Journal of Military Medicine
2020, Volume 22, Issue 5
Pages: 492-501
10.30491/JMM.22.5.492

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)

Rasoul Khorram *

Young Researchers and Elite Club, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

Received: 15 December 2019 **Accepted**: 5 July 2020

Abstract

Background and Aim: Chemical warfare can endanger the security of any country. The present study examined the chlorine gas emission scenario on the outskirts of the Bushehr nuclear power plant over a 24-hour period, so that the study results can be utilized in an emergency response program.

Methods: In order to access the data, the area of Bushehr nuclear power plant was investigated in person and then, in order to assess the worst scenario, chlorine was selected due to its extremely high toxicity. From among the existing scenarios, the catastrophic explosion (immediate release) was selected and finally the risk intervals of this scenario were determined to evaluate the impact of chlorine gas on the target population with the use of ERPGs, IDLH and STEL. PHAST 6.7 software has been used for this purpose.

Results: Based on the criteria for evaluating the effects of exposure to toxic substances, the results of the present study showed that it is not possible to define an emergency planning area at close distances to the explosion origin by using IDLH and STEL criteria. However, based on ERPG concentrations, the chlorine gas passes shorter distances from 06:00 to 10:00 in the morning to reach the values of ERPG2-3 at 2811 and 1040 meters compared to other time periods studied. Conversely, at night, these distances have the largest risk area based on the values of the above mentioned concentrations at 5212 and 1459 meters, respectively.

Conclusion: In order to reduce the vulnerability in accidents, modeling weather conditions based on time periods (morning, noon, evening and night) can be an important tool for planning emergency conditions. Accordingly, it was suggested that the highest risk distance is obtained based on the ERPG1 criterion, i.e. the risk distance based on the lowest concentration of the chemical in the ambient air which does not even make unpleasant odors to be sensed by the residents in the safe areas, especially in similar study zones.

Keywords: Chemical Weapons, Chlorine Gas, PHAST software.

*Corresponding author: **Rasoul Khorram**, Email: rasoulkhorram@yahoo.com

مجله طب نظامی
دوره ۲۲، شماره ۵، مرداد ۱۳۹۹
صفحات: ۵۰۱-۴۹۲
10.30491/JMM.22.5.492

مدل‌سازی پیامد انتشار گاز کلر بر اساس مقادیر طرح‌ریزی واکنش در شرایط اضطراری طی یک دوره زمانی ۲۴ ساعته توسط نرم‌افزار PHAST (مطالعه موردی حریم نیروگاه اتمی بوشهر)

رسول خرّم *

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

چکیده

زمینه و هدف: یکی از خطراتی که تأمین امنیت مردم هر کشوری را می‌تواند به مخاطره بیندازد حملات جنگی توسط مواد شیمیایی می‌باشد. مطالعه حاضر سناریو انتشار گاز کلر را بر جمعیت حومه نیروگاه اتمی بوشهر طی یک دوره زمانی ۲۴ ساعته به‌منظور به‌کارگیری نتایج آن در برنامه‌ی واکنش اضطراری بررسی نموده است.

روش‌ها: به‌منظور دسترسی به داده‌های واقعی، حریم نیروگاه اتمی بوشهر به‌صورت حضوری بررسی شده و سپس به‌منظور ارزیابی بدترین شرایط ممکن، از میان طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی معرف به گازهای جنگی، کلر به علت سمیت فوق‌العاده بالا و از میان سناریوهای موجود، ترکیدگی فاجعه‌بار (رهایش آنی) انتخاب شد. درنهایت فواصل خطر این سناریو به‌منظور ارزیابی پیامد اثرات گاز کلر بر جمعیت منطقه هدف به کمک سطوح ERPGs، IDLH و STEL تعیین گردید. برای این منظور از نرم‌افزار PHAST نسخه ۶,۷ استفاده‌شده است.

یافته‌ها: نتایج مطالعه حاضر بر مبنای معیارهای ارزیابی اثرات مواجهه با مواد سمی نشان داد نمی‌توان در فواصل نزدیک به کانون انفجار براساس معیارهای IDLH و STEL یک منطقه طرح‌ریزی شرایط اضطراری تعریف نمود؛ اما بر اساس غلظت‌های ERPG؛ گاز کلر در بازه زمانی ۰۶:۰۰ تا ۱۰:۰۰ صبح مسافت کمتری را تا رسیدن به مقادیر ERPG۲-۳ به ترتیب در فواصل ۲۸۱۱ و ۱۰۴۰ متری به نسبت دیگر دوره‌های زمانی بررسی‌شده طی کرده است. برعکس در شب این فواصل بیشترین حریم خطر را بر اساس مقادیر غلظت‌های مذکور به ترتیب در فواصل ۵۲۱۲ و ۱۴۵۹ متری به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری: به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری در حوادث، مدل‌سازی شرایط آب و هوایی بر اساس دوره‌های زمانی (صبح، ظهر، عصر و شب) می‌تواند راهنمای مهمی برای طرح‌ریزی محدوده‌های شرایط اضطراری باشد. بر این اساس پیشنهاد گردید بالاترین فاصله خطر به‌دست‌آمده بر مبنای معیار ERPG۱ که تعیین فاصله خطر بر اساس کمترین غلظت ماده شیمیایی در هوای محیط می‌باشد که حتی بوی ناخوشایندی برای ساکنین در معرض مواجهه ایجاد نمی‌کند در طرح‌ریزی حریم‌های ایمن خصوصاً در شعاع مطالعاتی مشابه مدنظر قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: سلاح شیمیایی، گاز کلر، نرم‌افزار PHAST.

*نویسنده مسئول: **رسول خرّم**. پست الکترونیک: rasoulkhorram@yahoo.com
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵

مقدمه

گرچه توسعه، پیشرفت و گسترش فناوری‌های بسیار پیچیده و پر اهمیت به ویژه در صنایع شیمیایی موجب ارتقاء زندگی بشر گردیده است، اما از طرف دیگر او را با پتانسیل‌های خطرناکی به مانند حوادث شیمیایی روبرو ساخته است (۱).

