴ و نشان دهنده توزیع حرارت احتراق از نمای بالا می‌باشد. همانطور که مشاهده

UNCORRECTED PROOF

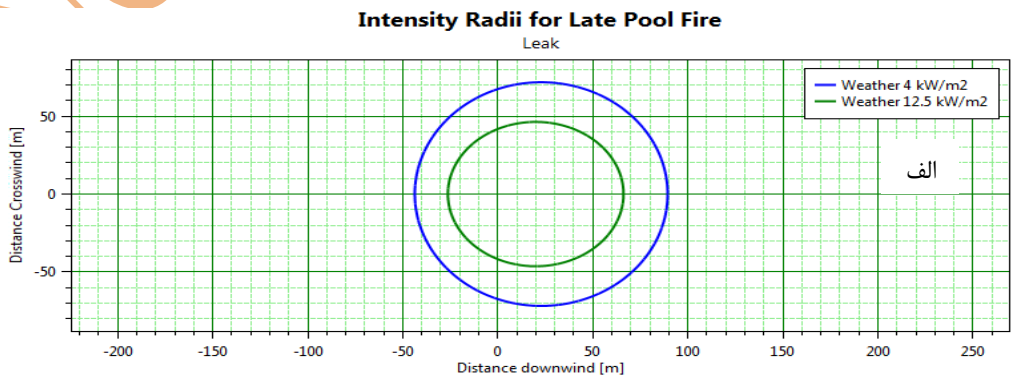
می‌شود نرم افزار سطوح ۴ و ۱۲/۵ کیلووات بر متر مربع را برای مرزبندی توده حرارتی در نظر گرفته است که استاندارد بین المللی است. ۴کیلووات بر متر مربع حد آستانه برای آسیب دردناک به انسان بعد از چند ثانیه است، حدی که فرار هنوز ممکن است. ۵/۱۲ کیلووات بر متر مربع حدی است که می‌تواند باعث آسیب شدید به انسان و حتی تجهیزات شود و باعث اشتعال مواد اشتعال‌زا گردد.

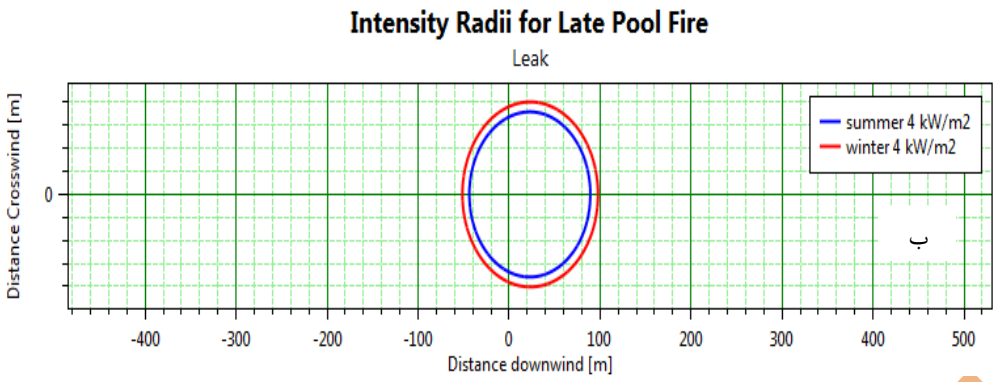
در محدوده سبز رنگ در فاصله ۶۶ متری از جنوب، ۲۶ متری از شمال، ۴۶ متری از شرق و غرب احتمال آسیب رسانی معادل ۱۰ درصد می‌باشد. در محدوده آبی رنگ فاصله ۸۹ متری از جنوب، ۴۳ متری از شمال، ۷۱ متری از شرق و غرب احتمال آسیب رسانی معادل۱ درصد می‌باشد. فراتر از محدوده آبی رنگ در نمودار شکل ۵ احتمال آسیب رسانی به تاسیسات و سلامت افراد زیر ۱ درصد می‌باشد.

همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد نمودار ۶ منطقه تاثیر همان نمودار ۵ با چرخش ۳۶۰ درجه حول مخزن مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۴. الف) نمودار قدرت تشعشع آتش استخری بر حسب متر. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (سبز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)





شکل ۵. الف) نمودار توزیع حرارت احتراق از نمای بالا. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (قرمز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)



شکل ۶. نمودار منطقه تاثیر تشعشات ناشی از سناریوی احتراق سیال از نمای بالا

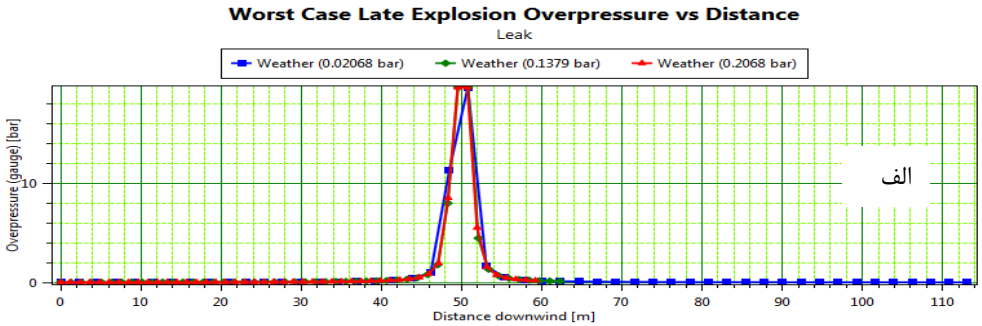
۳- ۳- سناریو انفجار

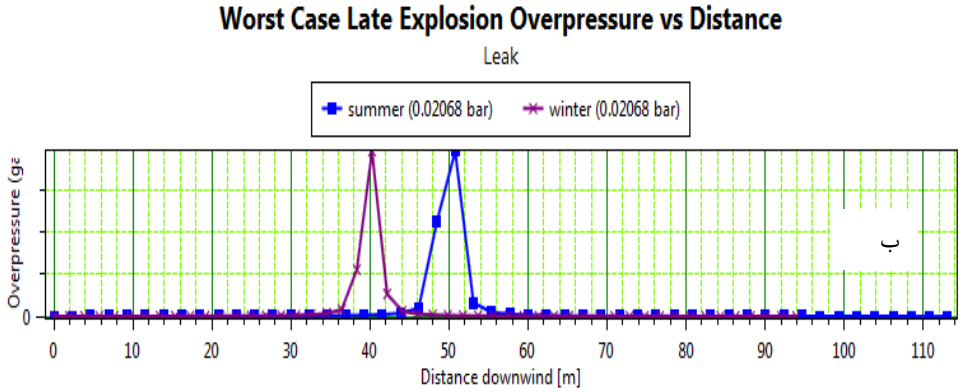
شکل ۷ نشان دهنده فشار ناشی از موج انفجار مخلوط ابر انفجاری رها شده از مخزن مورد مطالعه می‌باشد. همانطور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد در صورتی که انرژی رها شده در لحظه اولیه اشتعال از یک حد خاص بیشتر باشد احتراق تبدیل به انفجار شده و کل انرژی موجود در ماده در کسری از ثانیه تخلیه خواهد شد. پردازش اثرات ناشی از انفجار در نرم افزار بر اساس فشار موج انفجار محاسبه می‌شود و نمودار ۷ نتیجه شبیه سازی سناریو انفجار مخزن مورد مطالعه می‌باشد. محور عمودی نمودار فشار مطلق براساس بار گیج و محور افقی فاصله از مخزن می‌باشد. طبق محاسبات نرم افزار امکان بروز انفجار در لحظه اولیه وجود نداشته و در بدترین حالت انفجار تاخیری در فاصله ۵۰ متری از مخزن قابل رخداد است.

چون با فاصله گرفتن از مخزن، بخار رقیق شده و غلظت بین LFL (حد پایین اشتعال پذیری) و UFL (حد بالای اشتعال پذیری) قرار می‌گیرد و مستعد اشتعال و انفجار می شود. هم چنین سرعت باد و پایداری جو تعیین می کند که تجمع ابر گازی کجا اتفاق بیفتد و در کجا رقیق تر شود.

فشار موج تولید شده در لحظه وقوع انفجار در محدوده ۱۹/۷ بار معادل فشار وارده به قواص در عمق ۱۹۷ متری آب بوده و بسیار مرگ‌آور است. در فاصله ۵ متری از نقطه انفجار و ۵۵ متری از مخزن افت فشار در موج انفجار محسوس بوده به صورتی که در فاصله ۱۱۳ متری مخزن فشار مطلق موج انفجار به صفر می‌رسد.

