

The modeling of toxic consequence of Ammonia release in industrial refrigerators

Mohsen Sadeghi Yarandi¹ ; Mohsen Mahdinia² ; Javad Barazadeh² ;
Ahmad Soltanzadeh^{2*} 

1- Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

2- Department of Occupational Safety & Health Engineering, Faculty of Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran

Abstract

Background and Aims: Ammonia is a toxic gas and is used as a refrigerant due to its special thermodynamic properties. This study was designed to evaluate the toxic effects of ammonia leakage in an industrial refrigerator.

Materials and Methods: The present study was conducted in an industrial refrigerator in 2019. Due to its widespread use in industrial refrigerators, reservoirs containing ammonia gas were selected as the center of hazards. Given the potential damage of this chemical, only the toxic dimension of this gas was evaluated. Also, owing to the importance of determining the extent of human vulnerability, the scenarios were evaluated in the worst condition and in the case of the catastrophic rupture of reservoirs. Consequences modeling of selected scenarios was performed using PHAST 7.2 software.

Results: The obtained concentration profiles showed that during the first and last six months of year, reservoir 1 with up to respectively 570.20 and 349.09 meters beyond it in the wind direction, located on the ERPG3 level, according to ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) levels. Likewise, in reservoir 2 between 891.05 and 556.74 m from the reservoir, during the first and last six months of the year, located on the ERPG3 level, respectively.

Conclusion: Catastrophic rupture of ammonia tanks and its dispersion into the environment can cause a high mortality rate. Therefore, implementation of preventive programs such as emergency response planning appropriate to the potential hazards of ammonia gas, development of a comprehensive risk management plan, determining the correct location of reservoirs following the results of consequence modeling, etc. can be effective steps in reducing the consequences in the case of such accidents.

Keywords: Consequence Modeling; Ammonia; Toxicity; PHAST Software

Please cite this article as: Sadeghi Yarandi M, Mahdinia M, Barazadeh J, Soltanzadeh A. The modeling of toxic consequence of Ammonia release in industrial refrigerators. *Journal of Health in the Field*. 2020; 8(3):18-31.

Corresponding Author: Department of Occupational Safety & Health Engineering, Faculty of Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.

Email: soltanzadeh.ahmad@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.22037/jhf.v8i3.32508>

Received: 9 October 2020

Accepted: 30 January 2021

مدل سازی پیامد سمی انتشار آمونیاک در سردخانه‌های صنعتی

محسن صادقی یارندی^۱، محسن مهدی‌نیا^۲، جواد برازنده^۲، احمد سلطان‌زاده^{۲*}

۱- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران

چکیده

زمینه و اهداف: گاز آمونیاک، گازی سمی بوده و به دلیل دارا بوده مشخصات ترمودینامیکی خاص، به عنوان مبرد بکار می‌رود. این مطالعه با هدف مدل‌سازی پیامد سمی انتشار آمونیاک در یک سردخانه صنعتی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر در سال ۱۳۹۸ و در یک سردخانه صنعتی انجام گردید. با توجه به استفاده گسترده از این گاز در سردخانه‌های صنعتی، مخازن حاوی گاز آمونیاک به عنوان کانون خطر انتخاب شدند. با توجه به پتانسیل آسیب‌زایی این ماده، تنها بعد سمی این گاز مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با توجه به اهمیت تعیین میزان آسیب‌پذیری انسانی، سناریوها در بدترین وضعیت ممکن و در حالت پارگی کامل مخزن (Catastrophic Rupture) ارزیابی گردید. مدل‌سازی پیامدهای احتمالی با استفاده از نرم‌افزار PHAST 7.2 انجام پذیرفت.

یافته‌ها: یافته‌های حاصل از بررسی پروفایل غلظتی ایجاد شده بر حسب سطوح راهنمای طرح ریزی واکنش در شرایط اضطراری (ERPG) نشان داد که در مخزن ۱ در شش ماه ابتدایی و پایانی سال به ترتیب تا فواصل ۵۷۰/۲۰ و ۳۴۹/۰۹ متری از مخزن در جهت باد در سطح ERPG3 قرار دارد. خروجی مدل‌سازی مخزن ۲ نیز نشان داد که در شش ماه ابتدایی و پایانی سال به ترتیب تا فواصل ۸۹۱/۰۵ و ۵۵۶/۷۴ متری از مخزن در جهت باد در سطح ERPG3 یا محدوده غلظتی ۷۵۰ ppm قرار دارد.

نتیجه‌گیری: پارگی ناگهانی مخازن آمونیاک و انتشار این گاز به محیط اطراف می‌تواند نرخ مرگ‌ومیر بالایی ایجاد نماید. بنابراین، اجرای برنامه‌های پیشگیرانه همچون طرح ریزی برنامه واکنش در شرایط اضطراری متناسب با مخاطرات بالقوه گاز آمونیاک، تدوین برنامه جامع مدیریت ریسک با رویکرد مدل‌سازی پیامد، تعیین جانمایی صحیح مخازن و غیره می‌تواند گامی موثر در راستای کاهش پیامدها در برابر چنین حوادثی گردد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی پیامد؛ آمونیاک؛ سردخانه صنعتی؛ نرم افزار PHAST

* نویسنده مسئول: ایران، قم، دانشگاه علوم پزشکی قم، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار

Email: soltanzadeh.ahmad@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

مقدمه

بخش‌های کوچک صنعتی مانند سردخانه‌های صنعتی به دلایل مختلف مانند عدم وجود یک سیستم یکپارچه و نظام‌مند مدیریت ایمنی و سلامت، نظارت‌های ناکارآمد و همچنین اطلاعات ناکافی کارفرمایان و پرسنل آن درباره خطرات و تهدیدات سلامتی، ایمنی و حتی امنیتی هر یک از ترکیبات شیمیایی مورد استفاده، دارای ریسک بالایی در وقوع انواع آسیب‌ها و پیامدهای سلامتی، ایمنی، امنیتی و زیست‌محیطی می‌باشند. بعلاوه، جانمایی نامناسب این بخش‌های صنعتی و تراکم بالای جمعیتی در مجاورت آنها منجر به افزایش ریسک بروز پیامدهای فاجعه‌بار گردیده است [۱].