تاریخ بشر نشان داده است تلاش‌های فراوانی در جهت به‌کارگیری ترکیبات شیمیایی به‌عنوان سلاح صورت گرفته است تا اینکه آلمانی‌ها سیلندرهای حاوی گاز کلر را در برای اولین بار (آوریل ۱۹۱۵) در Ypres بلژیک علیه سربازان فرانسوی و کانادایی به کار بردند (۲). این نخستین حمله وسیع گازی در تاریخ دنیا بود که ۵۰۰۰ کشته و ۱۵۰۰۰ مجروح به جای گذاشت (۲). بعد از پایان جنگ جهانی اول در سال ۱۹۱۸ مشخص گردید که در جبهه غرب، عوامل و سلاح‌های شیمیایی باعث مرگ ۹۱۰۰۰ نفر، معلولیت لاعلاج ۱۰۰ هزار نفر، ابتلای به کوری و التهاب ریوی و پوستی یک‌میلیون و ۳۰۰ هزار نفر و جمعاً باعث مرگ و معلولیت یک‌میلیون و چهارصد و نود هزار نفر شده‌اند (۲).

کنوانسیون ۱۹۲۵ ژنو تلاشی در جهت منع کاربرد عوامل شیمیایی در جنگ بود، اما خیلی موفقیت‌آمیز نبود. به‌طوری‌که از سال ۱۹۴۵ تاکنون، به‌کرات از سلاح‌های شیمیایی در جنگ‌ها استفاده شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به جنگ آمریکا علیه ویتنام و عراق علیه ایران اشاره کرد (۲).

آمریکایی‌ها در جنگ علیه ویت‌کنگ‌ها از نوعی سم گیاه‌کش موسوم به عامل نارنجی استفاده کردند تا جنگل‌های پناهگاه آن‌ها را به بیابان تبدیل کنند. بخش عمده این عامل را آلمان‌ها که در آن دوران پیشرو این صنعت به‌حساب می‌آمدند در اختیار آمریکایی‌ها قرار داده بودند. تحت تأثیر این ماده مهلک دی‌اکسین‌دار، هنوز پس از ۴۰ سال در ویتنام فرزندان متولدشده دارای اختلالات مادرزادی هستند (۳).

بر اساس گزارش‌های بازرسان سازمان ملل متحد، ارتش عراق در موارد متعددی از عوامل شیمیایی جنگی علیه نظامیان و غیرنظامیان ساکن مناطق مرزی ایران استفاده کرده است (۳) که مؤثرترین کاربرد این عوامل در بازپس‌گیری مناطق استراتژیک فاو و جزایر مجنون صورت گرفته است (۲).

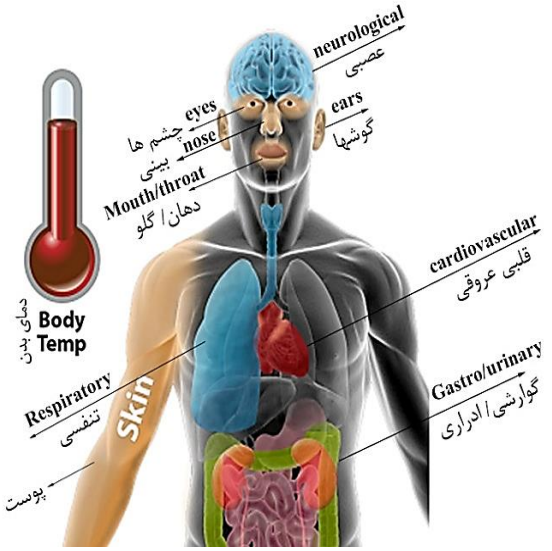
با توجه به موقعیت استراتژیک و خاص منطقه خاورمیانه، دسترسی گروه‌های تروریستی به سلاح شیمیایی و همچنین تهدیدات گاه‌وبیگاه کشور ایالات‌متحده به درگیری و جنگ، داشتن برنامه‌ریزی علمی و دقیق در حوزه پدافند نوین شیمیایی برای کشور ما ضروری است (۳). تجربه حملات شیمیایی به مراکز نظامی و غیرنظامی در طول جنگ تحمیلی که علی‌رغم گذشت ۳۹ سال از نخستین حمله شیمیایی در سوسنگرد (۲) که همچنان شهادت جانبازان ناشی از این حملات را به همراه دارد، ضرورت چنین برنامه‌ریزی را دوچندان می‌سازد؛ بنابراین با توجه به وضعیت ژئوپولیتیکی ویژه کشورمان و درگیری‌های منطقه‌ای، به‌کارگیری این جنگ‌افزارها علیه کشورمان موضوعی دور از ذهن نمی‌باشد. از سوی دیگر، کشور ما، ایران، در عرصه پاسخ به وقایع (طبیعی و انسانی) در زمره کشورهای موفق قرار دارد که این امر نتیجه تجارب رویارویی با صدها اتفاق ویرانگر و مخصوصاً جنگ تحمیلی بوده است.

اما اغلب تجارب موفق در عرصه مدیریت بحران (مدیریت شرایط اضطراری)، مربوط به پاسخ و رویارویی با وقایع (پس از وقوع آن) می‌باشند. این در شرایطی است که ارزش پیش‌بینی و در نتیجه آمادگی جهت مقابله با حوادث و وقایع (قبل از وقوع آن‌ها)، به‌مراتب بیشتر از سایر مراحل مدیریت بحران می‌باشد (۴).

امروزه یکی از شیوه‌های علمی برای شبیه‌سازی پیامدهای وقایع شیمیایی، استفاده از نرم‌افزار است. هدف از این کار ارزیابی پیامد، برآورد تقریبی تأثیر رویدادهای مختلف بر محیط پیرامون و نیز تخمین احتمال مرگ یا آسیب افراد در نواحی متأثر از این رویدادها است. در ارزیابی ریسک کیفی امکان تعیین دقیق شدت پیامدها وجود ندارد، به‌عنوان‌مثال، تعداد افرادی که ممکن است در اثر نشت گاز از یک مخزن مواد شیمیایی کشته شوند را نمی‌توان به‌طور دقیق معین کرد، ولی به کمک روش‌های واکاوی پیامد و مدل‌سازی ریاضی می‌توان اثرات حوادث را به‌صورت خسارات به تجهیزات و آسیب به‌سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست ارزیابی نموده و آن‌ها را در صورت نیاز در ارزیابی‌های کمی ریسک در واحدهای مورد مطالعه به کار گرفت (۵،۶). نرم‌افزار PHAST یکی از قوی‌ترین و مشهورترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه است (۷). این نرم‌افزار توسط مدل جامع UDM قادر به مدل‌سازی مراحل مختلف رهایش مواد شیمیایی در محیط شامل: نشت، تخلیه، تبخیر و پراکندگی به‌صورت رهایش دائمی و ناگهانی و مدل‌های محاسباتی موج انفجار، اثرات سمیت و تعیین درصد مرگ‌ومیر ناشی از نشت مواد سمی با روش پروبیت به کمک ثابت‌های Probit می‌باشد (۸،۹،۱۰).