UNCORRECTED PROOF

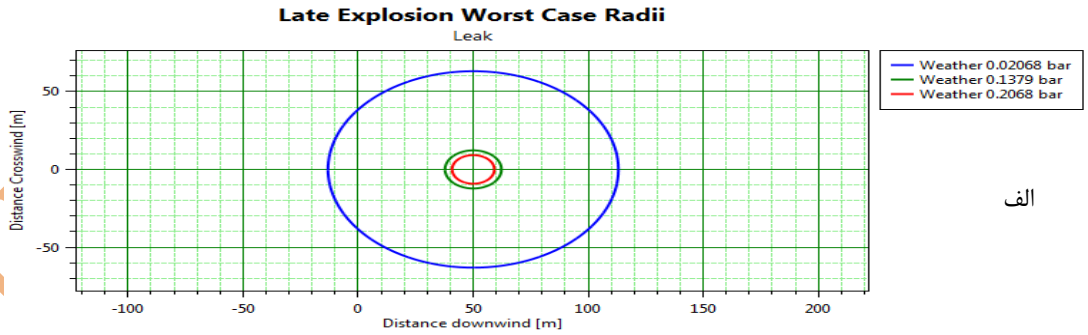




شکل ۷. الف) نمودار فشار انفجار بر حسب فاصله. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (بنفش: فصل سرد، آبی: فصل گرم)

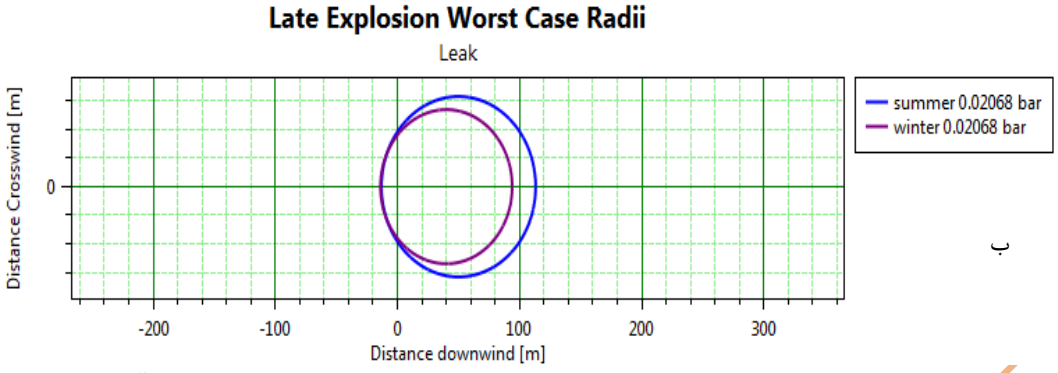
در شکل ۸ نمای بالایی موج انفجار قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که واضح است موج انفجار به صورت کروی منتشر شده و کاملا متفارن می‌باشد. همانند بخش آتش استخری در این بخش نرم افزار امواج انفجاری را به سه بخش ۰/۲، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار مطلق تقسیم بندی کرده است و به ترتیب در قسمت قرمز، سبز و آبی رنگ نمودار احتمال آسیب به تجهیزات و سلامت افراد ۹۹، ۱۰ و ۱ درصد می‌باشد. با توجه به محاسبات نرم افزاری فاصله مرکز انفجار تا موج اول، دوم و سوم به ترتیب ۵۹، ۶۲ و ۱۱۳ متر می‌باشد.

منطقه تحت تاثیر سناریو انفجار در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. دلیل جابجایی مرکز انفجار با تاخیر صورت پذیرفتن آن در فاصله ۵۰ متری از مخزن می‌باشد. با توجه به جهت وزش باد غالب از شمال به جنوب مخلوط بخار انفجاری در فاصله ۵۰ متری جنوب مخزن دچار انفجار خواهد شد.



الف

UNCORRECTED PROOF



ب

شکل ۸- الف) نمودار موج انفجار از نمای بالا. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (بنفش: فصل سرد، آبی: فصل گرم)