مواجهه با ترکیبات شیمیایی یکی از مهم‌ترین دلایل بروز بیماری‌ها و ناتوانی‌های ناشی از کار در جوامع شغلی است [۲،۳]. آمونیاک گازی است بی‌رنگ، با مزه فوق‌العاده تند و زننده که اشک‌آور و خفه‌کننده است. گاز آمونیاک از هوا سبک‌تر بوده و به سهولت به مایع تبدیل می‌شود. آمونیاک سبب تحریک دستگاه تنفسی، پوست و چشم شده و با آسیب رساندن به شش‌ها می‌تواند سبب مرگ افراد شود [۴،۵]. آمونیاک در سردخانه‌ها، کارخانجات یخ‌سازی، در ساخت کودهایی از قبیل نیترات، سولفات و فسفات آمونیوم، تهیه اسید نیتریک، دارو و مواد منفجره بکار می‌رود [۶،۷]. آمونیاک به دلیل خاصیت ترمودینامیکی خاص (به دلیل قابلیت انتقال حرارت مناسب نسبت به سایر ترکیبات) به عنوان مبرد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. آمونیاک گازی سمی و قابل اشتعال است و در صورتی که در محیط عوامل اشتعال‌زای دیگر مثل گازهای پایه نفتی و یا مواد اکسیدکننده مثل گاز اکسیژن و یا ترکیباتی با واکنش‌پذیری بالا مانند گاز کلر، برم و ید حضور داشته باشند بر شدت حریق افزوده می‌شود. گاز آمونیاک حتی در غلظت‌های کم نیز خطرناک است، استنشاق آمونیاک و یا آلوده شدن سطح

پوست می‌تواند موجب سوزش و حتی مرگ شود [۹،۱۰]. انجمن متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) مقدار حد مجاز میانگین وزنی زمانی مواجهه Time-weighted average (TWA) با آمونیاک را ۲۵ پی‌پی‌ام اعلام نموده است [۸].

به‌کارگیری مخازن ذخیره آمونیاک در پروژه‌ها و صنایع مختلف با اهداف متفاوت صنعتی، مخاطرات بسیار زیادی را در حوزه ایمنی، بهداشت و محیط زیست به دنبال داشته و خواهد داشت. از این‌رو، امروزه رویکرد مبتنی بر پیشگیری، از طریق شناسایی، ارزیابی و ارزشیابی ریسک مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حوادث گذشته نشان داده است که بروز حوادث در این مخازن و صنایع مرتبط با آن، عموماً فاجعه‌بار بوده و خسارات جبران‌ناپذیر انسانی، زیست‌محیطی و اقتصادی را به دنبال دارد [۱۱]. بررسی دقیق حوادث بزرگ نشان می‌دهد که بخش بزرگی از احتمال بروز و خسارت‌های ناشی از آن فقط قابل پیش‌بینی و قابل پیشگیری بوده‌اند، مشروط بر آنکه حداقل تحلیل‌های مهندسی نظیر مدل‌سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک به موقع انجام گرفته باشد [۱۲،۱۳]. ارزیابی ریسک کمی و مدل‌سازی پیامد یکی از مهم‌ترین راه‌های بررسی محدوده اثر و تخمین اثرات سمی ناشی از رهائش مواد سمی در محیط می‌باشد [۱۳،۱۴].

یکی از بخش‌هایی که در آن استفاده گسترده‌ای از گاز آمونیاک می‌شود، سردخانه‌ها و یخچال‌های صنعتی می‌باشد. در این صنایع به منظور تامین و حفظ دماهای پایین جهت نگهداری انواعی از مواد فاسد‌شدنی از گازهای مبرد همچون آمونیاک استفاده می‌گردد. مطابق بر موارد پیش‌گفت، استفاده از گاز آمونیاک با توجه به پتانسیل بالای ایجاد اثرات منفی و ماهیت سمی بودن آن می‌تواند منجر به ایجاد تلفات و خسارات زیادی گردد. لذا، به

از کانون‌های خطر، تعیین و از لحاظ کمی و کیفی ارزیابی شد. در مرحله چهارم، مخاطرات فرآیندی با استفاده از نرم‌افزار PHAST نسخه ۷/۲ مدلسازی شده و پیامدهای آن ارزیابی گردید. در این مطالعه، منظور از پیامد، سطح آسیب‌پذیری انسانی بود و میزان تلفات انسانی ناشی از وقوع سناریوهای انتخابی تعیین شد.

شناسایی و جمع‌آوری اطلاعات محل مورد مطالعه

با توجه به پتانسیل آسیب‌زایی گاز آمونیاک، تنها جنبه سمی این گاز در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از آشنایی کامل با فرآیند و عملیات موجود در سردخانه صنعتی مورد مطالعه، بررسی سابقه حوادث، انجام مصاحبه با کارکنان و به ویژه مسئولین ایمنی و بررسی مستندات، مخازن آمونیاک به عنوان کانون‌های خطر موجود در سایت از نظر خطر نشت مواد سمی مشخص گردید.

تعیین شرایط آب و هوایی محیط

پارامترهای آب و هوایی مورد نیاز در مدلسازی انتشار شامل میانگین دمای محیط، سرعت و جهت باد، کلاس پایداری جو، شار تابش خورشیدی، ناهمواری‌های زمین و میزان رطوبت نسبی است. شرایط آب و هوایی به گونه‌ای انتخاب شد که بیانگر میانگین شرایط در یک دوره زمانی یک ساله و یا یک دوره عملیاتی تجهیز مورد نظر باشد. مدلسازی پیامد برای سردخانه صنعتی مورد مطالعه مشتمل بر ۲ مخزن حاوی آمونیاک در ۲ وضعیت آب و هوایی تابستان (نماینده میانگین شرایط جوی ۶ ماه نخست سال) و زمستان (نماینده میانگین ۶ ماه دوم سال) انجام شد. برای ۶ ماه نخست سال پارامترهای جوی سرعت باد (۳/۵ متر بر ثانیه)، کلاس پایداری جو (معیار پاسکوئیل D)، دمای محیط (۲۹/۵ °C)، رطوبت نسبی (۳۸/۰٪) و شار تابش خورشیدی (۰/۵ کیلووات بر متر مربع) بود. این مقادیر برای شش

