

Risk Assessment and Consequence Analysis of Fire and Explosion in a Vinyl Chloride Monomer Tank by PHAST

Rahman Bahmani ¹, Mostafa Pouyakyan ¹, Soheila Khodakarim ², Hamideh Bidel ¹, Ali Salehi Sahlabadi ¹, MohammadJavad Jafari ^{3*}

1. Department of Occupational Health and Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2. Epidemiology Department, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

3. Safety Promotion and Injury Prevention Research Center, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: m_jafari@sbmu.ac.ir

Abstract

Background and Objectives: Fire and explosion are the most important and common consequences of released chemicals. In present study the consequences of jet fire and explosion in a Vinyl Chloride Monomer (VCM) tank was investigated.

Materials and Methods: In this applied study, fire and explosion from 16 material releasing scenarios were investigated using PHAST.7.11 software. The tank's temperature, pressure, volumes and shape were 70°C, 9bar, 3600m³ and spherical respectively. The meteorological data were categorized based on Pasquill method. The mortality rate and danger radius for each scenario were calculated and analyzed.

Results: The smallest (11m) and the largest (79m) radius effected by the explosion pressure wave belongs to 50mm slot release and the complete rupture respectively. The highest pressure wave (1bar) is produced from a complete rupture extending from 0-80m from the gas cloud center that cause the 10.27 and 2.57% mortality rate of day and night working shifts respectively. The largest and the smallest areas covered by the jet fire are 1861 and 185m² respectively and the largest and the smallest radius covered by radiation heat from this fire are 59.4 and 20.4m respectively.

Conclusion: Any possible leakage from the tanks will have catastrophic consequences, indicating a very high and unacceptable level of risk. As a result, considering the levels of damage caused by the explosion wave, the necessary measures for the prevention of these consequences are imperative.

Keywords: Consequence; Tank; Fire; Explosion; Risk; Released Materials

How to cite this article: Bahmani R, Pouyakyan M, Khodakarim S, Bidel H, Salehi-Sahlabadi A, Jafari MJ. Risk Assessment and Consequence Analysis of Fire and Explosion in a Vinyl Chloride Monomer Tank by PHAST. J Saf Promot Inj Prev. 2021; 8(4):208-18.

ارزیابی ریسک و تحلیل پیامد حریق و انفجار در یک مخزن وینیل کلراید با استفاده از نرم افزار PHAST

رحمان بهمنی^۱، مصطفی پویاکیان^۱، سهیلا خداکریم^۲، حمیده بیدل^۱، علی صالحی سهل آبادی^۱، محمدجواد جعفری^{۳*}

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. گروه اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. مرکز تحقیقات ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

سابقه و هدف: آتش‌سوزی و انفجار از مهم‌ترین و رایج‌ترین پیامدهای ناگوار رهايش مواد شیمیایی به شمار می‌روند. هدف این مطالعه ارزیابی ریسک و تحلیل پیامد حریق و انفجار در یک مخزن وینیل کلراید با استفاده از نرم‌افزار PHAST بود.

روش بررسی: در این مطالعه کاربردی، حریق و انفجار ناشی از ۱۶ سناریوی رهايش مواد با استفاده از برنامه نرم‌افزاری PHAST 7.11 بررسی شد. دما، فشار، حجم و شکل مخزن به ترتیب ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۹ بار، ۳۶۰۰ مترمکعب و کروی بود. طبقه‌بندی شرایط جوی بر پایه جدول پاسکوییل انجام شد. درصد مرگ‌ومیر و شعاع خطر در هر یک از سناریوها محاسبه و تحلیل شد.

یافته‌ها: کمترین (۱۱ متر) و بیشترین (۷۹ متر) شعاع تحت تأثیر موج فشار ناشی از انفجار به ترتیب مربوط به نشتی ۵۰ میلی‌متری و پارگی کامل بود. بیشترین موج فشار ایجادشده (یک‌بار) در پارگی کامل مخزن در فاصله بین ۰ تا ۸۰ متری از مرکز ابر بخار بود که باعث درصد مرگ‌ومیر افراد روز کار و شب‌کار به ترتیب ۱۰/۲۷ و ۲/۵۷ درصد خواهد بود. بیشترین و کمترین مساحت تحت پوشش آتش‌فروانی که باعث مرگ‌ومیر می‌شود به ترتیب مساوی ۱۸۶۱ و ۱۸۵ مترمربع بود. بیشترین و کمترین پوشش گرمای تابشی ناشی از این حریق به ترتیب مساوی ۵۹/۴ و ۲۰/۴ متر از مخزن بود.

نتیجه‌گیری: هرگونه نشتی احتمالی از مخزن مورد مطالعه، پیامدهای فاجعه‌باری دربر خواهد داشت که نشان‌دهنده وجود سطح ریسک بسیار بالا و غیرقابل قبول است. در نتیجه با در نظر گرفتن سطوح آسیب ناشی از موج انفجار و نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی لازم جهت پیشگیری از این پیامدها در این صنایع انجام شود.

واژگان کلیدی: پیامد؛ مخزن؛ حریق؛ انفجار؛ ریسک؛ مواد رهاشده

مقدمه

این صنایع مثل راکتورها و مخازن ذخیره مواد از ویژگی‌های غالب این صنایع به شمار می‌روند. رهايش و نشت مواد شیمیایی از مخازن، یکی از مهم‌ترین خطرات این صنایع است که می‌تواند به علت نقص در مخازن تحت فشار رخ دهد (۴، ۵). در صورت وقوع حوادثی که منجر به رهايش این مواد در محیط شود، سلامت کارکنان و عموم مردمی که در اطراف این صنایع حضور دارند به‌طور جدی در معرض خطر قرار می‌گیرد. همچنین ممکن است آسیب قابل‌توجهی به محیط‌زیست وارد گردد (۴، ۶، ۷).

آتش‌سوزی و انفجار از مهم‌ترین و رایج‌ترین پیامدهای ناگوار رهايش مواد شیمیایی به شمار می‌روند. در این بین حریق بیش از انفجار رخ می‌دهد اما انفجار خطرناک‌تر بوده و باعث مرگ‌ومیر و خسارات زیاده‌تری می‌شود. تخریب ناشی از انفجار بسیار گسترده‌تر از حریق

تقاضا برای محصولات پتروشیمی روز به روز در حال افزایش است. اغلب این مواد قابل اشتعال، قابل انفجار و سمی هستند. عموماً مدیریت یا عملکرد نادرست در چرخه تولید، مصرف یا ذخیره‌سازی مواد اولیه و محصولات پتروشیمی باعث نشت مواد خطرناک در مقیاس‌های بزرگ می‌شود که ممکن است منجر به حوادثی با پیامدهای فاجعه‌بار گردد (۱، ۲). صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی مانند شرایط عملیاتی خاص، نگهداری حجم زیادی از مواد بالقوه خطرناک در شرایط دمایی و فشار بالا، تراکم زیاد تجهیزات و کارکنان، بستر مناسبی جهت بروز حوادث فاجعه‌بار و بحران‌ساز هستند (۳). شرایط دمایی و فشار بالا در واحدهای عملیاتی

m_jafari@sbmu.ac.ir

*آدرس نویسنده مسئول مکاتبات:

است. انفجار ناشی از انتشار مواد قابل اشتعال در محیط می‌تواند باعث حوادث ثانویه گردد (۴، ۸). بررسی حوادث سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۳ مخازن ذخیره‌سازی مواد نشان داد که ۸۵ درصد این حوادث منجر به حریق و انفجار توأم شده است (۴، ۹). در سایر صنایع نیز انفجار مخازن یکی از اصلی‌ترین و خطرناک‌ترین نوع حوادث صنعتی به شمار می‌آید. مخازن به دلیل ماهیت خود و تحت فشار بودن به‌طور بالقوه مستعد خطرزایی هستند (۱۰، ۱۱).