یکی از مواد با قابلیت بالای آسیب‌زایی که انتشار آن از منابعی چون تأسیسات فرآیندی، منازل مسکونی، سلاح‌های شیمیایی و یا هنگام ریخت‌وپاش‌های اتفاقی به محیط موجب تعداد زیادی از حوادث بزرگ و فجایع انسانی بوده است، گاز (سمی غیرقابل اشتعال) کلر می‌باشد (۱۱،۱۲). فریتز هابر (زاده ۹ دسامبر ۱۸۶۸) شیمیدان آلمانی و برنده جایزه نوبل بود که برای اولین بار به ارتش آلمان توصیه کرد که از گاز کلر به‌عنوان سلاح شیمیایی استفاده کند. بعدها لقب «پدر جنگ شیمیایی» را به او دادند. او دریافت که ویژگی‌های فیزیکی گاز کلر و تولید ساده صنعتی آن، آن را یک سلاح شیمیایی مؤثر می‌سازد. او به‌عنوان رئیس بخش شیمی در وزارت جنگ آلمان، علاوه بر نظارت بر تولید صنعتی آن، مسئولیت اولین استفاده میدانی را که در آن شرکت می‌کرد بر عهده داشت (۱۳). کلر یک گاز بسیار سمی است که در مقادیر زیادی در سراسر جهان تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرد و وجود آن برای محافظت

از انسان در برابر شیوع بیماری‌های ناشی از آب ضروری است (۱۴). از طرف دیگر، با توجه به گستره وسیع کاربردهای آن، چه در ابعاد صنعتی و چه نظامی انتشار آن به محیط می‌تواند منشأ اثرات زیان‌باری بر روی سلامت انسان‌ها باشد (۱۵).



شکل-۱. اعضای متأثر بدن در مواجهه با گاز کلر

اثرات گاز کلر بر سیستم‌های بیولوژیک بدن: تنفسی: تنفس نامنظم، تنفس سریع، تنگی نفس، خس‌خس سینه، ایست تنفسی، سوزش/تحریک‌پذیری، اِدِم ریوی، ناراحتی سینه، احتقان، سرفه/ خفگی، سرفه خونی، عطسه و هیپوکسی/ سیانوز. گوارش/ ادرار: ناراحتی شکم، حالت تهوع و استفراغ. قلبی-عروقی: درد قفسه سینه، آریتمی، تاکی‌کاردی، فشارخون، افت فشارخون/ شوک و هیپوکسی/ سیانوز. بینی: آبریزش بینی، تحریک بینی و خونریزی و عطسه. پوست: سوزش/ سوختگی پوست، قرمزی پوست، سرمازدگی، خارش، عرق کردن، تورم پوست و جوش. چشم‌ها: تحریک چشم/ قرمزی، پاره شدن، اختلال بینایی، تورم چشم و از دست دادن بینایی. دهان/ گلو: سرفه/ خفگی و تحریک گلو. عصبی: آژیتاسیون، عدم پاسخ‌گویی، خستگی/ ضعف، سرگیجه، سردرد و اسپاسم/ تشنج. شایان‌ذکر است که بر اساس نرم‌افزار WISER، کلر علاوه بر عدم تأثیر بر روی سیستم شنوایی موجب تغییرات دمای بدن (افزایش یا کاهش) هم نمی‌شود (۱۶).

با مروری بر پژوهش‌های مرتضوی و همکاران، جهانگیری و همکاران، کاشی و همکاران، Hanna و همکاران و فریده عتابی و همکاران که با استفاده از نرم‌افزار PHAST و به ترتیب با هدف بررسی انتشار گاز کلر از مخازن ذخیره به‌منظور تدوین برنامه واکنش در شرایط اضطراری (۱۷)، تعیین حریم خطر رهایش گاز کلر بر اساس شاخص CEI (۱۸)، حوادث فرآیندی گاز کلر در صنایع پتروشیمی (۱۹)، شش مدل پراکنده گاز متراکم مربوط به سه حادثه جاده‌ای اخیر کلر (۲۰) و همچنین بررسی حریم ایمنی گاز کلر در حوادث حمل‌ونقل جاده‌ای انجام‌شده است (۲۱)، می‌توان مشاهده کرد که در تمامی مطالعات فوق پس از شناسایی ریسک‌های مربوطه، الگوی حذف خطر (مواجهه با گاز کلر) با توجه به سطوح ERPG۲ ارائه گردیده است، اما تأثیر بازه زمانی در مدل‌سازی سناریوهای مختلف رهایش مشخص نشده است. همچنین پژوهش‌های فوق نشان می‌دهند که نرم‌افزار PHAST برای بررسی واحدهای فرآیندی و حمل‌ونقل جاده‌ای در مطالعات داخلی و خارجی متعددی به‌کاررفته است. اما تاکنون پژوهشی در حوزه مدل‌سازی پیامد حملات شیمیایی (طی یک دوره تناوب حرکت وضعی زمین) باوجود اهمیت خطرات مواجهه با آن بخصوص در حریم نیروگاه‌های اتمی کشور انجام نگرفته است.

هدف مطالعه حاضر، بررسی سناریوی انتشار گاز کلر در حریم نیروگاه اتمی بوشهر (بر اساس دوره زمانی یک شبانه‌روز) و ارائه الگوی بهینه برنامه واکنش اضطراری با توجه به سطوح اضطرار تعریف‌شده ERPGs، IDLH و STEL به ترتیب توسط انجمن‌های AIHA، NIOSH و ACGIH می‌باشد.

در این مطالعه سعی شده است سناریوی رهایش عمدی گاز کلر به‌منظور تعیین شعاع آسیب‌رسانی آن بر اساس سطوح اضطرار در نظر گرفته شود تا الگویی بهینه جهت واکنش سریع با حداقل الزامات لازم برای کنترل شرایط احتمالی مشابه ارائه گردد.