منظور کنترل و کاهش ریسک اینگونه حوادث شیمیایی، ارزیابی احتمال وقوع و شدت پیامد آنها در قالب اقدامات پیشگیرانه آینده‌نگر (Proactive) امری ضروری به نظر می‌رسد. در همین راستا، و با توجه به عدم وجود مطالعات مشابه در اینگونه صنایع در داخل کشور، علی‌الخصوص با توجه به قرارگیری صنعت مورد مطالعه در ناحیه متراکم شهری و لزوم بررسی میزان آسیب‌پذیری افراد و وجود حجم بالایی از مخاطرات بالقوه، این مطالعه با هدف ارزیابی میزان آسیب‌پذیری انسانی ناشی از نشت آمونیاک و همچنین مدلسازی پیامد سمیت انتشار آمونیاک در یک سردخانه صنعتی طراحی و انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر در سال ۱۳۹۸ و در یک سردخانه صنعتی در استان قم انجام شده است. در این مطالعه، پس از بررسی مشخصات فرآیند، سوابق حوادث قبلی و استفاده از نظر متخصصین و خبرگان، کانون‌های خطر موجود شناسایی گردید. در مرحله بعد، مدلسازی پیامدهای احتمالی سناریوهای انتخابی با استفاده از نرم افزار PHAST انجام شد.

در این مطالعه مراحل مختلف تحلیل و مدلسازس پیامد پیاده‌سازی گردید. اولین مرحله، شناسایی سایت مورد نظر و ارزیابی سیستم‌های اصلی، سیستم‌های ایمنی، بررسی سوابق حوادث و شبه‌حوادث و نیز گردآوری نظر متخصصان و کارشناسان بود. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، در مرحله دوم نسبت به شناسایی کانون‌های خطر از لحاظ مخاطرات فرآیندی اقدام گردید. کانون‌های خطر شناسایی شده، زمینه ساز استخراج سناریوهایی جهت بررسی‌های بیشتر و نیز ارزیابی و مدلسازی پیامد مخاطرات وابسته به سناریوهای مذکور شد. در ادامه، در سومین مرحله از مطالعه، علل وقوع نشت مواد خطرناک

مدلسازی اثرات مواد سمی

مدل‌های ارزیابی سمیت ترکیبات مختلف، تأثیر رهایش مواد مختلف را بر انسان و یا مناطق تحت تأثیر محاسبه می‌کند. به عبارتی، هدف از مدلسازی اثرات سمی، ارزیابی پیامدهای رهایش مواد سمی بر سلامتی افرادی است که با غلظت خاصی از گاز سمی در مدت زمان معین مواجهه دارند و در صورت امکان وسعت آسیب‌ها یا مرگ‌ومیر نیز تخمین زده می‌شود. معمولاً خروجی‌های تحلیل اثرات سمی، شناسایی جمعیت‌های در معرض خطر و درصد افرادی است که ممکن است در اثر مواجهه با غلظت‌های معینی از گاز سمی متأثر شوند [۱۷].

مدل‌سازی پیامد با استفاده از نرم‌افزار PHAST

مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار PHAST یکی از بهترین مدل‌های ارائه شده برای مدلسازی رهایش مواد در محیط می‌باشد. این نرم‌افزار توسط شرکت نروژی (DNV Det Norske Veritas) تهیه شده است و به عنوان یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری در موضوع تحلیل مخاطرات صنعتی و ایمنی شناخته شده است. این نرم‌افزار با بسیاری از قوانین و مقررات بین‌المللی همخوانی داشته و به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸، ۱۹]. تمام مراحل مدلسازی در مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار PHAST 7.2 انجام گرفته است. لازم به ذکر است که به منظور مدلسازی رهایش گازها در نرم‌افزار PHAST از مدل‌های گاوسی استفاده شده است. در این مدل فرض بر این است که پروفایل غلظت مواد پخش شده در جهت عمود بر جهت باد به شکل تابع نرمال گوسی می‌باشد. این مدل‌های به دلیل سادگی و دقت بالا در پیش‌بینی پروفایل غلظت مواد منتشر شده، در تحلیل پیامد حوادث مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].

ماه پایانی سال به ترتیب ۲/۵ متر بر ثانیه، معیار پاسکوئیل F، دمای °C ۱۳/۰، رطوبت نسبی ۶۰/۰٪ و شار تابشی ۰/۴۲ کیلووات بر متر مربع بود.

انتخاب بدترین سناریوهای موجود

در این مطالعه با توجه به اهمیت میزان آسیب‌پذیری انسانی، سناریوها در بدترین وضعیت ممکن ارزیابی شدند. بدین منظور، پارگی کامل مخازن (Catastrophic Rupture) و نشت کامل مواد مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر مورد از مخازن، میزان غلظت آمونیاک بر مبنای معیار راهنمای طرح ریزی واکنش در شرایط اضطراری (ERPG) Emergency Response Planning Guidelines تعیین و نمودار آن رسم شد. در واقع ERPG مقادیری از غلظت ترکیبات شیمیایی است که می‌تواند جمعیت اطراف را تحت تأثیر قرار دهد. تعاریف هر یک از سطوح ERPG در ذیل ارائه گردیده است.

ERPG 1: کمترین غلظت ماده شیمیایی در هوای محیط است که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت، بدون اینکه مزاحمتی برای آنها ایجاد کند یا بوی ناخوشایندی داشته باشد، در معرض آن قرار گیرند.

ERPG 2: بیشترین مقدار غلظت ماده شیمیایی در هوای محیط است که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت، بدون آسیبی که مانع از انجام اقدامات ایمنی شود، در معرض آن قرار گیرند.

ERPG 3: بیشترین مقدار غلظت ماده شیمیایی در هوای محیط است که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت، بدون خطر جانبی، در معرض آن قرار گیرند [۱۵].

مشخص گردید که سطوح ERPG1، ERPG2 و ERPG3 برای آمونیاک به ترتیب مقادیر ۲۵، ۱۵۰ و ۷۵۰ پی‌پی‌ام می‌باشد [۱۶].