شکل ۹. منطقه تاثیر سناریو انفجار از نمای بالا

۳-۴- سناریو جت فایر

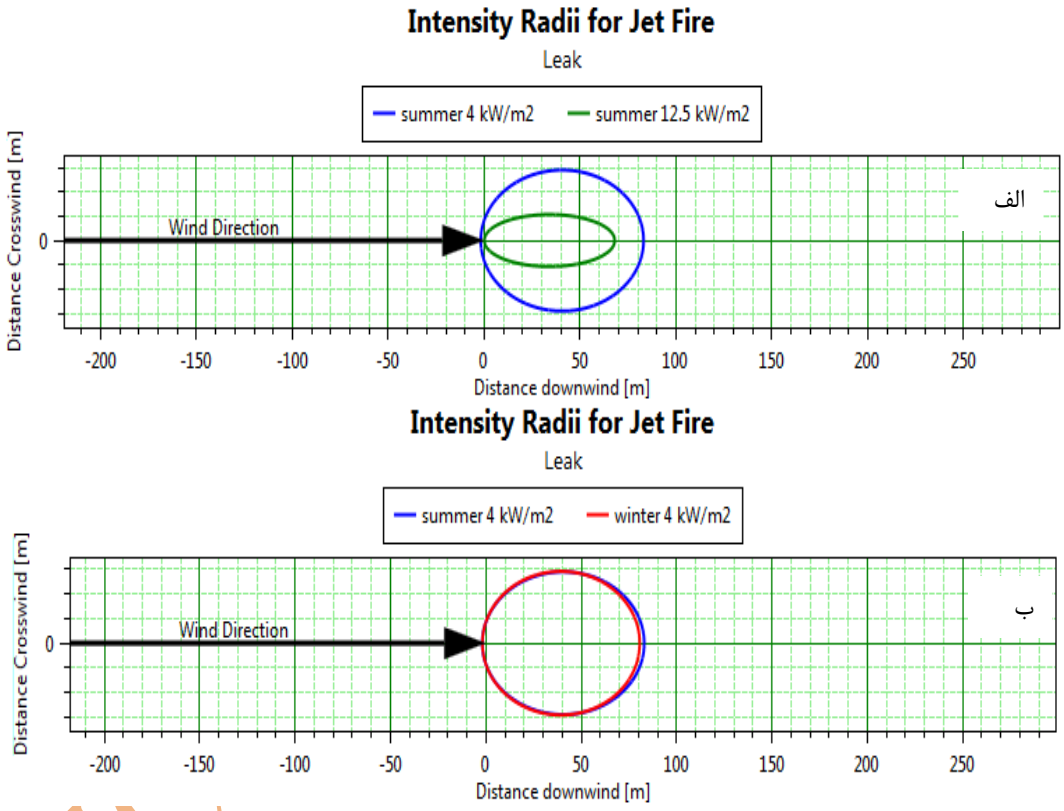
در شکل ۱۰ تشعشع سناریو جت فایر بر حسب فاصله از نمای بغل قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش فاصله از محل آتش، قدرت تشعشات به صورت نزولی کاهش می‌یابد. در این نمودار قدرت تشعشعات بر حسب کیلووات بر متر مربع می‌باشد. نمودار ۱۰ بیانگر این موضوع است که در صورت نشت و به وجود آمدن جت فایر قدرت حرارت آتش در فواصل مختلف به چه میزان است. همانطور که در شکل پیداست تا فاصله ۶۰ متری از منبع اشتعال، تشعشع خالص حریق بسیار بالا و در محدوده ۲۰ کیلووات بر متر مربع می‌باشد. بعد از فاصله ۶۰ متری از مخزن قدرت تشعشع با یک شیب منفی کم شده و در نهایت در فاصله ۱۲۰ متری از منبع حریق بدون تاثیر شده است.

نمودار ۱۱ تکمیل کننده نمودار ۱۰ و نشان دهنده توزیع حرارت احتراق از نمای بالا می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود نرم افزار سطوح ۴ و ۱۲/۵ کیلووات بر متر مربع را برای مرزبندی توده حرارتی در نظر گرفته است. در محدوده سبز رنگ در فاصله ۶۸ متری از جنوب، ۱۰ متری از شرق و غرب احتمال آسیب رسانی معادل ۱۰ درصد می‌باشد. در محدوده آبی رنگ فاصله ۸۳ متری از جنوب، ۲۹ متری از شرق و غرب احتمال آسیب‌رسانی معادل ۱ درصد می‌باشد. فراتر از محدوده آبی رنگ در نمودار شکل ۱۱ احتمال آسیب‌رسانی به تاسیسات و سلامت افراد زیر ۱ درصد می‌باشد.

UNCORRECTED PROOF



شکل ۱۰. الف) نمودار تشعشع بر حسب فاصله جت فایر از نمای کنار. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (سبز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)



شکل ۱۱. الف) نمودار تشعشع بر حسب فاصله جت فایر از نمای بالا. ب) مقایسه در فصل گرم و سرد سال (قرمز: فصل سرد، آبی: فصل گرم)

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس اطلاعات به دست آمده، غلظت‌های بیش از حد مجاز مواجهه در سناریو پخش بخار گاز سمی موجود در پلان شکل ۱۲ مخزن ذخیره سازی آمونیاک پتروشیمی مسجدسلیمان به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود غلظت منتشر شده از گاز در منطقه قرمز 160000 ppm، سبز 80000 ppm و آبی 300 ppm می‌باشد. با توجه به غلظت آستانه IDLH آمونیاک که 300 ppm می‌باشد، یعنی قرار گرفتن در این غلظت حتی برای مدت کوتاه باعث مرگ یا آسیب دایمی می شود، در خارج از منطقه آبی رنگ غلظت بیش از حد مواجهه وجود نخواهد داشت. شعاع مناطق قرمز، سبز و آبی رنگ در این سناریو به ترتیب ۲۳، ۵۵ و ۴۰۸ متر می‌باشد.