حوادثی از قبیل انفجار مخازن نگهداری مواد در یک شرکت تولیدکننده حلال‌های صنعتی و مواد شیمیایی در شازند اراک در سال ۱۳۸۷ منجر به ۳۵ کشته و ۵۴ نفر مصدوم شد. همچنین انفجار پتروشیمی بندر امام شهرستان ماهشهر در سال ۱۳۹۱ با ۸ نفر کشته و ۲ مصدوم نمونه‌ای از حوادث داخلی کشور می‌باشند. همچنین وقوع یک حادثه در هر ۱۳ روز در بازه زمانی ۱۵۶ روزه در صنایع پتروشیمی کشور در سال ۱۳۹۵ که مرگ ۳ نفر و مصدومیت ۱۲ نفر را به دنبال داشت اهمیت حوادث ناشی از نشت مواد در مخازن را نشان می‌دهد. خسارت ناشی از این قبیل حوادث نیز بسیار بالا است. مثلاً آتش‌سوزی مخزن پتروشیمی بوعلی در سال ۱۳۹۵ که به علت نشتی گاز از یکی از مخازن رخ داد حداقل ۶۰ میلیون یورو خسارت مالی در پی داشت (۱۲).

وینیل کلراید یک ترکیب کلردار آلی است که به‌عنوان یک محصول واسطه در پتروشیمی تولید می‌شود (۶). بر اساس مطالعات حیوانی و انسانی، وینیل کلراید باعث آسیب و تخریب کبد می‌شود. طبق تحقیقات انجام‌شده در سال ۲۰۰۸ وینیل کلراید به‌عنوان سرطان‌زای قطعی انسان (A1) دسته‌بندی شده است. مواجهه حاد با مونومر وینیل کلراید باعث سرکوب سیستم عصبی مرکزی (۱۳) و در غلظت‌های بالاتر سبب تحریک چشم و مجاری تنفسی، بیهوشی و مرگ می‌شود. وینیل کلراید به‌صورت مایع در مخازن کروی بزرگ نگهداری می‌شود (۱۴، ۱۵). مونومر وینیل کلراید ماده‌ای بسیار اشتعال‌پذیر است و حد بالا و پایین انفجار این ماده در محدوده بین ۳/۶ تا ۳۳ درصد حجمی است که نشان‌دهنده قابلیت انفجار و اشتعال بالای این ماده است (۶). پیش‌بینی رفتار مواد شیمیایی خطرناک رهاشده از مخازن و تخمین پیامدها و صدمات ناشی از حریق و انفجار آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۱). جهت تعیین حریم خطر آتش‌سوزی و انفجار مواد رهاشده از روش‌های مدل‌سازی پیامد استفاده می‌شود. مدل‌سازی پیامد شامل شبیه‌سازی نشت و رهایش مواد در محیط و پیش‌بینی پیامدهای ناشی از آتش‌سوزی یا انفجار این مواد است (۶، ۱۱، ۱۶). نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی انفجار و حریق و ارزیابی پیامد آن‌ها وجود دارند. اکثر این نرم‌افزارها به دلیل حجم زیاد محاسبات، زمان‌گیر بودن اجرای آن‌ها و ناتوانی در انجام وظایف چندمنظوره از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار نیستند (۱۱، ۱۷، ۱۸).

نرم‌افزار PHAST به‌منظور مدل‌سازی حوادث فرآیندهای شیمیایی و ارزیابی پیامدهای آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار می‌تواند پیامدهای پیچیده سناریوهای حوادث ناشی از رهایش مواد شیمیایی از مخازن را پیش‌بینی کند. نرم‌افزار PHAST با در نظر گرفتن ویژگی‌های ماده و مخازن نگهداری، پستی‌وبلندی‌های زمین و شرایط آب و هوایی، پیامدهای ناشی از رها شدن مواد خطرناک را کمی‌سازی و مدل‌سازی می‌کند (۱۹). از نتایج حاصل از مدل‌سازی این نرم‌افزار می‌توان شعاع حریق و انفجار، میزان تخریب ناشی از وقوع حادثه، فشار ناشی از موج انفجار، تعداد افراد در معرض خطر حادثه و محدوده ایمن در اطراف محل نشت مواد شیمیایی را تعیین کرد (۱، ۶، ۲۰). بسته نرم‌افزاری PHAST قبلاً توسط پژوهشگران و مؤسسات مختلف اعتباربخشی شده است (۲ و ۶).

اکثر حوادثی که در صنایع رخ می‌دهد به دلیل خروج یا نشت یک ماده قابل اشتعال یا سمی در اثر ایجاد پارگی در مخزن، خطوط لوله و اتصالات است. در صنایع فرایندی طیف گسترده‌ای از مواد قابل اشتعال و سمی با مقادیر چشمگیر ذخیره‌سازی می‌شوند که احتمال وقوع حوادثی مثل انفجار و انواع حریق را افزایش می‌دهد. انفجار و آتش‌فروانی ازجمله خطرانی هستند که در نتیجه نشت و رهایش وینیل کلراید از مخازن ممکن است رخ دهند. وینیل کلراید در شرایط دما و فشار محیط به‌صورت گاز است. پس در صورت وقوع نشتی، این ماده به‌صورت گاز در محیط پراکنده می‌شود. در صورتی که منبع جرقه بلافاصله در جوار مخزن وجود نداشته باشد، ابر بخار تشکیل می‌شود و به‌محض رسیدن به یک منبع جرقه انفجار ابر بخار رخ می‌دهد. در صورت وجود منبع جرقه در جوار مخزن، در هنگام رهایش، امکان آتش‌فروانی یا ناگهانی وجود دارد.

رها شدن ناگهانی وینیل کلراید در یک صنعت پتروشیمی به محیط می‌تواند منجر به حریق و انفجار گردیده و صدمه به افراد، محیط و تجهیزات فرایندی را در پی داشته باشد. مطالعه حاضر باهدف مدل‌سازی پیامدهای انفجار و حریق ناشی از رهایش وینیل کلراید در محیط انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه پیامدهای ناشی از حریق فروانی و انفجار مخازن وینیل کلراید در یک واحد پتروشیمی با استفاده از برنامه نرم‌افزاری PHAST 7.11 مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور اطمینان از کاربرد صحیح نرم‌افزار پس از آشنا شدن محقق با طرز کار بسته نرم‌افزاری و طی دوره‌های رسمی آموزشی آن مثال‌هایی از کتابچه نرم‌افزار توسط پژوهشگر شبیه‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج موجود در کتابچه راهنما^۱ مقایسه گردید. پس‌ازاینکه تفاوتی بین نتایج

۱- Benchmark data

دو فصل تابستان و زمستان به صورت شب و روز انجام گرفت. در نتیجه مجموع سناریوهای انتخاب شده طبق رابطه زیر مساوی ۱۶ سناریو برآورد گردید.