آمونیاک

بررسی اثرات سمیت و تعیین درصد مرگ‌ومیر ناشی از انتشار

اثرات یک گاز سمی به غلظت و مدت زمان مواجهه بستگی دارد. یکی از روش‌های پیش‌بینی احتمال یا درصد مرگ‌ومیر ناشی از مواجهه با گازهای سمی استفاده از روابط پروبیت (Probit) است. مقدار عددی پروبیت بین صفر تا ۸ است و هر چه این عدد بزرگتر باشد، احتمال مرگ‌ومیر افراد نیز بیشتر است. به منظور محاسبه عدد پروبیت طی مطالعه حاضر از رابطه ذیل استفاده گردید [۱۶]:

$$Y = K_1 + K_2 \ln (C^n \times t)$$

در رابطه فوق C غلظت، T مدت زمان مواجهه بر حسب دقیقه و K_1 و K_2 و n ضرایب ثابت پروبیت برای هر ماده شیمیایی است. مقادیر K_1 و K_2 و n برای آمونیاک به ترتیب مقادیر $9/82$ ، $0/71$ و 2 می‌باشد [۲۱].

یافته‌ها

شرایط فرآیندی شامل دما، فشار و حجم سیال در مخزن آمونیاک شماره ۱ به ترتیب 8°C ، $2/5 \text{ bar}$ و $1/1 \text{ m}^3$ بود. این شرایط برای مخزن شماره ۲ نیز به ترتیب 12°C ، $2/0 \text{ bar}$ و $3/82 \text{ m}^3$ بود.

محدوده تحت تاثیر ناشی از نشت آمونیاک در دو مخزن مورد مطالعه در صورت پارگی ناگهانی مخازن به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. محور X نشان‌دهنده فاصله تا مخزن در جهت باد بوده و محور Y نیز نشان‌دهنده عرض ابر بخار سمی ایجاد شده است. در هر شکل سه ناحیه مشخص گردیده است: (۱) ناحیه ۷۵۰ پی‌پی‌ام یا سطح ERPG3 (بیشترین غلظت ماده شیمیایی در هوا که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت در

معرض آن قرار گیرند، با تجربه اثرات جدی و شدید، بدون اینکه زندگی آنها تهدید شود).

(۲) ناحیه ۱۵۰ پی‌پی‌ام یا سطح ERPG2 (بیشترین غلظت ماده شیمیایی در هوا که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت در معرض آن قرار گیرند، بدون اینکه آسیب جدی یا غیر قابل جبران ببینند یا نتوانند اقدامات ایمنی را انجام دهند)

(۳) ناحیه ۲۵ پی‌پی‌ام یا سطح ERPG1 (بیشترین غلظت ماده شیمیایی در هوا که همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت در معرض آن قرار گیرند، بدون اینکه مزاحمتی برای آنها ایجاد کند یا بوی ناخوشایندی را احساس کنند)

فواصل تحت تاثیر در اطراف مخازن (متر) در صورت پارگی ناگهانی و نشت آمونیاک بر حسب سطوح ERPG برای دو شرایط آب و هوایی تابستان (نماینده میانگین شرایط جوی ۶ ماه نخست سال) و زمستان (نماینده میانگین ۶ ماه دوم سال) در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- فواصل تحت تاثیر در اطراف مخازن در جهت وزش باد (متر) در صورت پارگی ناگهانی و نشت آمونیاک بر حسب سطوح ERPG

Table 1- Affected distances around the tanks in the direction of wind (meters) in case of catastrophic rupture and ammonia leakage in terms of ERPG levels

ERPG 3	ERPG 2	ERPG 1	سطوح ERPG	
۵۷۰/۲۰	۱۱۱۰/۰۷	۲۳۰۹	شش ماه ابتدایی سال	مخزن ۱
۳۴۹/۰۹	۷۹۵/۱۹	۳۷۷۱/۲۱	شش ماه پایانی سال	
۸۹۱/۰۵	۱۷۸۶/۲۲	۳۷۱۵/۹۶	شش ماه ابتدایی سال	مخزن ۲
۵۵۶/۷۴	۱۴۲۱/۲۵	۶۷۹۶/۴۴	شش ماه پایانی سال	

ارزیابی احتمال مرگومیر افراد (نسبت) در صورت ترکیدگی مخازن و نشت آمونیاک نشان داد که بیشترین مقادیر مرگومیر در صورت ترکیدگی فاجعه بار مخزن دو می‌باشد. به نحوی که در صورت نشت آمونیاک از مخزن ۲ در شش ماه اول سال در فواصل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری از مخزن نسبت مرگومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۶۷، ۰/۵۱، ۰/۲۷، ۰/۱۰ و ۰/۰۵ بوده و در شش ماه دوم سال نیز در فواصل مذکور از مخزن نسبت مرگومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۷۱، ۰/۶۱، ۰/۲۷، ۰/۰۵ و ۰/۰۴ می‌باشد. همچنین در صورت نشت آمونیاک از مخزن ۱ در شش ماه اول سال در فواصل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری از مخزن نسبت مرگومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۲، ۰/۸۲، ۰/۷۸، ۰/۶۶ و ۰/۲۸ بوده و در شش ماه دوم سال نیز در فواصل مذکور از مخزن نسبت مرگومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۵، ۰/۹۳،

۰/۸۴، ۰/۶۴ و ۰/۲۵ می‌باشد. سایر نتایج مربوط به احتمال مرگومیر در صورت نشت آمونیاک بر حسب فاصله از مخازن در دو شرایط آب و هوایی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه گردیده است. نتایج حاصل از بررسی مقادیر پروبیت در صورت ترکیدگی مخازن و نشت آمونیاک بر حسب فاصله از مخازن در جدول ۲ نشان داده شده است. یافته‌ها نشان داد که به‌طور کلی بیشترین مقادیر پروبیت محاسبه شده برای مخزن ۱ در فواصل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ متر به ترتیب ۹/۵۳، ۵/۵۷، ۵/۲۹، ۴/۴۰، ۳/۷۴، ۳/۰۶ و ۲/۴۴ و برای مخزن ۲ نیز به ترتیب مقادیر ۹/۴۳، ۶/۶۴، ۶/۵۵، ۶/۰۱، ۵/۴۳، ۴/۹۱ و ۴/۴۱ می‌باشد.