در پلان شکل ۱۳ درصد مرگ و میر براساس سیستم اثرات کشندگی[1] مخزن ذخیره‌سازی آمونیاک نمایش داده شده است. اثرات کشندگی، ناحیه اثر کشنده شناخته شده

[1] Lethality Footprint

برای سناریوهای مختلفی مانند انفجار، آتش‌سوزی و پراکندگی مواد سمی را مشخص می‌کند. در این پلان درصد مرگ‌آوری در صورت مواجه در منطقه بنفش ٪۹۹، قرمز ٪۱۰، سبز ٪۱ و آبی ٪۰.۱ می‌باشد. در صورتی که افراد هنگام حادثه در بیرون از ناحیه آبی رنگ باشند خطر مرگ آوری ناشی از انتشار گاز سمی آن‌ها را تهدید نمی‌کند. شعاع مناطق بنفش، قرمز، سبز و آبی رنگ در این سناریو به ترتیب ۸۹، ۱۵۹، ۱۹۸ و ۲۳۶ متر می‌باشد.

در پلان شکل ۱۴ تشعشعات ناشی از سناریو حریق استخری مخزن ذخیره سازی آمونیاک نمایش داده شده است. در این پلان سطح تشعشع در منطقه سبز و آبی رنگ به ترتیب ۱۲/۵ و ۴ کیلووات بر مترمکعب می‌باشد. این بدان معناست که در منطقه سبز و آبی تشعشعات ناشی از حریق به ترتیب ۱۲/۵ و ۴ برابر حرارت خورشید می‌باشد. شعاع مناطق سبز و آبی رنگ در این سناریو به ترتیب ۴۶ و ۶۲ متر می‌باشد.

در پلان شکل ۱۵ موج ناشی از سناریو انفجار مخزن ذخیره سازی آمونیاک نشان داده شده است. در این پلان فشار در منطقه قرمز، سبز و آبی رنگ به ترتیب ۰/۲، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار می‌باشد. به این ترتیب بعد از منطقه آبی رنگ در محدوده انفجار خطری متوجه سلامت افراد و تجهیزات نمی‌باشد. شعاع مناطق قرمز، سبز و آبی رنگ در این سناریو به ترتیب ۵۹، ۶۲ و ۱۱۳ متر می‌باشد.

در پلان شکل ۱۶ تشعشعات ناشی از سناریو جت فایر مخزن ذخیره سازی آمونیاک نمایش داده شده است. در این پلان سطح تشعشع در منطقه سبز و آبی رنگ به ترتیب ۱۲/۵ و ۴ کیلووات بر مترمکعب می‌باشد. این بدان معناست که در منطقه سبز و آبی تشعشعات ناشی از حریق به ترتیب ۱۲/۵ و ۴ برابر حرارت خورشید می‌باشد. شعاع مناطق سبز و آبی رنگ در این سناریو به ترتیب ۶۸ و ۸۳ متر می‌باشد.

در نهایت با توجه به نتایج شبیه سازی نرم افزاری می‌توان نتایج تحلیل زیر را در رابطه با مخزن ذخیره سازی آمونیاک پتروشیمی مسجد سلیمان ارائه داد:

۱- طراحی مخزن به درستی با توجه به جهت گلباد منطقه (از شمال به جنوب) جانمایی شده است.

۲- در صورت نشت گاز آمونیاک با شعاع نشتی ۲ اینچ از مخزن TK-5001 با توجه به چگالی بالای آمونیاک نسبت به هوا میزان قابل توجه از آمونیاک در محوطه واحد ذخیره سازی منتشر شده و گاز با غلظت نزدیک به IDLH آمونیاک در واحدهای مجاور منتشر خواهد شد و این امر زمان کافی برای فرار افراد حاضر در واحدهای مجاور را ایجاد می‌کند.