معادله (۱):

$$\text{Number of Simulated Scenarios} = 4 \times 2 \times 2 = 16$$

نرخ تکرارپذیری نقص، از آمار و سوابق موجود در منابع معتبر استخراج شد (۲۲). سناریوهای مورد مطالعه و همچنین نرخ تکرارپذیری یا احتمال وقوع آن‌ها با توجه به نوع رهاش مواد از مخازن کروی در جدول ۲ ذکر شده است. تمام مراحل مربوط به مدل سازی، محاسبه شدت گرمای تابشی انواع حریق‌ها و موج انفجار، محاسبات پراپیت و مرگ و میر افراد با استفاده از نرم افزار PHAST انجام شد. ارزیابی اثرات آتش فورانی با استفاده از شدت (شار) گرمای تابشی انجام شد. ارزیابی پیامد انفجار با استفاده از فشار موج انفجار صورت گرفت. برای این کار مقادیر متغیرهای فوق با معیارهای مربوطه مقایسه و ارزیابی گردید. پیامدهای ناشی از تابش، تابع شدت تابش و زمان مواجهه با گرمای تابشی است.

جدول ۲. سناریوهای تعیین شده بر اساس نتایج ارزیابی درخت خطا به همراه احتمال رخداد هر سناریو

ردیف	اندازه نشی (mm)	کد سناریو	شبانه روز	فصل	احتمال (نقص در سال)
۱	۱۰	S1	روز	تابستان	۴×۱۰ ^{-۵}
		S2	شب	تابستان	
		S3	روز	زمستان	
		S4	شب	زمستان	
۲	۵۰	S5	روز	تابستان	۵×۱۰ ^{-۶}
		S6	شب	تابستان	
		S7	روز	زمستان	
		S8	شب	زمستان	
۳	۱۵۰	S9	روز	تابستان	۵×۱۰ ^{-۶}
		S10	شب	تابستان	
		S11	روز	زمستان	
		S12	شب	زمستان	
۴	پارگی کامل	S13	روز	تابستان	۶×۱۰ ^{-۶}
		S14	شب	تابستان	
		S15	روز	زمستان	
		S16	شب	زمستان	

شبیه سازی و نتایج حل تمرینات در کتابچه راهنما مشاهده نشد، اطمینان حاصل شد که نحوه استفاده از بسته نرم افزاری PHAST درست بود.

برای شبیه سازی سناریوهای تعریف شده در مطالعه، اطلاعات مورد نیاز برای ورود به نرم افزار که شامل اطلاعات مربوط به مخزن و اطلاعات مربوط به محیط هستند گردآوری شد. دمای مخزن ۷۰ درجه سانتی گراد، فشار در مخزن برابر با ۹ بار (۱۳۰/۵ پوند بر اینچ مربع) و شکل مخزن کروی بود. حجم مخزن ۳۶۰۰ مترمکعب و قطر آن حدود ۲۰/۵ متر بود. پایداری جوی با استفاده از معیار تقسیم بندی پاسکویل تعیین شد. با توجه به داده های هواشناسی دریافتی از نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی خوزستان، پایداری جوی محل در روز معادل E و در شب مساوی F در نظر گرفته شد. میانگین سرعت باد و جهت آن و نیز میانگین دمای شب و روز از داده های هواشناسی شهرستان ماهشهر استان خوزستان به صورت جدول ۱ استخراج و استفاده شد. پستی و بلندی های زمین اطراف محل انتشار نیز با توجه به شرایط محیط اطراف ۱ متر در نظر گرفته شد.

جدول ۱. شرایط آب و هوایی محل مطالعه (میانگین دو سال اخیر ۹۲-۱۳۹۳)

فصل	تابستان		زمستان	
شبانه روز	روز	شب	روز	شب
میانگین دمای هوا، °C	۵۱/۰	۳۱/۰	۲۰/۷	۱۲/۰
میانگین رطوبت نسبی، %	۵۱/۰	۵۱/۰	۸۱/۰	۸۱/۰
سرعت باد، m/s	۹/۰	۹/۵	۶/۸	۷/۵
درجه پایداری هوا	E	F	E	F

در این مطالعه کلیه سناریوهای محتمل شبیه سازی شدند. اولین داده ای ورودی برای محاسبات تخلیه، ابعاد شکاف ایجاد شده است. در حالت کلی تعیین ابعاد شکاف ایجاد شده بر روی مخازن با استفاده از سوابق موجود در واحدهای مورد نظر انجام می شود. در این مطالعه با توجه به اینکه سوابق مربوط به نشی و پارگی مخازن موجود نبود، از ابعاد مختلف نشی با استفاده از جداول ارائه شده توسط شرکت DNV² استفاده شد. شرکت نام برده یک سازمان معتبر است که در زمینه نشی از مخازن جداول مختلفی را بر اساس نشی های اتفاق افتاده در حوادث مهم صنایع فرآیندی ارائه می دهد (۲۱). بدین منظور در مجموع ۱۶ سناریو بر اساس سه حالت نشی (نشی با قطر ۱۰، ۵۰ و ۱۵۰ میلی متر) و یک حالت پارگی کامل (مجموعاً چهار حالت نقص) مدل سازی شد. مدل سازی برای هر کدام از سناریوها در

محاسبه درصد مرگ و میر ناشی از گرمای تابشی آتش فورانی: برای محاسبه درصد مرگ و میر حوادث فرآیندی از روابط پروبیت (Probit) استفاده می‌شود.

$$Y = -149 + 2.56 \ln \left(\frac{t \times I^{1.333}}{10^4} \right) \quad (2)$$

Y = تابع کمی Probit

I = شدت تابش (وات بر مترمربع)

t = مدت زمان مواجهه با شعله (ثانیه)

برای ارزیابی کمی ریسک، زمان مواجهه با گرمای تابشی ناشی از آتش فورانی، ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد که بر اساس تخمین نرم افزار مدت زمان تخلیه محتویات مخزن است (۲۳). با استفاده از معادله (۲)، درصد مرگ و میر افراد در اثر مواجهه با گرمای تابشی ناشی از حریق محاسبه شد. اثرات ناشی از مواجهه با گرمای تابشی برحسب شدت حرارت متفاوت است. در جدول ۳، پیامدهای گرمای تابشی برای انسان، تجهیزات و ساختمان‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳. پیامد سطوح مختلف تابش حرارتی بر انسان، تجهیزات و ساختمان‌ها (۲۴)

پیامد	شدت گرمای تابشی (KW/m ²)
خسارت به واحدها و تجهیزات فرآیندی، ایجاد مرگ آنی برای افراد در معرض	۳۷/۵
حداقل انرژی مورد نیاز برای احتراق چوب در طی تماس طولانی مدت	۲۵
آسیب جدی به افراد در معرض (در صورت نرسیدن گروه نجات موجب مرگ می‌شود)	۲۰
حداقل انرژی لازم برای ایجاد جرقه در پالت‌های چوبی و ذوب شدن مواد پلاستیکی	۱۲/۵
آستانه درد بعد از ۸ ثانیه، سوختگی درجه ۲ بعد از ۲۰ ثانیه	۹/۵
ایجاد درد در افرادی که حداقل ۲۰ ثانیه در معرض آن باشند، سوختگی درجه اول	۴/۵

ارزیابی احتمال مرگ و میر در اثر انفجار

و یا مرگ به وجود می‌آید. جدول ۴ پیامدهای مخرب موج فشار ناشی از انفجار بر تجهیزات، ساختمان‌ها و افراد را نشان می‌دهد.