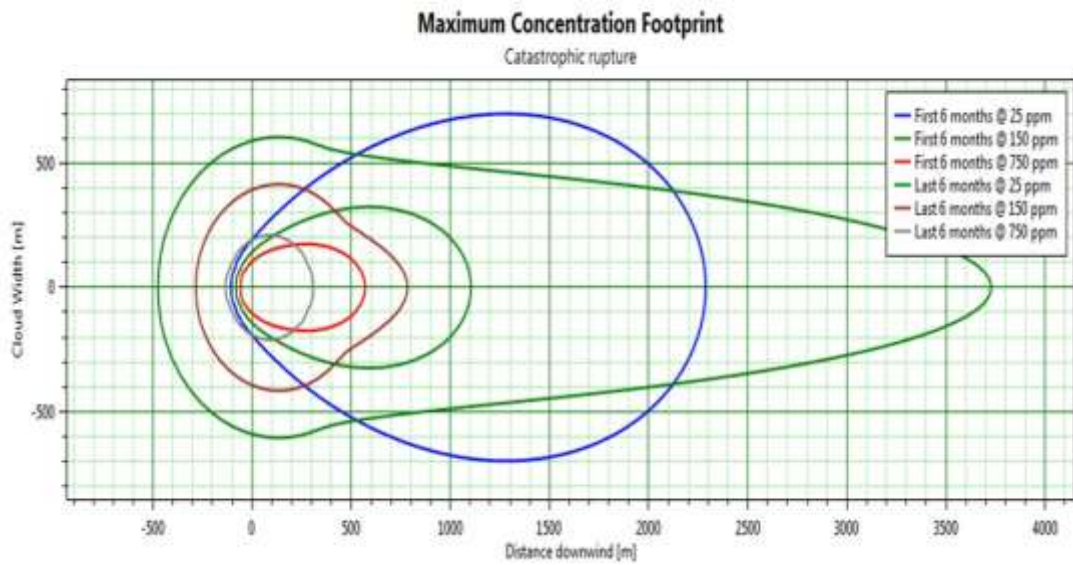
جدول ۲- مقادیر میانگین پروبیت در صورت پارگی ناگهانی مخازن ۱، ۲ و نشت آمونیاک بر حسب فاصله از مخازن (در جهت وزش باد)

Table 2- Mean values of probit in case of catastrophic rupture of tanks 1, 2 and ammonia leakage according to the distance from the tanks (in the direction of wind)

فاصله از مخزن (متر)		صفر	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۵
مخزن ۱	شش ماه ابتدایی سال	۸/۶۱	۵/۴۵	۵/۰۳	۴/۳۸	۳/۷۴	۳/۰۶	۲/۴۴	۱/۸۹
	شش ماه پایانی سال	۹/۵۳	۵/۵۷	۵/۲۹	۴/۴۰	۳/۳۵	۲/۴۹	۱/۶۴	۱/۳۶
مخزن ۲	شش ماه ابتدایی سال	۸/۷۸	۶/۴۲	۶/۲۵	۵/۸۰	۵/۴۳	۴/۹۱	۴/۴۱	۳/۴۷
	شش ماه پایانی سال	۹/۴۳	۶/۶۴	۶/۵۵	۶/۰۱	۵/۳۶	۴/۸۸	۴/۳۳	۳/۰۱

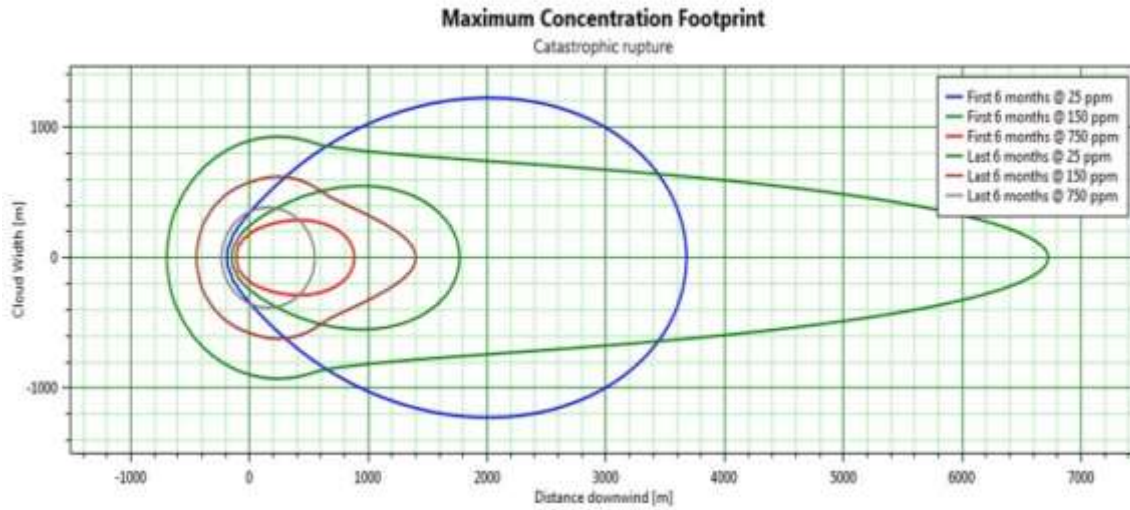
فارغ از ویژگی‌های فیزیکی ساختمان‌ها (نظیر ارتفاع) و توپوگرافی منطقه، می‌توانند تحت تاثیر محدوده غلظتی ERPG2 و ERPG3 قرار گیرند (اشکال ۵ و ۶).

مطابق بر یافته‌های بدست آمده بیشترین میزان مرگومیر در مورد مخزن ۲ می‌باشد. همچنین مشخص گردید با توجه به قرارگیری کارخانه در مرکز ناحیه صنعتی و مجاورت آن با صنایع متعدد، در صورت وقوع سناریوی مورد مطالعه، مناطق وسیعی از اطراف کارخانه مورد مطالعه، از جمله ساختمان‌ها و خیابان‌های مجاور،