روش‌ها

پس از بررسی خصوصیات طیفی از ترکیبات مواد شیمیایی معروف به گازهای جنگی توسط منابع گوناگونی چون نرم‌افزارهای بانک اطلاعاتی، وب‌سایت‌های فارسی و انگلیسی و کتاب‌های متعدد، گاز کلر به دلیل سمیت فوق‌العاده بالا، از بین ترکیبات مذکور انتخاب‌شده و سپس مسافت خطر آن با استفاده از سطوح تعریف‌شده به ترتیب توسط انجمن‌های بهداشت صنعتی، مؤسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی و انجمن دولتی متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا محاسبه گردید: بر این اساس، AIHA سطوح ERPG را در سه سطح و به‌صورت جدول-۱ تقسیم‌بندی می‌کند (۶).

جدول-۱. سطوح ERPGs

سطوح		تعریف
ERPG	۳	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.
	۲	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.
	۱	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.

سطوح اضطرار بر مبنای معیار NIOSH و ACGIH نیز به ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند (۶،۲۲): IDLH: بیشترین غلظت ماده شیمیایی در هوا که افراد می‌توانند به مدت نیم ساعت در معرض آن قرار بگیرند، بدون اینکه زندگی آن‌ها تهدید شود و بیشترین غلظتی که فرد می‌تواند به مدت ۱۵ دقیقه به‌طور پیوسته در معرض آن قرار گیرد، بدون آنکه دچار سوزش شدید، تغییر شدید یا غیرقابل‌بازگشت در بافت‌های بدن خود و در نهایت حس خواب‌آلودگی شدید شود، STEL نام دارد.

جدول-۲. معیارهای ارزیابی پیامد اثرات سمی برحسب (PPM)

ماده شیمیایی	ERPG ۱	ERPG ۲	ERPG ۳	IDLH	STEL
Cl_2	۱	۳	۲۰	۱۰	۰/۵

مقدار ERPG، IDLH و STEL ماده شیمیایی مورد مطالعه در جدول-۲ ارائه شده است (۲۳). در نهایت، پس از تعیین مسافت خطر گاز کلر بر اساس سطوح ERPG، IDLH و STEL الگوی بهینه جهت انجام برنامه‌ریزی‌های لازم به‌منظور مقابله با شرایط اضطراری پیشنهاد گردید.

مکان مورد مطالعه: مکان مطالعه نیروگاه اتمی بوشهر می‌باشد که در حدود ۱۱ کیلومتری جنوب غربی بندر بوشهر قرار دارد. به‌منظور دسترسی به داده‌های شفاف و جهت انطباق با نقشه اینترنتی و جانمایی عمومی واحدهای صنعتی و مسکونی در منطقه هدف، این منطقه به‌صورت حضوری مطابق شکل-۱ بررسی شد.

در شکل-۱، گردان اسکای گارد پدافند ارتش با رنگ سیاه، محله هلیله با رنگ سفید، محله بندرگاه با رنگ آبی، کمپ مروارید با رنگ سبز و نیروگاه اتمی بوشهر با رنگ قرمز نمایش داده شده است. فاصله مناطق هلیله، بندرگاه و کمپ مروارید با نیروگاه اتمی بوشهر به ترتیب برابر ۴۲۴، ۱۳۸۲ و ۱۶۹۷ متر است که چنین فاصله‌ای آسیب‌پذیری آن‌ها را در حملات نظامی (خصوصاً هوایی و دریایی) در پی خواهد داشت.

شکل-۲. فواصل نواحی مسکونی تا مرکز نیروگاه هسته‌ای

راهنمای معیارهای طرح‌ریزی واکنش در شرایط اضطراری به کمک مدل‌های PHAST: با مقایسه مقادیری که از مدل‌سازی یک حادثه بر اساس معیارهای استاندارد به دست می‌آید، می‌توان به‌شدت حادثه پی برد. بدین منظور در این مطالعه از معیارهای ERPG، IDLH و STEL برای ارزیابی پیامد اثرات سمی گاز کلر استفاده شده است (۶).

جدول-۳. شرایط آب و هوایی

دوره‌های زمانی (۲۷ دسامبر ۲۰۱۷)	دما (C°)	رطوبت	س رعت باد	کلاس پایداری جو
صبح	۰۶:۰۰تا ۱۰:۰۰	۱۸	٪۷۹	m/s۶	D
ظهر	۱۰:۰۰تا ۱۴:۰۰	۱۸	٪۷۹	m/s۲	C
عصر	۱۴:۰۰ تا ۱۹:۰۰	۲۱	٪۶۶	m/s۵	C
شب	۱۹:۰۰ تا ۰۶:۰۰	۲۱	٪۷۱	m/s۵	D

جدول-۴. مشخصات سناریو و شرایط آب و هوایی

نوع سناریو	مشخصات منبع انتشار
سناریو	رهایش آنی
جرم بمب	۱۰ تن
موقعیت جغرافیایی منطقه:	
منطقه موردمطالعه	حریم نیروگاه اتمی بوشهر
طول جغرافیایی	۵۰°،۵۳´ شرقی
عرض جغرافیایی	۲۸°،۴۹´ شمالی
ارتفاع از سطح دریا	۲ متر
شرایط جوی سطح زمین	
زبری سطح	موانع زیاد منظم در حومه شهر و جنگل‌ها

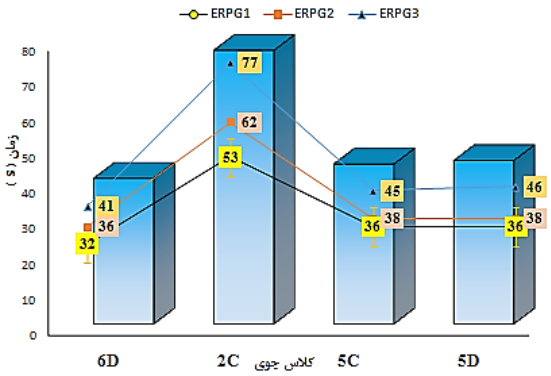
تعریف سناریو بر اساس نرم‌افزار PHAST: داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار PHAST.6.7 شامل نوع سناریو و مشخصات منبع انتشار، شرایط آب و هوایی منطقه و داده‌های اتمسفری مطابق جدول-۳ و جدول-۴ بررسی شده است (۲۴).