در اثر انفجار و انتشار موج فشار ناشی از آن در محیط، عوارض مختلفی مانند پارگی پرده گوش، آسیب به قسمت‌های گوناگون بدن

جدول ۴. اثرات موج فشار ناشی از انفجار بر تجهیزات، ساختمان‌ها و افراد (۲۴)

پیامد مخرب	موج فشار (psi)
مرگ ۱ تا ۹۹ درصد جمعیت در معرض به علت موج انفجار	۱۴/۵ - ۲۹
تخریب کامل ساختمان‌ها	۱۰
خسارت شدید به سازه‌های اصلی و سنگین	۵
آسیب غیرقابل جبران به تجهیزات اصلی	۳
پارگی پرده گوش و خسارت به سازه‌های سبک	۲/۵
ایجاد خسارت قابل جبران، فرو ریختن سازه‌های سبک	۲
احتمال شکستن پنجره‌ها و آسیب در اثر برخورد قطعات آن	۱
شکسته شدن ده درصد شیشه‌ها	۰/۷
آسیب جزئی به ساختمان‌ها	۰/۳

یافته‌ها

مجتمع پتروشیمی مورد مطالعه در زمینی به مساحت ۱۰۸ هکتار در سایت ۳ منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی بندر امام واقع در شهرستان ماهشهر (استان خوزستان) احداث گردیده است. از این مساحت ۴۶ هکتار به واحد پلی وینیل کلراید (PVC)^۳ اختصاص داده شده است. تراکم جمعیت در نوبت‌های کاری متفاوت است. بررسی‌ها نشان داد که جمعیت کل مجتمع برابر با ۱۸۰۰ نفر است که در نوبت روز ۱۴۵۰ نفر و در نوبت شب ۳۵۰ نفر مشغول به فعالیت می‌باشند. با توجه به تعداد کل جمعیت و سطح زیربنای مجتمع تراکم جمعیت در هر یک از نوبت‌های روز و شب به شرح زیر است.

$$(۳) \quad \text{تراکم جمعیت در روز} = \frac{1450 \text{ Person}}{1080000} = 0.0013 \left(\frac{\text{person}}{\text{m}^2} \right)$$

$$(۴) \quad \text{تراکم جمعیت در شب} = \frac{350 \text{ Person}}{1080000} = 0.00032 \left(\frac{\text{person}}{\text{m}^2} \right)$$

۱. نتایج مدل‌سازی انفجار:

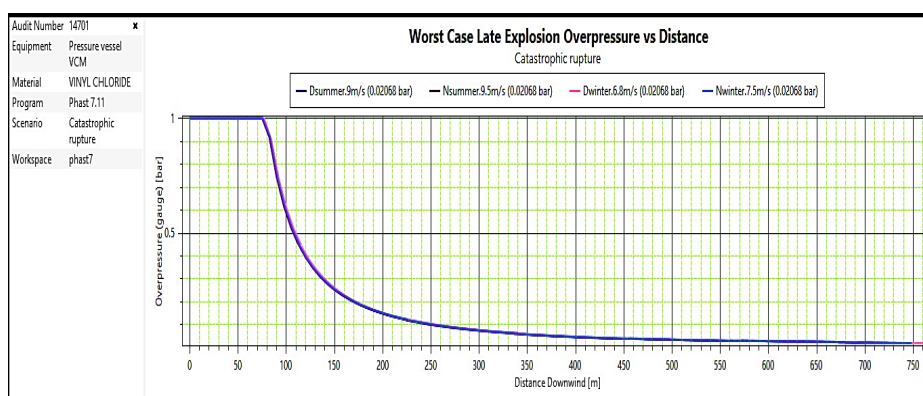
مهم‌ترین و اصلی‌ترین پیامد انفجار، موج فشار ایجاد شده در اثر رها شدن ناگهانی انرژی نهفته در ماده انفجاری (ابر بخار) است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در صورت بروز شکاف ۱۰ میلی‌متری، تراکم

ابر بخار تشکیل شده از رهایش ماده مونومر وینیل کلراید در مدت شبیه‌سازی شده (۱۰ دقیقه) (۲۱) به حد بالا و پائین اشتعال ماده مورد نظر (۳/۶ تا ۳۳ درصد) نمی‌رسد. در نتیجه موج فشار نیز در پی نخواهد داشت و خسارتی را شامل نمی‌شود. اما در صورت بروز شکاف‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میلی‌متر تراکم ماده رها شده به حد بالا و پائین اشتعال رسیده و منفجر خواهد شد. در این صورت کمترین شعاع تحت تأثیر فشار ناشی از موج انفجار مربوط به نشتی ۵۰ میلی‌متری (مساوی ۱۱ متر) و بیشترین آن مربوط به پارگی کامل (مساوی ۷۹ متر) است. شعاع تحت تأثیر فشار ناشی از موج انفجار و پیامد آن برای هر کدام از اندازه‌های نشتی در جدول ۵ ارائه شده است. طبق جدول ۵ خطرناک‌ترین حالت، پارگی کامل مخزن است. تغییرات موج انفجار این حالت در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق شکل، بیشترین موج فشار ایجاد شده (یک‌بار) در پارگی کامل مخزن در فاصله بین ۰ تا ۸۰ متری از مرکز ابر بخار است. با توجه به مساحت تحت تأثیر موج انفجار در سناریوهای مورد مطالعه، درصد مرگ و میر جمعیت در مواجهه دو نوبت شب و روز به شرح زیر در جدول ۶ گزارش شده‌اند.

ریسک فردی و جمعی از دیگر مواردی است که در نتیجه مدل‌سازی انفجار و آتش‌فروانی مخازن وینیل کلراید به دست آمده است. ریسک فردی، احتمال کشته شدن یک شخص در نزدیکی محل حادثه را نشان می‌دهد.

جدول ۵. شعاع تحت تأثیر (متر) موج فشار ایجاد شده در سناریوهای مختلف

موج انفجار، بار	پیامد	۵۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	پارگی کامل
۱	مرگ ۱ تا ۹۹ درصد جمعیت در معرض، تخریب کامل ساختمان‌ها	۱۱	۱۴	۷۹
۰/۱۴	ایجاد خسارات قابل جبران و فرو ریختن سازه‌های سبک	۱۸	۲۶	۲۱۴
۰/۰۲	آسیب جزئی به ساختمان‌ها	۴۳	۷۲	۷۶۲



شکل ۱. فشار موج انفجار ابر بخار بر حسب بار نسبت به فاصله طی شده در پارگی کامل مخزن

۳. Poly vinyl chloride

از سیال تشکیل می‌دهند که در صورت وجود منبع جرقه، نوعی حریق به نام حریق فورانی (Jet Fire) را به وجود می‌آورد. پیامد اصلی ناشی از حریق فورانی، تابش‌های گرمایی هستند. با توجه به اینکه آتش فورانی به صورت جریان پرفشاری از سیال قابل اشتعال از منفذ کوچک تحت فشار ایجاد می‌شود، در صورت پارگی کامل مخزن جریان سیال پرفشار نبوده و در نتیجه جت مربوطه تشکیل نمی‌گردد. بنابراین در سناریوی پارگی کامل اثر آتش فورانی دیده نمی‌شود.