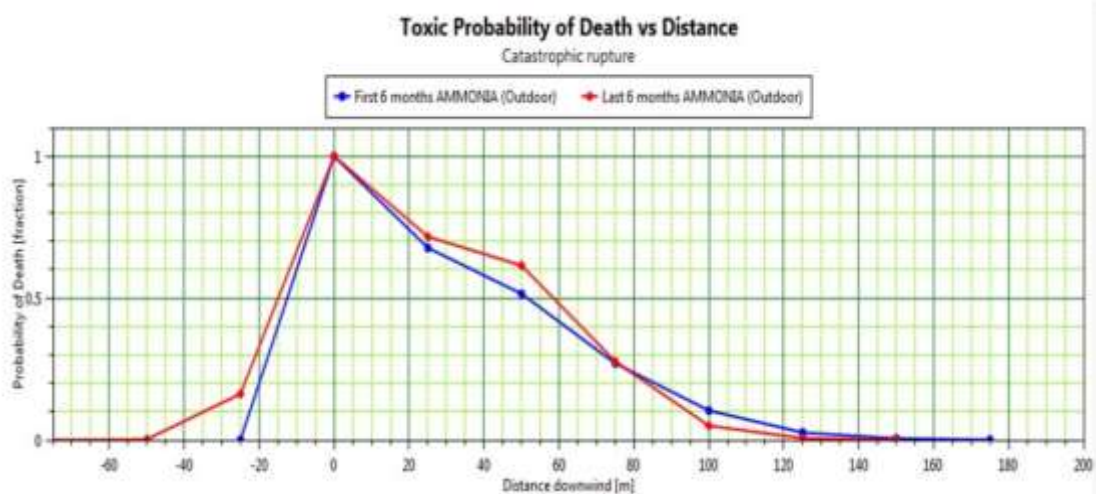
شکل ۱- محدوده تحت تاثیر ناشی از نشت آمونیاک در مخزن شماره ۱ در صورت پارگی ناگهانی مخزن

Figure 1- The area affected by ammonia leakage from tank No. 1 in case of catastrophic rupture



شکل ۲- محدوده تحت تاثیر ناشی از نشت آمونیاک در مخزن شماره ۲ در صورت پارگی ناگهانی مخزن

Figure 2- The area affected by ammonia leakage from tank No. 2 in case of catastrophic rupture



شکل ۳- احتمال مرگ و میر (نسبت) بر حسب فاصله از مخزن ۱ در اثر نشت آمونیاک

Figure 3- Probability of death (ratio) in terms of distance from tank No. 1 due to ammonia leakage



شکل ۴- احتمال مرگ و میر (نسبت) بر حسب فاصله از مخزن ۲ در اثر نشت آمونیاک

Figure 4- Probability of death (ratio) in terms of distance from tank No. 2 due to ammonia leakage



شکل ۵- مناطق تحت تاثیر محدوده غلظتی ERPG2 و ERPG3 در صورت انتشار آمونیاک از مخزن ۱

(علامت فلش نشان دهنده محل مورد مطالعه است)

Figure 5- Areas affected by ERPG2 and ERPG3 concentration range in case of ammonia release from tank No. 1 (arrow sign indicates study location)



شکل ۶- مناطق تحت تاثیر محدوده غلظتی ERPG2 و ERPG3 در صورت انتشار آمونیاک از مخزن ۲

(علامت فلش نشان دهنده محل مورد مطالعه است)

Figure 6- Areas affected by ERPG2 and ERPG3 concentration range in case of ammonia release from tank No. 2 (arrow sign indicates study location)

بحث

آمونیاک یکی از ترکیبات بسیار سمی بوده و انتشار آن در محیط می‌تواند منجر به ایجاد اثرات منفی بسیاری بر سلامت انسان و محیط زیست گردد. با توجه به آثار بسیار جدی سمیت آمونیاک بر بدن انسان، مطالعه حاضر با هدف بررسی و مدلسازی آثار سمی آمونیاک و در بدترین سناریو ممکن (پارگی فاجعه بار) در دو شرایط آب و هوایی (شش ماه اول و شش ماه پایانی سال)، انجام گردید. نتایج حاصل از مطالعه Orozco و همکاران نیز نشان داد که ریسک اصلی حوادث انتشار ناگهانی آمونیاک عمدتاً مربوط به ایجاد ابر بخار سمی این ترکیب در محیط اطراف بوده و ریسک پیامدهایی همچون حریق و انفجار بسیار کمتر می‌باشد [۱۶].

یافته‌های حاصل از بررسی پروفایل غلظتی ایجاد شده در صورت ترکیب مخازن بر حسب سطوح ERPG نشان داد که در مخزن ۱ در شش ماه ابتدایی و پایانی سال به ترتیب تا فواصل ۵۷۰/۲۰ و ۳۴۹/۰۹ متری از مخزن در جهت باد در سطح ERPG3 یا محدوده غلظتی ۷۵۰ پی‌پی‌ام قرار دارد که غلظتی بسیار کشنده می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهند که در شش ماه ابتدایی سال فواصل بیشتری می‌توانند در محدوده ERPG3 و ERPG2 قرار گیرند و بروز سناریو مورد مطالعه در این دوره زمانی می‌تواند به مراتب خطرناکتر از شش ماه پایانی سال باشد. از جمله دلایل آن می‌تواند شرایط آب و هوایی متفاوت، ناپایداری بیشتر جو و سرعت باد بالاتر و در نتیجه جابجایی و اختلاط بیشتر لایه‌های هوایی باشد. یافته‌های مطالعه‌ی Tan و همکاران در زمینه شبیه سازی انتشار گاز آمونیاک در محیط نشان داد که سرعت باد مهم ترین پارامتر در تعیین میزان و محدوده انتشار و پراکندگی گاز آمونیاک در محیط می‌باشد [۲۲].

یافته‌های حاصل از بررسی پروفایل غلظتی ایجاد شده در صورت ترکیب مخزن بر حسب سطوح ERPG در مخزن ۲ نیز نشان داد که در شش ماه ابتدایی و پایانی سال به ترتیب تا فواصل ۸۹۱/۰۵ و ۵۵۶/۷۴ متری از مخزن در جهت باد در سطح ERPG3 یا محدوده غلظتی ۷۵۰ پی‌پی‌ام قرار دارد که مشابه شرایط مخزن شماره ۱ ولی با محدوده اثر بیشتر می‌باشد. از جمله دلایل آن می‌توان به محتوای آمونیاک بیشتر در مخزن شماره دو اشاره نمود (جدول ۱ و اشکال ۱ و ۲). کلیه موارد فوق نشان می‌دهد که در صورت وقوع از هم گسیختگی ناگهانی مخازن نواحی گسترده‌ای در اطراف مخازن تحت تاثیر سطوح ERPG3 و ERPG2 قرار می‌گیرند و حضور افراد در این نواحی می‌تواند منجر به مرگ و یا آثار شدید سمیت بر بدن آنان شود. نتایج حاصل از مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که انتشار آمونیاک از مخازن یکی از حوادث بسیار شدید و ناگواری است که می‌تواند نواحی بسیار وسیعی را آلوده کرده و منجر به مرگ بسیاری از افراد در ناحیه ERPG3 و ERPG2 شود، که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد [۱۰، ۱۶]. یافته‌های مطالعه عباسلو و همکاران نیز در زمینه مدلسازی انتشار آمونیاک در صنایع پتروشیمی نشان داد که سمیت بالای آمونیاک یکی از مخاطرات بالقوه تهدید کننده سلامت افراد و محیط‌های شغلی مختلف است. همچنین طی این مطالعه مشخص گردید که شدت آسیب ناشی از افزایش فشار انفجار و تشعشعات حریق بالا نبوده و بالاترین ریسک مرگ و میر افراد در صورت رهایش آمونیاک و تحمیل اثرات سمی بر سلامت افراد بدست آمد [۲۳]. یافته‌های موجود در اشکال ۵ و ۶ نشان می‌دهد که با توجه به قرار گیری سردخانه مورد مطالعه در مرکز ناحیه صنعتی و تراکم بالای صنایع در اطراف محل مورد مطالعه و همچنین تردد بالای افراد از بزرگراه‌های اطراف، در صورت وقوع سناریوی مورد مطالعه، افراد بسیار زیادی در