سپس داده‌های به‌دست‌آمده از مراحل فوق به نرم‌افزارها داده شد تا درنهایت سطوح خطر بر اساس معیارهای ERPG، IDLH و STEL محاسبه گشته و بر اساس آن پیشنهادهایی برای برنامه‌ریزی در شرایط اضطراری ارائه شود.

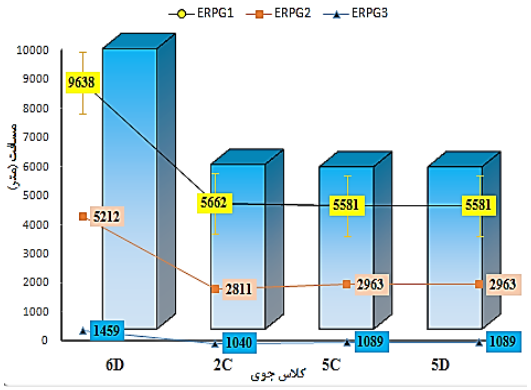
نتایج

محاسبات بر روی نتایج ارائه شده در نمودار-۱ نشان می‌دهد که گاز کلر در بازه زمانی ۰۶:۰۰ تا ۱۰:۰۰ صبح و ۱۹:۰۰ تا ۰۶:۰۰ بامداد نسبت به دیگر فواصل زمانی بررسی‌شده، به ترتیب مسافت کمتر و بیشتری را تا رسیدن به مقادیر غلظت‌های ERPG ۳-۲ طی کرده است. حدود مواجهه زمانی مطالعه شده از محل انفجار بمب شیمیایی‌بر اساس مقادیر غلظت‌های ERPG در نمودار-۲ تا ۴ ارائه شده است.

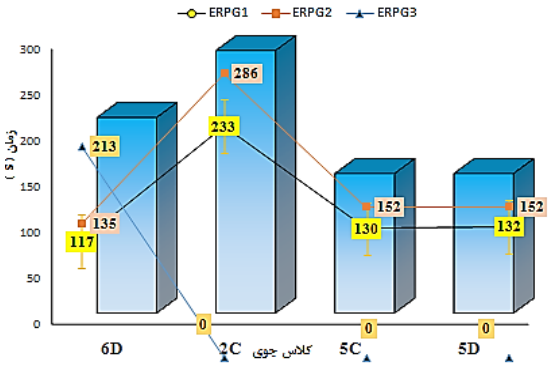
مطالعه حدود مواجهه زمانی بر اساس ERPGs نشان داد که بیشترین خطر متوجه همسایه شمالی نیروگاه در فاصله ۴۲۴ متری است، زیرا غلظت پس از ۳۲ ثانیه به معیار ERPG۱ (۱PPM) و بعد از گذشت ۱۰ ثانیه دیگر به معیار ERPG۳ (۲۰PPM) می‌رسد که در نتیجه بعد از ۴۲ ثانیه غلظت آلاینده‌ها از آستانه مجاز فراتر رفته، به‌طوریکه در فاصله ۲۷۸ متری، غلظت (پس از ۹۷ ثانیه) به ۹۹۰ PPM رسیده که در چنین شرایطی، در عرض چند دقیقه مرگ افراد در معرض مواجهه را به کام خود خواهد کشاند (نمودار-۵).



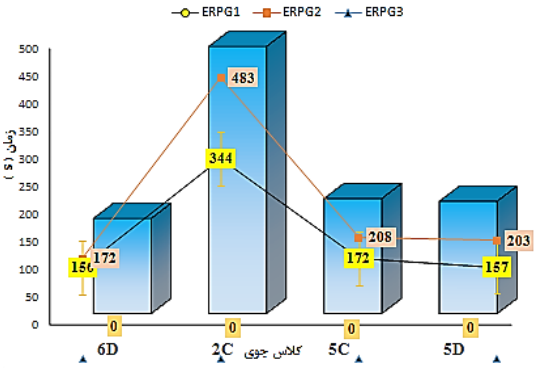
نمودار-۱. حدود مواجهه تماس کلر بر اساس غلظت‌های ERPG



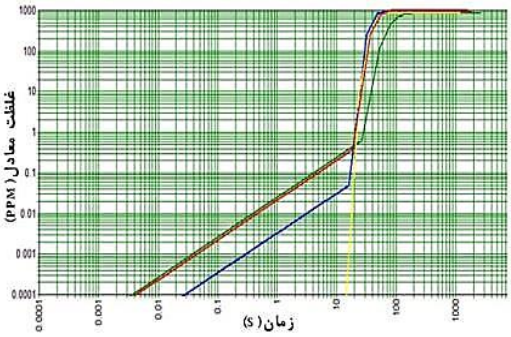
نمودار-۲. دز سمی معادل از مرکز انفجار تا مسافت ۴۲۴ متری



نمودار-۳. دز سمی معادل از مرکز انفجار تا مسافت ۱۳۸۲متری



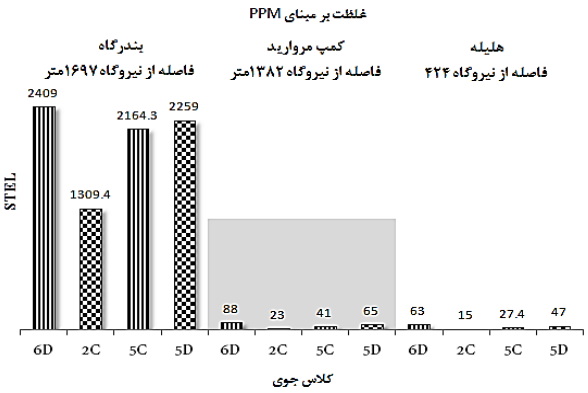
نمودار-۴. دز سمی معادل از مرکز انفجار تا مسافت ۱۶۹۷متری