بیشترین مساحت تحت پوشش آتش فورانی مربوط به سناریوی یازدهم (S11) و مساوی ۱۸۶۱ مترمربع است و کمترین مساحت تحت پوشش آتش فورانی مربوط به سناریوی پنجم (S5) و مساوی ۱۸۵ مترمربع است. بیشترین پوشش تابش ناشی از این نوع حریق در سناریوی دهم (S10) و تا حداکثر فاصله ۵۹/۴ متر را شامل می‌شود و حداقل پوشش تابش در سناریوی پنجم (S5) و تا فاصله ۲۰/۴ متر از مخزن است.

منظور از مساحت تحت تأثیر، مساحتی است که شدت تابش آتش فورانی در این ناحیه باعث مرگ و میر افراد می‌شود. مساحت تحت تأثیر سایر سناریوها در جدول ۷ درج شده است. در نشی از سوراخ ۱۰ میلی متری بیشترین شدت تابش مربوط به روز زمستان (S3) به مقدار ۲۰/۵ کیلووات بر مترمربع است. در نشی ۵۰ میلی متری بیشترین شدت تابش در سناریوی هفتم به مقدار ۱۶۲ کیلووات بر مترمربع است. بیشترین شدت تابش در نشی ۱۵۰ میلی متری در سناریوی یازدهم به مقدار ۲۱۰ کیلووات بر مترمربع است.

جدول ۷. مساحت تحت تأثیر آتش فورانی در سناریوهای مختلف

سناریو	شعاع تحت تأثیر (m)		مساحت تحت تأثیر (m ²)
	۱۲/۵ (kw/m ²)	۳۷/۵ (kw/m ²)	
S1	۴/۲۹	۰	۰
S2	۴/۳۷	۰	۰
S3	۴/۴۹	۰	۰
S4	۴/۵۱	۰	۰
S5	۲۵/۲۵	۲۰/۴	۱۸۵
S6	۲۵/۴۰	۲۰/۷۴	۱۹۲
S7	۲۵/۹۳	۲۰/۳۵	۱۹۳
S8	۲۵/۸۷	۲۱/۶۵	۱۹۸
S9	۶۹/۳۵	۵۷/۲۶	۱۷۲۸
S10	۶۹/۹۳	۵۷/۵	۱۵۹۸
S11	۷۱/۳۲	۵۹/۴	۱۸۶۱
S12	۷۰/۳۰	۵۹/۱	۱۸۵۰

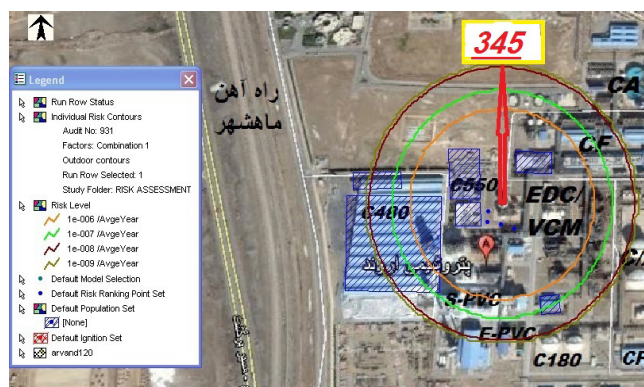
جدول ۶. درصد مرگ و میر افراد ناشی از موج انفجار ایجاد شده در

سناریوهای مختلف در شب و روز

اندازه نشی (mm)	شعاع تحت تأثیر (m)	مرگ و میر (%)	
		نوبت روز	نوبت شب
۵۰	۱۱	۱/۴۴	۰/۳۵
۱۵۰	۱۴	۱/۷۹	۰/۵۷
پارگی کامل	۷۹	۱۰/۲۷	۲/۵۷

۱.۱. ریسک فردی سناریوهای پارگی کامل مخزن

شکل ۲ کانتورهای میانگین سالانه ریسک فردی مخزن ذخیره کننده مونومر وینیل کلراید را نشان می‌دهد. مقادیر این کانتورها از داخل به بیرون به ترتیب برابر با 10^{-6} ، 10^{-7} و 10^{-8} است. نواحی که در داخل کانتور 10^{-6} قرار دارند نشان دهنده ریسک غیرقابل قبول هستند و نواحی که در داخل کانتور 10^{-7} قرار دارند نشان دهنده ریسک در سطح ALARP می‌باشند. همچنین نواحی که بیرون از کانتور 10^{-8} قرار دارند نشان دهنده ریسک قابل قبول است. در این شکل حریم ایمن نسبت به مخزن VCM نیز نشان داده شده است. حریم ایمن برابر فاصله حد مرزی مخزن VCM تا کانتور ریسک قابل قبول (10^{-8}) است که برابر با ۳۴۵ متر است. بیشترین ریسک فردی در فاصله بین ۱۱۰ تا ۲۷۰ متری است.



شکل ۲. کانتورهای ریسک فردی مخزن وینیل کلراید در سناریوهای پارگی کامل مخزن

۲. نتایج مدل سازی آتش فورانی:

بر اساس نوع مخزن و نوع رهایش ماده در محیط، حریق فورانی ایجاد می‌شود. در صورتی که مواد قابل اشتعال از منفذ کوچکی از منابع تحت فشار به بیرون راه یابند، جریان پرفشاری (جتی)



شکل ۳. کانتورهای ریسک فردی مخزن وینیل کلراید

بحث

این مطالعه باهدف ارزیابی ریسک و مدل سازی پیامدهای انفجار و آتش فورانی در مخزن وینیل کلراید در یک صنعت پتروشیمی انجام شد. در این مطالعه از نرم افزار PHAST به منظور انجام مدل سازی رهايش و نشت وینیل کلراید از مخازن استفاده شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که به ترتیب سناریوهای پارگی کامل و سناریوهای مربوط به نشتی از شکاف ۱۵۰ میلی متر، پرمخاطره ترین سناریوهای مخزن نگهداری مونومر وینیل کلراید می باشند.

در صورت بروز شکاف ۱۰ میلی متری، تراکم ابر بخار تشکیل شده از رهايش ماده مونومر وینیل کلراید به حد بالا و پائین اشتعال ماده موردنظر نمی رسد. در نتیجه موج فشار نیز در پی نخواهد داشت و خسارتی را شامل نمی شود. اما در صورت بروز شکاف های بزرگ تر از ۱۰ میلی متر تراکم ماده رها شده به حد بالا و پائین اشتعال رسیده و منفجر خواهد شد. نتایج مطالعه لی و همکاران نشان داد شعاع صدمات ناشی از انفجار و فشار بخار برای هر ماده به طور مشابه افزایش می یابند. علاوه بر این شعاع صدمات ناشی از نشت و انفجار مواد در غلظت های بسیار پایین مواد قابل چشم پوشی است (۲۵) که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. نشتی بزرگ منجر به تخلیه و متعاقباً انتشار بیشتر مواد قابل اشتعال در محیط شده و در صورت وجود منابع جرقه منجر به حوادث خطرناک تر می شود.