محدوده غلظتی ERPG3 و ERPG2 قرار می‌گیرند که این موضوع می‌تواند منجر به صدمات جبران ناپذیری گردد.

ارزیابی احتمال مرگ‌ومیر افراد (نسبت) در صورت ترکیب مخازن و نشت آمونیاک نشان داد که بیشترین مقادیر مرگ‌ومیر در صورت ترکیب فاجعه بار مخزن دو می‌باشد. به نحوی که در صورت نشت آمونیاک از مخزن ۲ در شش ماه اول سال در فواصل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری از مخزن نسبت مرگ‌ومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۶۷، ۰/۵۱، ۰/۲۷، ۰/۱۰ و ۰/۰۵ بوده و در شش ماه دوم سال نیز در فواصل مذکور از مخزن نسبت مرگ‌ومیر به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۷۱، ۰/۶۱، ۰/۲۷، ۰/۰۵ و ۰/۰۴ می‌باشد (اشکال ۳ و ۴ و جدول ۲). انتشار گاز آمونیاک در محیط با توجه به ماهیت سمی بودن آن می‌تواند منجر به ایجاد اثرات منفی بسیاری بر افراد و محیط زیست گردد. مطالعات پیشین مشخص ساخته‌اند که در طی دهه‌های اخیر حوادث بسیار زیادی در رابطه با نشت آمونیاک در سرتاسر دنیا رخ داده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۳ نشت آمونیاک در یک کارخانه صنایع غذایی در چین منجر به کشته شدن ۱۲۰ نفر و مسمومیت بیش از ۶۰ نفر از کارکنان شد. بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه بررسی و مدلسازی پیامد ناشی از انتشار آمونیاک در محیط‌های مختلف در حوزه مدلسازی تخلیه، انتشار و آثار سمیت آن بوده است که نشان از اهمیت بسیار زیاد این موضوع دارد [۲۲].

افزایش روزافزون جمعیت انسانی، از یک سو منجر به گسترش مرزهای شهری شده و از طرف دیگر منجر به نیاز روزافزون انسان به منابع انرژی و نیز گسترش صنایع گوناگون می‌گردد [۲۴، ۲۵]. این امر به نوبه خود با گذر زمان منجر به همجواری مرزهای شهری و مرزهای صنعتی و همچنین چگالی و تراکم بالای صنایع در مجاورت هم در شهرک‌های صنعتی می‌شود. از مهمترین تبعات این همجواری، قرارگیری مناطق مسکونی و صنعتی در محدوده‌ی خطر و نیز افزایش میزان خسارات جانی در صورت

وقوع حادثه است. با توجه به پتانسیل بالای گاز آمونیاک در وقوع حوادث، و نیز بالا بودن شدت پیامد حوادث احتمالی، یکی از مهمترین راه‌کارها جهت کاهش پیامدهای انسانی چنین حوادث فاجعه باری، پیش‌بینی مرزهای خطر و تعیین حداکثر میزان پیشرفت مرزهای شهری به سمت صنایع و شهرک‌های صنعتی و همچنین تعیین نواحی خطر در صورت وقوع حادثه است. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نیز نشان داد که سردخانه‌های صنعتی یکی از منابع بسیار خطرناک تخلیه و انتشار گاز آمونیاک به مناطق مجاور در صورت وقوع حوادث فاجعه بار است. این گونه حوادث می‌تواند منجر به ایجاد آثار سمیت بالایی بر انسان و محیط زیست گردیده و نیز نرخ مرگ‌ومیر بالایی را ایجاد کند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند باعث ایجاد دیدگاهی جدید در مورد دامنه تلفات و خسارات ناشی از انتشار گاز آمونیاک در صنایع مشابه گردد. از جمله محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌توان به عدم در نظر گیری اثرات و حوادث دومینویی در صورت پارگی ناگهانی یک مخزن و تاثیر آن بر سایر مخازن، توسط نرم افزار PHAST و همچنین عدم امکان طراحی و اجرای برنامه آمادگی و واکنش در شرایط اضطراری (EPR) Emergency preparedness and response به علت محدودیت زمانی اشاره نمود. لذا پیشنهاد می‌گردد محققان در آینده اقدام به مدلسازی پیامد با سایر نرم‌افزارها و همچنین طراحی و تدوین برنامه‌های مناسب واکنش در شرایط اضطراری متناسب با نوع صنعت و محل قرار گیری آن نمایند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های مطالعه حاضر نشان داد که با توجه به محل قرارگیری سردخانه مورد مطالعه در ناحیه متراکم صنعتی و تردد بالای افراد در نواحی اطراف آن، ترکیب مخازن ذخیره و انتشار آمونیاک

نظارت و بازرسی فنی مداوم تجهیزات جهت شناسایی به موقع نقایص و تعیین حداکثر میزان گسترش مرزهای شهری.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری مدیریت و پرسنل سردخانه صنعتی مورد مطالعه کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند. این مقاله بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی شماره ۷۷۲ مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی قم با کد اخلاق IR.MUQ.REC.1398.108 بوده است.