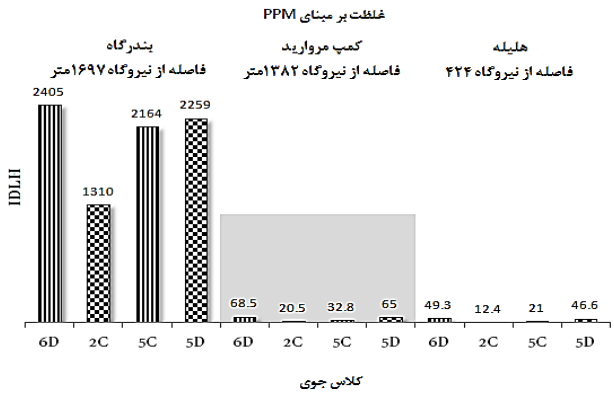
نمودار-۵. نمودار غلظت معادل برحسب زمان

در نهایت، سطوح IDLH و STEL به ترتیب با توجه به تعاریف استاندارد، مؤسسه‌های NIOSH و ACGIH محاسبه شدند. در مواقعی که برای یک ماده شیمیایی مقادیر ERPG مشخص نشده است (۲۵) یا خطرات مواجهه با گاز با استناد به مقادیر غلظت‌های ارزیابی پیامد اثرات سمی سازمان AIHA بر پایه مواجهه یک‌ساعته بالا باشد می‌بایست از معیارهای STEL (حدود مواجهه کوتاه‌مدت) و IDLH (غلظت فوراً خطرناک برای مرگ و زندگی) که با عنوان شاخص‌های جایگزین شناخته می‌شوند استفاده کرد (۱۵).

نمودار-۶ و نمودار-۷ مقادیر شاخص‌های جایگزین (مواجهه شیمیایی) را بر مبنای معیارهای ۹۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه نشان می‌دهند. در این نمودارها نزدیکی مقادیر معیارهای STEL و IDLH در فواصل ۴۲۴ متری از مرکز نیروگاه منطقی می‌باشد، زیرا حجم زیادی از مواد در زمان کوتاهی پخش و رقیق شدن آن نیز در پایدارترین شرایط (D) بر مبنای مقادیر غلظت‌های فوق S ۲۴۰۵≥ طول کشیده است.



نمودار-۶. آستانه تماس کلر بر مبنای معیار STEL



نمودار-۷. آستانه تماس کلر بر مبنای معیار IDLH

بحث

نتایج مطالعه حاضر بر اساس مقادیر غلظت‌های ERPG نشان داد که در بازه زمان صبح گاز کلر فواصل کمتری را نسبت به دیگر دوره‌های زمانی بررسی‌شده بر اساس معیار ERPG۲-۳ طی کرده است.

از طرف دیگر، مقایسه نتایج نمودار-۱ نشان می‌دهد بیشترین غلظت انتشار گاز کلر در هوای محیط بر اساس معیار ERPG۲-۳ در شرایط D/6 و مربوط به زمان شب بوده است. در توجیه نتایج فوق می‌تواند به موارد زیر اشاره کرد: در سانحه قطار گرانیت ویل ایالت کارولینای جنوبی که آزاد شدن حدود ۱۲۰۰۰۰ پوند گاز کلر، نه نفر کشته و بیش از ۲۵۰ نفر مصدوم به جای گذاشت. هیئت ملی ایمنی حمل‌ونقل کشور(National Transportation Safety Board) ایالات‌متحده آمریکا گزارش داد در اثر تابش شدید آفتاب مقدار زیادی یون کلر در عرض چند دقیقه فتولیز شده و در همان دقایق اول به‌صورت دوفازی به محیط آزاد شده است (۲۰).

اما با استفاده از یک مدل انتشار تحلیلی ساده، مقادیر کمتری از گاز برای چند ساعت آزاد شد که نشان داد در طول ساعات پایدار شب بیش از نیمی از گاز کلر در عرض چند صد متر به خاک رسوب می‌کند (۲۰).

علاوه بر موارد اشاره شده، نتایج مطالعه حاجی‌زاده و همکاران و همچنین مرتضوی که به ترتیب با هدف بررسی پیامدهای نشت گاز در کپسول ۲۶/۲ لیتری گاز مایع با رویکرد پدافند غیرعامل و بررسی انتشار گاز کلر از مخازن ذخیره به‌منظور تدوین برنامه واکنش در شرایط اضطراری در یک صنعت پتروشیمی انجام شده بود این مطلب را تأیید می‌کنند.

زیرا در صبح و شب لایه‌های سطحی جو که در مجاورت سطح زمین قرار دارند، تقریباً دمایی برابر با لایه‌های فوقانی جو داشته و بنابراین جوی پایدارتر نسبت به ظهر و عصر حاکم است. همان‌طور که می‌دانیم در جو پایدارتر میزان گسترش گازهای سنگین بسیار بیشتر از جو ناپایدار است، زیرا حرکت جریان هوا در محور عمودی بر سطح زمین کم بوده و توده آلودگی در محور افقی گسترش بیشتری پیدا می‌کند (۱۷،۲۶).

بنابراین با توجه به احتمال غافلگیری نیروهای عملیاتی بر اساس نتایج مطالعه حاضر در بازه زمانی صبح و پایداری عامل در شب، لازم است در برنامه‌ریزی‌های واکنش اضطراری زمان‌های فوق مورد توجه بیشتری قرار بگیرند.

با بررسی نتایج نمودار-۶ و نمودار-۷ به ترتیب بر اساس معیارهای STEL و IDLH و همچنین نمودار ۵ که نشان داد بعد از ۴۲ ثانیه غلظت آلاینده‌ها در فاصله ۲۷۸ متری، پس از ۹۷ ثانیه به PPM ۹۹۰ رسیده است، مشاهده گردید نمی‌توان در نزدیکی کانون‌های انتشار گاز یک منطقه طرح‌ریزی اضطراری تعریف نمود.

در چنین محیط‌هایی که اتمسفرهای IDLH حاوی کلر با غلظتی می‌باشند که پرسنل عملیاتی را در معرض خطر مرگ در پی آسیب به مغز به علت کمبود اکسیژن قرار می‌دهند، می‌بایست از وسایل حفاظت فردی-تنفسی به‌خصوص از نوع فشار مثبت استفاده کرد. از طرف دیگر، بوی آلاینده‌ها نیز به‌عنوان یک خاصیت هشدار دهنده مهم است (۲۷). آستانه بو برای کلر PPM ۳/۵ -۰/۲ است (۲۸). حد آستانه بو برای آلاینده‌ها می‌بایست از حد تماس مجاز آن پایین‌تر باشد (۲۷)، اما طبق تعریف ACGIH گاز کلر از طریق حس بویایی در غلظت‌های PPM ۱ احساس می‌شود. بنابراین به علت نزدیکی آستانه بوی گاز کلر به حد تماس مجاز آن درصورتی‌که پرسنل عملیاتی مجهز به رسپیراتورهای تصفیه‌کننده هوا، بنا به هر دلیلی عبور آلاینده‌ها از فیلتر را حس کنند، می‌بایست سریعاً منطقه آلوده را ترک کرده و سپس اقدام به تعویض فیلتر کنند، زیرا در صورت عدم ترک به‌موقع محل، در مدت کوتاهی مرگ آن‌ها در اثر مواجهه با مولکول‌های سمی گاز کلر حتمی خواهد بود.