۳- با توجه به توضیحات بند ۲ میزان مرگ و میر در صورت نشت گاز سمی آمونیاک در قسمت جزئی از واحدهای مجاور در محدوده ۱۰ درصد خواهد بود و قسمت اعظم احتمال مرگ و میر در محدوده ۱ درصد و زیر آن می‌باشد. تحلیل فوق نشان گر آن است که در صورت نشت گاز و نبود افراد در محدوده مخزن ۵۰۰۱-TK احتمال آسیب جانی بسیار کم بوده و افراد در واحدهای مجاور زمان کافی برای فرار از محدوده خطر را خواهند داشت.

۴- در صورت بروز حریق از نوع استخری پیش بینی می‌شود با توجه به تعبیه دیواره محافظ مخزن حریق مواد نشت یافته در محدوده واحد آمونیاک بوده و در صورت عدم وجود فرد در محدوده مخزن خطری متوجه سلامت افراد نمی‌باشد.

۵- در صورت بروز انفجار مخزن ۵۰۰۱-TK طبق شبیه سازی موج انفجاری منتقل شده به واحدهای مجاور در محدوده ۰/۰۲ بار بوده که تنها موجب شکستن شیشه و لرزش خفیف خواهد شد و خطری متوجه سلامت افراد نخواهد شد و تنها امکان بروز خسارت جزئی به تاسیسات خواهد شد.

در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی و شرایط آب و هوایی منطقه، طراحی و جانمایی بزرگترین مخزن ذخیره سازی در پتروشیمی مسجدسلیمان با نام ۵۰۰۱-TK حاوی آمونیاک مایع با درصد بالایی از صحت سنجی به درستی طراحی و اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه صحت این مطلب را اثبات کرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

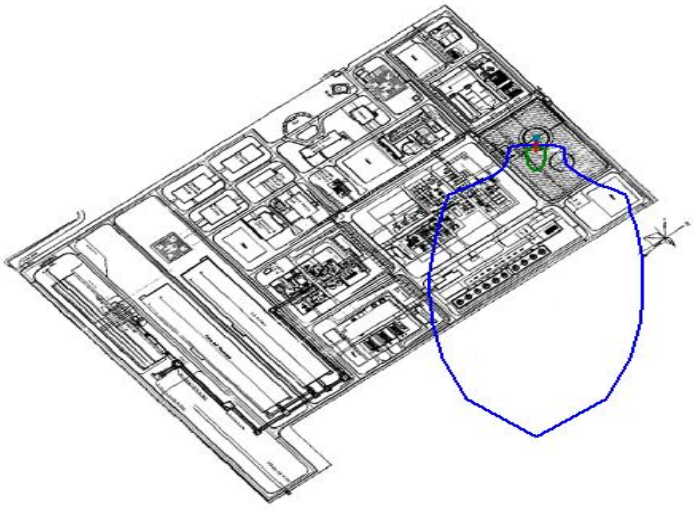
UNCORRECTED PROOF

مریم کاویان‌پور: روش‌شناسی، پیش‌نویس اصلی، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرم افزار

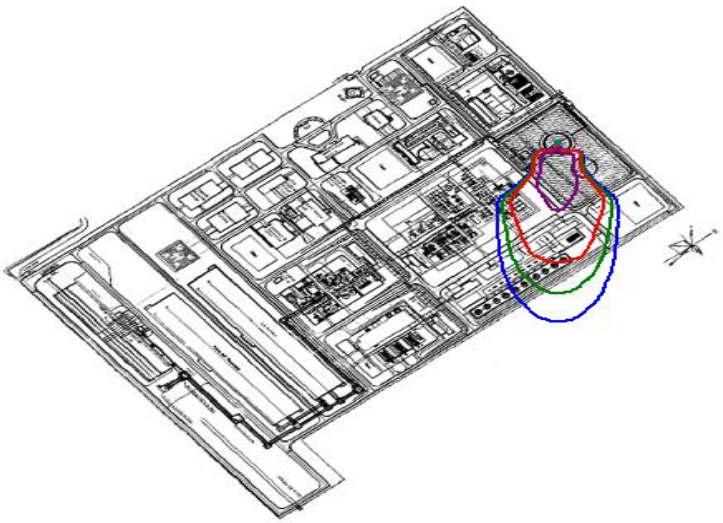
نعیمه ستاره‌شناس: نرم افزار، پردازش داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی و ویرایش

یاسر احمدی: پردازش داده‌ها، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش، راهنمایی