مهم ترین و اصلی ترین پیامد انفجار، موج فشار ایجاد شده ناشی از آن است که می تواند شعاع مشخصی را تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس نتایج مدل سازی، کمترین شعاع تحت تأثیر فشار ناشی از موج انفجار مربوط به نشتی ۵۰ میلی متری (مساوی ۱۱ متر) و بیشترین آن مربوط به پارگی کامل (مساوی ۸۰ متر) است که نشان می دهد خطرناک ترین حالت، پارگی کامل مخزن است. نتایج مطالعه ای که بر روی مخازن ذخیره سازی هیدروژن انجام شد نشان می دهد که در پارگی کامل شعاع تحت تأثیر در موج فشار ۰/۱ بار برابر با ۱۱۰ متر

۱.۲. برآورد میزان مرگومیر ناشی از آتش فورانی در سناریوهای مربوط به نشتی ۱۵۰ میلی متر

با توجه به نتایج به دست آمده، نشتی از شکاف ۱۵۰ میلی متر به عنوان بدترین سناریو است. در نشتی ۱۵۰ میلی متر بیشترین مساحت تحت تأثیر مربوط به روز زمستان (S11) با مساحت حدود ۱۸۶۱ مترمربع و فاصله تحت تأثیر ۵۹/۴ متر است. با توجه به اینکه نزدیک ترین واحد به مخزن وینیل کلراید، واحد آزمایشگاه، واحد C-560 و انبار محصول به ترتیب با ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ متر فاصله است، شعاع آتش فورانی در سناریوی S11 به واحدهای مربوطه نمی رسد.

در نتیجه میزان مرگومیر در این واحدها صفر است. عامل دیگری که مانع رسیدن شدت تابش آتش فورانی به واحدهای نام برده می شود، جهت باد غالب در شهرستان ماهشهر است. جهت باد غالب در این شهرستان از سمت شمال غربی به سمت جنوب شرقی است که در این محدوده واحدی قرار ندارد.

بر اساس نتایج مدل سازی درصد مرگومیر در شدت تابش های مختلف، شامل ۳۷/۵ کیلو وات بر متر مربع (با احتمال مرگومیر ۹۸/۷۴ درصد)، ۱۲/۵ کیلو وات بر متر مربع (با احتمال مرگومیر ۶/۷ درصد) و ۴ کیلو وات بر متر مربع (با احتمال مرگومیر صفر درصد) است. مرگومیر ناشی از تابش های آتش فورانی وابسته به فاصله و تراکم جمعیت در محدوده تحت تأثیر حریق است. بدیهی است که در فواصل نزدیک تر و تراکم تر درصد مرگومیر افزایش می یابد.

۲.۲. ریسک فردی سناریوهای نشتی ۱۵۰ میلی متر

شکل ۳ کانتورهای ریسک فردی مخزن ذخیره کننده مونومر وینیل کلراید را نشان می دهد، مقادیر این کانتورها از داخل به بیرون به ترتیب برابر با 10^{-7} ، 10^{-8} و 10^{-9} است. نواحی که در داخل کانتور 10^{-7} قرار دارند نشان دهنده ریسک غیر قابل قبول هستند و نواحی که در داخل کانتور 10^{-8} قرار دارند نشان دهنده ریسک در سطح ALARP می باشند. همچنین نواحی بیرون از کانتور 10^{-9} نشان دهنده ریسک قابل قبول است.

در این شکل حریم ایمن نسبت به مخزن مونومر وینیل کلراید نیز نشان داده شده است. حریم ایمن برابر فاصله حد مرزی مخزن تا کانتور ریسک قابل قبول (10^{-9}) است که برابر با ۱۲۰ متر است. نتایج مدل سازی نشان می دهد که بیشترین ریسک فردی در فاصله ۲۵ تا ۷۰ متری از ضلع غربی و فاصله ۱۱۰ تا ۱۴۵ متری ضلع شرقی است. در این حالت مخزن بین این دو ناحیه قرار دارد.

میابد که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (۲۹). نتایج مطالعه‌ای که به منظور مدل‌سازی مخازن تحت فشار هیدروژن انجام شد نشان می‌دهد که پارگی کامل مخزن به عنوان خطرناک‌ترین سناریو در حریق فورانی است و مساحت تحت تأثیر آن ۱۹۷۰ مترمربع بوده و فاصله تحت تأثیر آن نیز ۲۲۵ متر است (۲۷). در مطالعه هراتی و همکاران که باهدف مدل‌سازی نشت پروپیلن اکساید انجام شد به این نتیجه رسیدند که بیشترین تابش‌های گرمایی در حالت پارگی کامل مخزن بوده و فاصله ۸۰ متری بیشترین فاصله تحت تأثیر است (۳۰) که نزدیک به نتایج مطالعه حاضر است. علیرغم اینکه با توجه به ماهیت این نوع حریق در سناریوی پارگی کامل، اثر حریق فورانی دیده نمی‌شود.

حریم ایمن برابر فاصله حد مرزی مخزن تا کانتور ریسک قابل قبول (۱۰^{-۹}) است که برابر با ۱۲۰ متر است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که بیشترین ریسک فردی در فاصله ۲۵ تا ۷۰ متری از ضلع غربی و فاصله ۱۱۰ تا ۱۴۵ متری ضلع شرقی است. در این حالت مخزن بین این دو ناحیه قرار دارد. نتایج مطالعه زارعی فاصله ایمن از حریق را ۱۶۵ متر بیان می‌کند که نزدیک به نتایج مطالعه حاضر است.

همچنین نتایج نشان داد با توجه به شرایط محیطی، پایداری جوی، سرعت باد و دمای محیط، در فصل زمستان نسبت به فصل تابستان احتمال وقوع مخاطرات شدیدتری وجود دارد. دمای پایین، رطوبت نسبی بالا و شرایط جوی ثابت در زمستان باعث می‌شود تا به مرور غلظت ابر بخار مواد ناشی در سطح زمین افزایش یافته و متراکم‌تر شوند (۲۱) که متعاقباً وقوع خطرات شدیدتری را به دنبال خواهد داشت.

اندازه ناشی بزرگ‌تر، پیامدهای خطرناک‌تر و متعاقباً تلفات بیشتری را در پی خواهد داشت به طوری که نتایج شبیه‌سازی نشان داد که به ترتیب سناریوهای پارگی کامل (سناریوهای S۱۳، S۱۴، S۱۵ و S۱۶) و سناریوهای مربوط به ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متر (سناریوهای S۹، S۱۰، S۱۱ و S۱۲) پرمخاطره‌ترین سناریوهای مخزن نگهداری منومر وینیل کلراید می‌باشند. بیشترین میزان مرگ‌ومیر ناشی از آتش فورانی در ارتباط با مخزن منومر وینیل کلراید با توجه به مساحت تحت تأثیر و شعاع تحت تأثیر مربوط به سناریوی ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متر است. در این سناریو، در صورتی که جمعیت حاضر در فاصله کمتر از ۷۵ متر با مخزن منومر وینیل کلراید فاصله داشته باشند بیشترین میزان مرگ‌ومیر ناشی از آتش فورانی مربوط به ناشی ۱۵۰ میلی‌متر به ترتیب در سناریوی یازدهم (ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متری در روزهای فصل زمستان)، سناریوی دوازدهم (ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متری در شب‌های فصل زمستان)، سناریوی دهم (ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متری در شب‌های فصل تابستان) و سناریوی نهم (ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متری در روزهای فصل