نتایج مطالعه جوادی و همکاران که با هدف ارزیابی پیامدهای ناشی از انفجار بمب شیمیایی با استفاده از نرم‌افزار PHAST انجام شده بود، نشان می‌دهند تنها ۱۰ ثانیه پس از انفجار بمب ۵۰۰ کیلویی هیدروژن سیانید منطقه آلوده شده است (نمودار-۲). مطالعه حاضر نیز نشان می‌دهد که ۳۶ ثانیه پس از انفجار بمب حاوی گاز کلر غلظت بر مبنای معیار ERPG ۲ به PPM ۳ رسیده و این غلظت بعد از گذشت ۴ ثانیه دیگر به بالاترین میزان مجاز تماس آن (۲۰PPM) در مسافت ۴۲۴ متری می‌رسد. نتایج هر دو مطالعه نشان می‌دهند که وضعیت جوی خنثی، بدترین وضعیت برای انجام اقدامات حفاظتی و پدافندی بوده است. چرا که منطقه زودتر آلوده شده و غلظت‌های بیشتری از گاز کلر در مدت زمان کوتاه‌تری به منطقه انتشار پیدا کرده است. علت نتایج حاصله را می‌توان بهره‌گیری از کلاس پایداری جو و همچنین سناریوی انتخابی مشابه در هر دو تحقیق دانست.

در هر دو تحقیق سناریوی انتخابی شکافت کامل مخزن و کلاس پایداری D در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی غلظت در مطالعه شاهرخی و همکاران که با هدف مدل‌سازی پیامد انتشار گاز کلر از یک تصفیه‌خانه آب انجام شده بود، نیز نشان داد از میان فواصل محاسبه شده برای ابر کلر تا حداکثر غلظت ۳۰ppm تنها در شرایط جوی خنثی درصد مرگ و میر به صفر می‌رسد. این در حالی بود که نتایج غلظت حاصله از مدل‌سازی سناریوی نشتی مخزن به ترتیب برای نشتی‌های ۵ و ۲۵ میلی‌متر نشان داده بود افرادی که در فواصل ۵۵ و ۶۰ متری در شرایط پایداری F و در شرایط پایداری C در فواصل ۲۵ و ۳۰ متری و با شرایط مشابه برای سناریوی شکستگی لوله به ترتیب در فواصل F/۲۵ و C/۲۵ قرار دارند مرگ آن‌ها حتمی خواهد بود (۲۹). تجزیه و تحلیل نتایج مطالعه شاهرخی با نتایج مطالعه حاضر و جوادی نشان داد در شرایط پایداری D نسبت به دیگر کلاس‌های پایداری جو مورد بررسی قرار گرفته، مولکول‌های گاز کلر از فواصل اولیه انتشار با غلظت‌های بیشتری به محیط رقیق شده‌اند. همچنین این مقایسه نشان داد که نرم‌افزار PHAST در ارائه نتایج برحسب غلظت، خصوصا در فواصل اولیه انتشار، نتایج قابل قبولی را ارائه داده است.

بررسی اختلاف موجود بین حجم نشتی و همچنین رتبه‌بندی فواصل خطر در دو مطالعه انجام‌شده نشان می‌دهد که امکان مقایسه دیگر نتایج وجود ندارد. به‌عنوان نمونه، حجم ماده انتشاریافته به محیط در تحقیق جوادی ۵۰۰ کیلوگرم، در تحقیق حاضر ۱۰ تن و در تحقیق شاهرخی ۸۴۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

از نقاط قوت این مطالعه می‌توان به بهره‌گیری از PHAST به‌عنوان یک نرم‌افزار فرآیندی جهت شبیه‌سازی پیامدهای انتشار گاز کلر در نبردهای احتمالی و از محدودیت‌های آن می‌توان به بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی انتشار این گاز در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته اشاره کرد. بنابراین با توجه به گستردگی دامنه تغییرات آب و هوایی در طی شبانه‌روز پیشنهاد گردید در مطالعات آتی از داده‌های حاصله از ایستگاه‌های هواشناسی پایدارترین شرایط آب و هوایی بر اساس ترکیبات یک روز شامل صبح، ظهر، عصر و شب در فصول مختلف سال استخراج و محاسبات بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی انتشار گازها بر مبنای آنها انجام گیرد.

مدل‌سازی نشت مواد شیمیایی وابستگی بسیار زیادی به ماهیت ماده شیمیایی، شرایط آب و هوایی و جوی سطح زمین دارد. در نتیجه، عدم انجام مطالعات با شرایط مشابه مطالعه حاضر موجب گردید که مقایسه نتایج، با نتایج سایر مطالعات بیشتر از موارد اشاره‌شده امکان‌پذیر نباشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به فشار بخار گاز کلر، اقدامات ایمنی؛ برای تیم‌های مجهز به ماسک‌های تصفیه‌کننده، دور شدن از منطقه آلوده بر مبنای معیار ERPG۳ و برای نیروهای واکنش سریع (نمودار-۶ و نمودار-۷) استفاده از ماسک‌های تأمین‌کننده اکسیژن پیشنهاد گردید.

اما اقدامات ایمنی برای اشخاص بدون حفاظ، فاصله از منطقه نشت بر اساس معیار ERPG۱ تا مسافت ۹۶۳۸ متری (PPM ۱) جهت طرح‌ریزی نواحی که بالقوه در معرض خطر انتشار گاز هستند پیشنهاد می‌شود.

نقش نویسندگان: نویسنده در ارائه ایده و طرح اولیه، جمع‌آوری داده ها، تحلیل و تفسیر داده ها نقش داشته است.