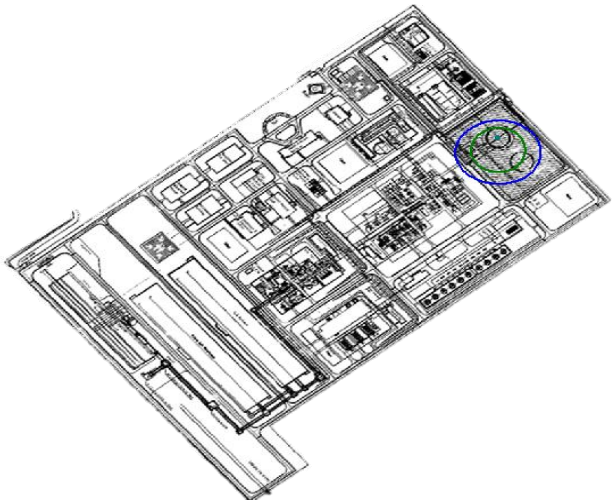
محسن منصوری: نوآوری، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرم افزار، بررسی و ویرایش، راهنمایی



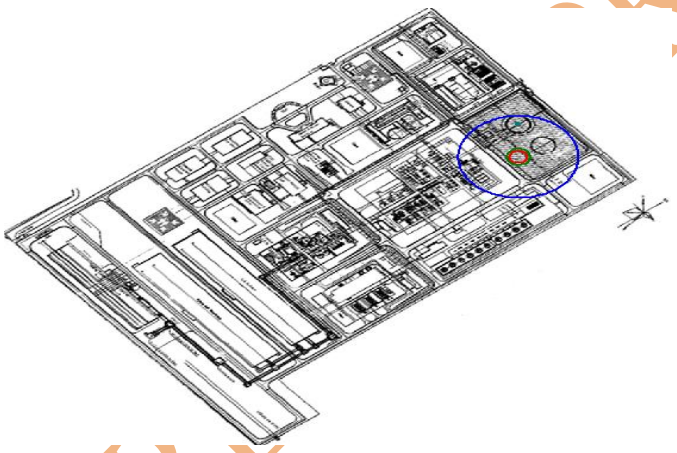
شکل ۱۲. نمایی کلی سایت به همراه شعاع نهایی ایمن سناریو پخش بخار گاز سمی مخزن ذخیره سازی آمونیاک (غلظت بخار گاز سمی در منطقه قرمز 160000 ppm، سبز 80000 ppm، آبی 300 ppm)



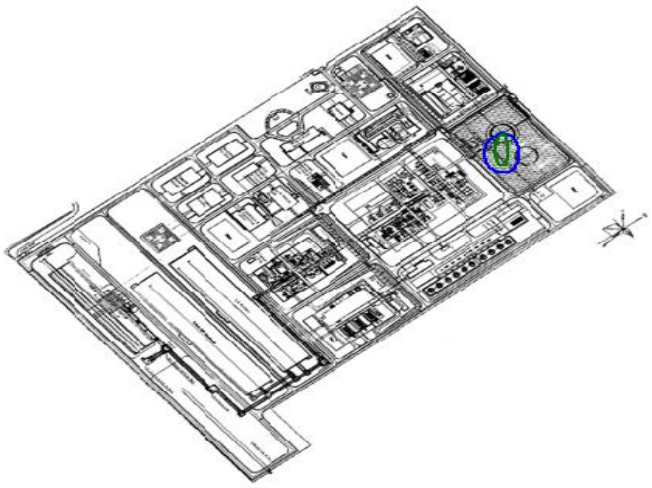
شکل۱۳. نمایی کلی سایت به همراه تعیین شعاع احتمال مرگ در سناریو پخش گاز مخزن ذخیره سازی آمونیاک (احتمال مرگ در منطقه بنفش ٪۹۹، قرمز ٪۱۰، سبز ٪۱ و آبی ٪۰.۱)



شکل ۱۴. نمایی کلی سایت به همراه تعیین شعاع تشعشات ناشی از حریق در سناریو حریق استخری مخزن ذخیره سازی آمونیاک (تشعشع حریق در منطقه سبز ۱۲.۵ و آبی ۴ کیلووات بر متر مربع)



شکل ۱۵: نمایی کلی سایت به همراه تعیین شعاع ناشی از سناریو انفجار مخزن ذخیره سازی آمونیاک (فشار انفجار در منطقه قرمز ۰.۲، سبز ۰.۱۴ و آبی ۰.۰۲ بار)



شکل ۱۶. نمایی کلی سایت به همراه تعیین شعاع ناشی از سناریو جت فایر مخزن ذخیره سازی آمونیاک (سطح تشعشع در منطقه سبز ۱۲/۵ و آبی ۴ کیلووات بر متر مربع می‌باشد)

UNCONTROLLED COPY

مراجع

[1] Noh, Yoorae, Brandon E. Boor, Jonathan H. Shannahan, Cary D. Troy, Chad T. Jafvert, and Andrew J. Whelton. "Emergency responder and public health considerations for plastic sewer lining chemical waste exposures in indoor environments". Journal of Hazardous Materials 422 (2022): 126832.