است (۲۶) و همچنین در مطالعه‌ای دیگر نتایج نشان می‌دهد که پارگی کامل مخزن دارای بیشترین موج انفجاری است که تا فاصله ۵۵ متری می‌تواند باعث ایجاد موج فشار ۰/۸۳ بار شود که کمتر از نتایج مطالعه حاضر هستند (۲۷). در حالیکه در مطالعه‌ای دیگر این فاصله ۳۰۹۰۰ متر بیان شده است که بسیار بیشتر از نتایج مطالعه حاضر است. البته باید توجه داشت که در این مطالعه، حجم زیادی از مواد ذخیره‌سازی شده‌اند (۲۸). همچنین نتایج شبیه‌سازی پیامد انفجار در مخزن وینیل کلراید نشان داد که کمترین شدت پیامد انفجار در ناشی ۵۰ میلی‌متری است. انتظار می‌رود انفجار ناشی از این ناشی باعث مرگ ۱ تا ۹۹ درصد جمعیت حاضر در شعاع ۱۱ متری و تخریب کامل ساختمان‌های موجود در این شعاع گردد. همچنین بیشترین شدت انفجار در پارگی کامل مخزن بوده و انتظار می‌رود انفجار ناشی از ناشی وینیل کلراید در اثر پارگی کامل مخزن باعث مرگ ۱ تا ۹۹ درصد افراد حاضر در شعاع ۸۰ متری محل ناشی شده و کلیه ساختمان‌های موجود در این محدوده را به طور کامل تخریب نماید.

با توجه به مساحت تحت تأثیر موج انفجار در سناریوهای مورد مطالعه، پارگی کامل مخزن می‌تواند باعث مرگ‌ومیر بیش از ۱۰ درصد جمعیت در معرض مواجهه در نوبت روز شود. نتایج مطالعه زارعی و همکاران نشان می‌دهد که نرخ مرگ‌ومیر ناشی از موج فشار انفجار در نوبت روز بیشتر از نوبت شب است که علت آن تراکم بیشتر جمعیت در طول روز است و با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (۲۱).

ریسک فردی انفجار، احتمال کشته شدن یک شخص در نزدیکی محل حادثه را نشان می‌دهد. حریم ایمن برابر فاصله حد مرزی مخزن VCM تا کانتور ریسک قابل قبول (۱۰^{-۸}) است که برابر با ۳۴۵ متر است. بیشترین ریسک فردی در فاصله بین ۱۱۰ تا ۲۷۰ متری است.

پیامد اصلی ناشی از حریق فورانی، تابش‌های گرمایی هستند. با توجه به اینکه آتش فورانی به صورت جریان پرفشاری از سیال قابل اشتعال از منفذ کوچک تحت فشار ایجاد می‌شود، در صورت پارگی کامل مخزن جریان‌ات سیال پرفشار نبوده و در نتیجه جت مربوطه تشکیل نمی‌گردد. بنابراین در سناریوی پارگی کامل اثر حریق فورانی دیده نمی‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده مدل‌سازی حریق فورانی، ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متر به عنوان بدترین سناریو است. در ناشی ۱۵۰ میلی‌متر بیشترین مساحت تحت تأثیر مربوط به روز زمستان (S۱۱) با مساحت حدود ۱۸۶۱ مترمربع و فاصله تحت تأثیر ۵۹/۴ متر است. بیشترین شدت تابش مربوط به ناشی ۱۵۰ میلی‌متر در سناریوی یازدهم به مقدار ۲۱۰ کیلووات بر مترمربع است. با افزایش قطر ناشی، محدوده تحت تأثیر شعاع تابش گرمایی ناشی از حریق افزایش چشمگیری

و برنامه‌ریزی شده را در جهت آموزش کارکنان واحد در دستور کار قرارداد. با توجه به اینکه واحد مورد مطالعه یکی از قطب‌های تولید پی‌وی‌سی است بنابراین لازم است تا با بازرسی‌های مداوم و برنامه‌ریزی شده و همچنین استفاده از ارزیابی ریسک و تشخیص به‌موقع و پیشگیرانه خطرات از وقوع حوادث خصوصاً انفجار در این مخازن جلوگیری کرد. همان‌گونه که جعفری و همکاران (۱، ۲) در مطالعه خود نشان داده‌اند، می‌توان با استفاده از مخازن کوچک‌تر در فاز ساخت واحدهای مشابه و یا تعدیل شرایط عملیاتی (فشار و دما) و درواقع با رعایت اصول ایمنی طراحی ذاتاً ایمن مثل بهینه‌سازی، جایگزینی، تعدیل و محدودسازی اثرات شدت پیامدها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. راهکار دیگر برای کاهش احتمال وقوع نشتی استفاده از مخازن دوجداره است، به این صورت که در فضای بین دوجداره مخزن، یک گاز خنثی مثل نیتروژن وارد می‌شود و این گاز به‌طور پیوسته نمونه‌برداری و آزمایش می‌شود. در صورت وجود وینیل کلراید در این گاز محتویات مخزن به‌طور خودکار به یک مخزن زیرزمینی منتقل می‌شود. این روش به‌عنوان یک روش به‌روز در دنیا استفاده می‌شود (۳۵).

ساختمان‌های اطراف باید پوشش‌گذاری حرارتی شوند. همچنین باید از مصالح مقاوم در برابر انفجار و شیشه‌های کوچک و حمایت‌شده استفاده نمود. دستورالعمل‌های واکنش در شرایط اضطراری باید مشخص و مدون باشد.

از نقاط قوت این مطالعه، تعیین نقاط تحت خطر با توجه به تراکم جمعیت موجود در آن‌ها در فواصل مختلف تحت تأثیر انفجار یا حریق هست.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مطالعه از کارکنان و مسئولین محترم پتروشیمی مورد مطالعه که ما را در انجام این پروژه یاری نمودند، مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز می‌دارند. همچنین این مطالعه بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی است که در دانشکده بهداشت و ایمنی به تصویب رسیده است.

تابستان) است. مطالعه انجام‌شده به‌منظور ارزیابی کمی ریسک واحد هیدروژن نشان داد که بیشترین میزان مرگ‌ومیر ناشی از آتش ناگهانی و فورانی مربوط به سناریوهای پارگی کامل است (۳۴) که با این مطالعه همخوانی ندارد. علت متفاوت بودن نتایج دو مطالعه احتمالاً به دلیل متفاوت بودن ویژگی‌های دو ماده وینیل کلراید و هیدروژن و شرایط ذخیره آن‌ها در مخازن نگهداری است. هرگونه نشتی احتمالی از مخزن مورد مطالعه، پیامدهای فاجعه باری دربر خواهد داشت. این نشان‌دهنده وجود سطح ریسک بسیار بالا و غیرقابل‌قبول است. برای کاهش ریسک باید یکی از پارامترهای شدت، احتمال و یا میزان مواجهه را کم کرد. وینیل کلراید در شرایط دما و فشار محیط به‌صورت گاز است. پس در صورت وقوع نشتی، این ماده به‌صورت گاز در محیط پراکنده می‌شود. در صورتی که منبع جرقه بلافاصله در جوار مخزن وجود نداشته باشد، ابر بخار تشکیل می‌شود و به‌محض رسیدن به یک منبع جرقه انفجار ابر بخار رخ می‌دهد. در صورت وجود منبع جرقه در جوار مخزن، در هنگام رهاش امکان آتش فورانی یا ناگهانی وجود دارد.