References:

- 1-Tremblay A, Badri A. Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises. *Safety Science* 2018; 101:260-67.
- 2- Sadeghi-Yarandi M, Golbabaie F, Karimi A. Evaluation of pulmonary function and respiratory symptoms among workers exposed to 1, 3-Butadiene in a petrochemical industry in Iran. *Archives of Environmental & Occupational Health* 2020; 75(8):483-490.
- 3- Sadeghi-Yarandi M, Karimi A, Ahmadi V, Sajedian AA, Soltanzadeh A, Golbabaie F. Cancer and non-cancer health risk assessment of occupational exposure to 1, 3-butadiene in a petrochemical plant in Iran. *Toxicology and Industrial Health* 2020; 36(12):960-70 doi.org/10.1177/0748233720962238.
- 4- Whitburn S, Van Damme M, Kaiser JW, van der Werf GR, Turquety S, Hurtmans D, et al. Ammonia emissions in tropical biomass

به محیط اطراف می‌تواند منجر به قرار گیری افراد بسیار زیادی در نواحی ERPG2 و ERPG3 شده و نرخ مرگ‌ومیر بالایی ایجاد نماید. لذا انجام اقدامات کنترلی ذیل می‌تواند گامی موثر در راستای کاهش اثرپذیری در برابر چنین حوادثی گردد: نصب دتکتورهایی در فواصل معین جهت تشخیص به موقع وقوع نشتی و استفاده از حداکثر زمان موجود جهت کنترل خطر و یا جهت خروج از محوطه خطر، تدوین اقدامات پیشگیرانه و کنترلی مبتنی بر ریسک بر اساس نتایج مدل سازی پیامد، تدوین برنامه مدیریت بحران، تدوین برنامه‌های آموزش اختصاصی جهت کاهش ریسک رفتارهای نایمن افراد و پرسنل درگیر در صنایع مرتبط، برگزاری مانورهای آزمایشی در جهت افزایش سطح آگاهی کارکنان، تغییر مکان کمپ اسکان کارکنان به مناطق ایمن‌تر،

- burning regions: Comparison between satellite-derived emissions and bottom-up fire inventories. *Atmospheric Environment* 2015; 121:42-54.
- 5- Zhou W, Zhu B, Li Q, Ma T, Hu S, Griffy-Brown C. CO₂ emissions and mitigation potential in China's ammonia industry. *Energy Policy* 2010; 38(7):3701-709.
 - 6- Terzi E, Kartal SN, White RH, Shinoda K, Imamura Y. Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants. *European Journal of Wood and Wood Products* 2011; 69(1):41-51.
 - 7- Pearson A. Refrigeration with ammonia. *International Journal of Refrigeration* 2008; 31(4):545-51.
 - 8- Hygienists ACoGI. 2019 TLVs® and BEIs® based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and

- physical agents & biological exposure indices. ACGIH Cincinnati (OH); 2019. Available from: <http://www.racgp.org.au/>. Accessed Sep 21, 2020.
- 9- Duijm NJ, Markert F, Paulsen JL. Safety assessment of ammonia as a transport fuel. Denmark, Roskilde, 2005. Available from: <http://www.racgp.org.au/>. Accessed Sep 23, 2020.
- 10- Anjana N, Amarnath A, Nair MH. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management* 2018; 210: 201-9.
- 11- Junior MM, e Santos MS, Vidal MCR, de Carvalho PVR. Overcoming the blame game to learn from major accidents: A systemic analysis of an Anhydrous Ammonia leakage accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2012; 25(1): 33-9.
- 12- Hyatt N. Guidelines for Process Hazards Analysis (PHA, HAZOP), Hazards Identification, and Risk Analysis: CRC press. Florida, United State of America, 2003. Available from: <http://www.racgp.org.au/>. Accessed Sep 23, 2020.
- 13- Yarandi MS, Karimi A. Evaluation of consequence modeling of fire and explosion on methane storage tanks in a CNG refueling Station. *Safety Promotion and Injury Prevention* 2018; 6(4) :237-46 (In Persian).
- 14- Geravandi S, Goudarzi GR, Vousoghi Niri M, Mohammadi Mj, Saeidimehr S, Geravandi S. Estimate of cardiovascular and respiratory mortality related to Sulfur dioxide pollutant in Ahvaz. *Journal of Environmental Studies* 2015; 41(2):341-50 (In Persian).
- 15- Khorram R. Modeling the Outcome of Chlorine Emission Based on Emergency Response Planning Values over 24 Hours Using the PHAST Software (Case Study: Bushehr Nuclear Power Plant). *Journal of Military Medicine* 2020; 22(5):492-501 (In Persian).
- 16- Orozco J, Van Caneghem J, Hens L, González L, Lugo R, Díaz S, et al. Assessment of an ammonia incident in the industrial area of Matanzas. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 222:934-41.
- 17- Anjana N, Nair MH, Sajith K, Amarnath A, Indu I. Accidental release of ammonia from a storage tank and the effects of atmosphere on the affected area using ALOHA. *Indian Journal of Scientific Research* 2018; 21(1):1-7.
- 18- Tauseef S, Rashtchian D, Abbasi T, Abbasi S. A method for simulation of vapour cloud explosions based on computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2011; 24(5):638-647.
- 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):181-187.
- 20- Dandrieux A, Dimbour J, Dusserre G. Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006; 19(6):683-689.
- 21- Jabbari M, Atabi F, Ghorbani R. Key airborne concentrations of chemicals for emergency response planning in HAZMAT road transportation-margin of safety or survival. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020; 65:104139. doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104139
- 22- Tan W, Du H, Liu L, Su T, Liu X. Experimental and numerical study of ammonia leakage and dispersion in a food factory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2017; 47:129-39.

23- Abbaslou H, Karimi A. Modeling of Ammonia Emission in the Petrochemical Industry. Jundishapur Journal of Health Sciences 2019;11(3):e94101.

24- Pourbabaki R, Karimi A, Yazdanirad S. Modeling the consequences and analyzing the dangers of carbon disulfide emissions using ALOHA software in an oil refinery. Journal of Health in the Field 2019; 6(3):1-9 (In Persian).

25- Panahi S, Karimi A, Pourbabaki R. Consequence modeling and analysis of explosion and fire hazards caused by methane emissions in a refinery in cold and hot seasons. Journal of Health in the Field 2020; 7(4):34-46 (In Persian).