[2] Nakyai, Teeranun, Sujee Phatrabuddha, Patomphong Homsri, and Nantaporn Phatrabuddha. "Risk assessment of ammonia leakage by fault tree analysis: Case study in the ice manufacture, Chonburi province". F1000Research 14 (2025): 192.

[3] Danasa, A.S., Tri Edhi Budhi Soesilo, Dwi Nowo Martono, Ahyahudin Sodri, A. S. Hadi, and Ganesha Tri Chandrasa. "The ammonia release hazard and risk assessment: A case study of urea fertilizer industry in Indonesia". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 399 (2019): 012087.

[4] Namboothiri, Nandu V., and A. R. Soman. "Consequence assessment of anhydrous ammonia release using CFD-probit analysis". Process Safety Progress 37. no. 4 (2018): 525-534.

[5] Yang, Mengyao, and Jasmine Siu Lee Lam. "Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales". Journal of Hazardous Materials 468 (2024): 133757

[6] Ramprasad, Tejeswi, Madhavi Gaonkar, and Diptendu Das. "Assessment of toxic gas dispersion using Phast and Panache". International Journal of Research in Advent Technology 3. no.6 (2015): 89-93.

[7] Saloua, Bekhouche , Rouaïnia Mounira, and Medjram Mohamed Salah. "Fire and explosion risks in petrochemical plant: Assessment, modeling and consequences analysis". Journal of Failure Analysis and Prevention 19 (2019): 903–916.

[8] Kaiser, Geoffrey D. "A review of models for predicting the dispersion of ammonia in the atmosphere". Plant/Oper Prog 8. no. 1 (1989) 58–64

[9] Pasculescu, Vlad Mihai, Emilian Ghicioi, Ligia Ioana Tuhut, Adrian Bogdan Simon-Marinica, and Dragos Pasculescu. "Discharge and atmospheric dispersion modelling in case of hazardous material releases". MATEC Web of Conferences 354 (2022) 00009.

[10] Pandya, Nishant, Nadine Gabas, and Eric Marsden. "Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine)". Journal of Loss Prevention in the Process Industries 25. no. 1, (2012): 20-32.

[11] Yang, Mengyao, and Jasmine Siu Lee Lam. "Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales". Journal of Hazardous Materials 468 (2024): 133757.

UNCORRECTED PROOF

Modeling and Risk Assessment of the Ammonia Tank in Masjed Soleiman Petrochemical Complex

Maryam Kavyanpour[1], Naimeh Setareshenas[2], Yaser Ahmadi[3], Mohsen Mansouri[4,*]

1. MSc, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
2. Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
3. Associate professor, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
4. Associate professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

*****Corresponding Author: m.mansouri@ilam.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:
Consequence assessment, Release, PHAST software, Ammonia storage

ABSTRACT

The petrochemical industry is inherently high-risk, prone to accidents with irreversible human and financial consequences. This study aims to assess risks and analyze the consequences of accidents in an ammonia storage unit (Tank 5001-TK). The studied tank, with a capacity of 3,100 cubic meters, an operational temperature of 34.4°C, a pressure of 0.008 MPa, and a height of 27 meters, contains liquid ammonia. The PHAST software was used to model four critical scenarios: Explosion, pool fire, toxic gas dispersion, and jet fire. Modeling parameters included a 2-inch horizontal leak at a height of 1 meter to determine the fire zone, thermal radiation flux levels of 4 and 12.5 kW/m², explosion-induced pressure levels (0.2, 0.14, and 0.02 bar), and the critical toxic vapor concentration (IDLH of 300 ppm). Results revealed safe radii for toxic gas dispersion, pool fire, explosion, and jet fire scenarios as 408, 89, 113, and 120 meters, respectively. These findings enable precise identification of vulnerable zones and operational safety boundaries. Consequence modeling using PHAST demonstrates high effectiveness in predicting hazard ranges and formulating preventive policies, such as managing safety distances, optimizing equipment design, and personnel training. This study emphasizes the necessity of integrating modern analytical methods with safety standards to mitigate damages in the petrochemical industry.

UNCORRECTED PROOF