همچنین نویسنده با تایید نهایی مقاله حاضر، مسئولیت دقت و صحت مطالب مندرج در آن را می پذیرد.

تشکر و قدردانی: از اساتیدی که در اجرای مطالعه حاضر یاری رسان بودند، قدردانی می گردد.

تضاد منافع: نویسنده تصریح می‌کند که هیچ گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- فاصله از محل انتشار گاز به‌منظور کاهش زمان عبور بخارات گاز کلر از بستر کربن فعال فیلترهای ماسک تصفیه کننده بر مبنای معیار ERPG۳ (تعیین فاصله از محل انتشار گاز تا فواصل ایمن‌تر بر اساس عدم ایجاد اثرات تهدیدکننده زندگی).
- لزوم همراه داشتن تجهیزات حفاظت انفرادی خصوص ماسک در صحنه‌های مختلف رزم.
- انجام تمرینات ماسک گذاری به‌صورت مستمر به‌منظور حصول عادت و در پی آن کاهش مشکلات مربوط به مقاومت تنفسی، که حین استفاده از آنها شایع می‌باشد.

منابع:

1. Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for chemical process quantitative risk analysis: American of Chemical Engineers; New York, 2000.
2. Fakhraeian H. Chemical Factors. 1st ed. Tehran: Imam Hossein; 2003.
3. Nabi J, Gholamrezania M. Assessment of the implications of chemical bomb explosions using PHAST software. Seventh national defense conference on new war. Tehran: Imam Hossein Comprehensive University; 2017.
4. Naserzadeh Z, Mehrabani M, Kohhpaee H. Modeling Software training for the Consequences of ALOHA Events. 1st ed. Tehran: Sepid Ber; 1394.
5. Sharma RK, Gurjar BR, Wate SR, Ghuge SP, 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;26:82-90. doi:10.1016/j.jlp.2012.09.009
6. Jahangiri M, Noroozi A, Sareban Zadeh K. risk assessment and Management. 1st ed. Tehran: Fanavaran; 2013.
7. Ghashghaei R, Sabzghabaei GR, Dashti S, Jafari Azar S, Salehipour F. Modeling and prediction of environmental consequences of methanol as the most dangerous goods in ports (Case Study: Bandar Imam Khomeini). Health and Safety at Work. 2019;9(2): 157-67.
8. Witlox HW, Fernández M, Harper M, Oke A, Stene J, Xu Y. Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere. Journal of loss prevention in the process industries. 2018;55: 457-70. doi:10.1016/j.jlp.2018.07.014
9. Wang K, Liu Z, Qian X, Huang P. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST. J Loss Prev Process Ind. 2017;46:6. doi:10.1016/j.jlp.2017.01.001
10. Witlox HW, Harper M, Oke A, Stene J. Phast validation of discharge and atmospheric dispersion for pressurised carbon dioxide releases. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014;30: 243-55.
11. Neghab M, Amiri F, Moayedi R, Hosseini SY. Investigation of lung functional capacities and respiratory disorders caused by chlorine gas. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention. 2014;2 (2):140.
12. 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. IOH. 2017;14(3):37.
13. Zellner T, Eyer F. Choking agents and chlorine gas - History, pathophysiology, clinical effects and treatment. Toxicol Lett. 2019;320:3. doi:10.1016/j.toxlet.2019.12.005
14. Galal-Gorchev H. Chlorine in water disinfection. Pure Appl Chem. 1996; 68(9):14. doi:10.1351/pac199668091731
15. Pandya N, Gabas N, Marsden Eric. Sensitivity analysis of PHAST's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine). J Loss Prev Process Ind. 2013;25(1):24.
16. WebWISER & WISER Application, Version 4.6 software. Available from: https://webwiser.nlm.nih.gov/initSearch?tab=Symptoms. doi:10.1016/j.jlp.2011.06.015
17. Mortazavi SB, Parsarad M, Mahabadi HA, Khavanin A. Evaluation of chlorine dispersion from storage unit in a petrochemical complex to providing an emergency response program. Iran Occupational Health. 2011;8(3).
18. Jahangiri M, Parsarad A. Determination of hazard distance of chemical release in a petrochemical industry by chemical exposure index (CEI). Iran Occupational Health. 2010;7(3):55-62.
19. Kashi E, Nasehpoor S, Kareshki H, Farmad M. Analysis of accidents in refineries process. The Third National Conference on Safety Engineering and HSE Management. HSE. 2009.
20. Hanna S, Dharmavaram S, Zhang J, Sykes I, Witlox H, Khajehnajafi S, Koslan K. Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. Process Safety Progress. 2008;27(3):248-59. doi:10.1002/prs.10257
21. Atabi F, Ghorbani R, Jabbari M. Assessment of safe distance for five toxic materials commonly in the accidents of chemical road transportation using ALOHA and PHAST software and CEI index (Case

Study: Tehran-Qazvin Highway). Iran Occupational Health. 2017;14(4):42-35.
22. Gohar Rakhi M, Torabi M, Akbari F, Gulzazari F. Qualitative and Quantitative Risk Assessment in Process Units. 1st ed. Research Center of Petroleum Industry; 2009.
23. CAMEO Chemicals, Version 2.7 Software. Available from: https://cameo chemicals.noaa.gov.
24. Iran Meteorological Organization. Available from:http://reports.irimo.ir/jasperserver/flow.html?_flowId=searchFlow.
25. Jahangiri M, Rostam A, Sareban Abadi A, Norozi MA, Azmoon H, Jalilian H, et al. Risk assessment and Management. 1st ed. Tehran: Fanavaran; 2013.
26. Beheshti MH, Mosavianasl Z, Tajpoor A, Hajizadeh R. Evaluation the Extent of Explosion, Ignition and Gas Leakage Consequences in Cylinders Containing 26.2-Liters of Liquid Gas, with Passive Defense Approach. J Mil Med. 2018;19(6):551-561.
27. Karimi A. Safety in the oil and gas industry. 4th ed. Tehran: Aylar; 2013.
28. Gupta R C .Veterinary Toxicology: Basic and Clinical Principles. 2nd ed. Elsevier: Academic Press; 2012.
29. Setareshenas N, Khalilipour MM, Shahraki F, Mansouri M. Consequence Modeling of Chlorine Release from Water Treatment Plant. American Chemical Science Journal. 2014;4(1):102. doi:10.9734/ACSJ/2014/5961