با در نظر گرفتن سطوح آسیب ناشی از موج انفجار و نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی لازم جهت پیشگیری از میزان خسارات، جانمایی تجهیزات مجاور، کنترل آلودگی و طرح واکنش در شرایط اضطراری در این صنایع انجام شود. علاوه بر این اجرای قوانین ایمنی و برطرف کردن نقایص ایمنی در مخازن نگهداری وینیل کلراید و در نظر گرفتن پارامترهای دما و فشار در فرایند، پارامترهای محیطی مانند شرایط دمایی و رطوبت و پارامترهای مربوط به ماده مثل سمیت، درجه اشتعال‌پذیری و خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌توانند تأثیر بسزایی در کاهش پیامدهای مخرب انفجار مخازن نگهداری وینیل کلراید داشته باشند (۱۶).

با توجه به اینکه بیشترین درصد مرگ‌ومیر ناشی از موج انفجار در اثر پارگی کامل مخزن و در آتش فورانی ناشی از شکاف ۱۵۰ میلی‌متری است در نتیجه باید بازرسی‌های فنی و بازدیدهای مستمر از مخازن به‌منظور پیش‌بینی و پیش‌گیری از خوردگی و پوسیدگی اتصالات و تجهیزات انجام شود. همچنین باید مانورهای منظم

References

1. Yang R, Gai K, Yang F, Zhang G, Sun N, editors. Simulation of pressure tank leakage based on PHAST. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019: IOP Publishing.[Scopus].
2. javad Jafarei M. The effect of reducing the volume and working pressure propane tank on the consequences

of the effects of flash fire and jet fire. Safety Promotion and Injury Prevention. 2017;4(4):245-52.

3. Alireza A. Risk Analysis of Ammonia Storage Tanks and Risk Calculation of Residential Areas Iranian Petrochemical Conference. 2008;1.

4. Kariznovi H, Farshad AA, Yarahmadi R, Khosravi Y, Yari P. Consequence Analysis of fire and explosion of a cylindrical LPG tank in a selected industry of oil and gas. *Iran Occupational Health*. 2017;14(3):37-45.
5. Assari MJ, Kalatpour O, Zarei E, Mohammadfam I. Consequence modeling of fire on Methane storage tanks in a gas refinery. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2016;3(1):51-9.
6. Jafari M, Mohammadfam I, Zarei E. Analysis and simulation of severe accidents in a steam methane reforming plant. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2014;6(3):120-30.
7. Jafari MJ, Askarian AR, Omid L, Lavasani MRM, Taghavi L, Ashori AR. The assessment of independent layers of protection in gas sweetening towers of two gas refineries. *Safety promotion and injury prevention (Tehran)*. 2014;2(2):103-12.
8. Kashi E, Bahoosh M. Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2020;37(1):203-12.[Scopus].
9. Kamaei M, Alizadeh SSA, Keshvari A, Kheyrikhah Z, Moshashaei P. Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery. *Health and Safety at Work*. 2016;6(2):10-24.
10. Mannan S. *Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth-Heinemann; 2013.
11. Naemnezhad A, Isari AA, Khayer E, Olya ME. Consequence assessment of separator explosion for an oil production platform in South of Iran with PHAST Software. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(1):43.
12. Zarei E, Mohammadfam I, Azadeh M, Mirzaei-Aliabadi M. Dynamic process accident analysis: comparison of bow tie and Bayesian network models. *Safety Promotion and Injury Prevention*. 2017;5(4):201-12.
13. Lester D, Greenberg LA, Adams WR. Effects of single and repeated exposures of humans and rats to vinyl chloride. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1963;24(3):265-75.
14. Mastromatteo E, Fisher A, Christie H, Danziger H. Acute inhalation toxicity of vinyl chloride to laboratory animals. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1960;21(5):394-8.
15. Tayfeh Rr, Rezazadeh Am, Jafari Mj, Soori H, Saranjam B, Tavakol E, Karimi M. Evaluation Of Occupational Exposure With Vinyl Chloride Monomer In The Plastic Production Industry In Tehran *Journal Of Safety Promotion And Injury Prevention*. 2014;2(5):259-66.
16. Cheraghi H, Soltanzadeh A, Ghiyasi S. Consequence modeling of the ethylene oxide storage tanks explosion using the PHAST software (a case study in a petrochemical industry). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2018;11(2):261-70.
17. Mousavi J, Parvini M. Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016;40:29-42.
18. Dadashzadeh M, Khan F, Hawboldt K, Amyotte P. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. *Fire safety journal*. 2013;61:324-37.
19. Malviya RK, Rushaid M. Consequence analysis of LPG storage tank. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):4359-67.
20. Min LQ, Hong L, Lian S, editors. Study on safe distance and strength check of natural gas flaring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; 2019: IOP Publishing.[Scopus].
21. 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.

22. Bahmani R. Consequence modelling of vinyl chloride accidental release from tanks in a petrochemical plant using PHAST method in 2015 (Doctoral dissertation, Dissertation). faculty health Shahidbeheshti university medical science. Available from: <http://dlib.sbm.ac.ir/site/catalogue/120884>.

23. Mohammadfam I, Zarei E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. international journal of hydrogen energy. 2015;40(39):13653-63.

24. Jahangiri M, Norouzi MA. Management and risk assessment; Quantitative assessment of risks in the process industry. Theran: Fanavaran Publication.;2012:2-10.

25. Lee HE, Yoon SJ, Sohn J-R, Huh D-A, Jang S-W, Moon KW. Suitability assessment of legal regulation of chemical concentrations according to vapor pressure and damage radius. International journal of environmental research and public health. 2019;16(3):347.

26. Rosyid OA. System-analytic safety evaluation of the hydrogen cycle for energetic utilization.

27. Jafari M, Zarei E, Dormohammadi A. Presentation of a method for consequence modeling and quantitative risk assessment of fire and explosion in process industry (Case study: Hydrogen Production Process). Health and Safety at Work. 2013;3(1):55-68.

28. Moonis M, Wilday AJ, Wardman MJ. Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society. Process Safety and Environmental Protection. 2010;88(2):97-108.

29. Mohammadi G, Azimi Y, Sarkheil H, Bodaghamali

J. Modeling and Evaluation of the Benzene Leakage Consequences in the Coking Plant of Isfahan Steel Company. Safety Promotion and Injury Prevention. 2019;7(1):10-9.

30. Harati B, Karimi A, Askari A, Dehghani F, Nasrollahi A. Modeling and evaluation of safety consequences of propylene oxide leakage, a petrochemical company. Journal of Health and Safety at Work. 2018;8(2):199-209.

31. Jafari M J, Zarei E, Dormohammadi A. Presentation of a method for consequence modeling and quantitative risk assessment of fire and explosion in process industry (Case study: Hydrogen Production Process). JHSW. 2013; 3 (1) :55-68.

32. Seungkyu Dan JHK, Qiang Wang, Dongil Shin, En Sup Yoon., editor A Study on Quantitative Risk Analysis for Fire and Explosion in LNG-Liquefaction Process of LNG-FPSO. Proceedings of the 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA); 25 - 27 June 2013.

33. Sharma R, Gurjar B, Wate S, Ghuge S, Agrawal R. Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. accident at Jaipur, India. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013;26(1):82-90.

34. 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.

35. Suciu I, Prodan L, Ilea E, Păduraru A, Pascu L. Clinical manifestations in vinyl chloride poisoning. Annals of the New York Academy of Sciences. 1975;246(1):53-69.

