Iran Occupational Health

Original Article
http://ioh.iums.ac.ir

Iran Occupational Health. 2020 (15 Apr);17:4.

Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software

Rasoul Khorram, (*Corresponding author) Young Researchers and Elite Club, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran. rasoulKhorram@yahoo.com

Abstract

Background and aims: Many efforts have been made to use chemical components as weapons throughout history until the Germans first employed chlorine gas cylinders in April 1915 at Ypres Belgium against French and Canadian soldiers. Leaving 5,000 dead and 15,000 injured, it was the first practical application of chemical agents.
The Geneva Protocol in June 1925, which was an attempt to prevent the use of chemical agents in the war, was not very successful and since 1945, chemical weapons have been utilized frequently in wars. One of the most substantial cases in this regard ocurred during the war that Iraq imposed on Iran. The toxic gases employed in the killings were reported to be of three types including Mustard gas, nerve gas, and cyanide gas; the latter killed many Halabja residents. Because as soon as it is inhaled (2 or 3 respirations), it can cause the blood's capability to absorb oxygen, which gradually spoils the blood, causing overall toxicity in the body. That is why these compounds are named blood agents in the military. These compounds consist of Hydrogen Cyanide (AC), Cyanogen Chloride (CK) and Cyanogen Bromide (CB). Failing to take proper defensive measures after the emission of these gases can irreversibly damage the health of the affected citizens. The current study reviewed the scenario of releasing cyanogen agents on the population of the suburbs of the Bushehr Nuclear Power Plant in chemical attacks, whose results can be utilized in the emergency response program.
Methods: After analyzing the spectral properties of chemicals known as combat gases by various sources such as database software, Persian and English websites and copious books, the cyanogen group, including cyanogen chloride and cyanogen bromide, were chosen from amongst the mentioned compounds due to releasing the extremely flammable and toxic cyanide ions and hydrogen cyanide. Then, their toxicity effects were modeled and determined by Emergency Response Planning Guides (ERPGs) and Alternative Criteria (STEL, IDLH) for both high- and low-density combustible materials through Baker method using PHAST, ALOHA, and WISER software.
Results: The investigation of the effect of AC gas vapor diffusion revealed that these vapors created clouds over a range of 15 to 133 m from the diffusion point (flammability range). If the cloud exploded in low-density environments as a result of firing a gun or electric spark, a hot flash pressure would be formed, the impact wave of which could dealt with severe structural damages, including the skewing of buildings over a radius of 2449.7 m. In this situation, deaths caused by direct and indirect injuries due to the exposure to the pressure for up to 40 m were below 1% and 25%, respectively. If the explosion occurred in high-density environments, it would produce a detonation explosion that could create a shock tilting the still structure of buildings up to a radius of 2028 meters. In this case, the death resulting from direct and indirect damages caused by exposure to pressure up to 84 meters, would be 100%. Consequently, as the distance increased, the pressure would decrease to the amount that at a distance of 334 m, the pressure (0.1 to 0.8 bar) would cause the tearing of the eardrum of the exposed persons by 1 to 90%. Modeling results of AC emission proved that the equivalent toxic dose based on ERPG-3 was at 3267 m distance downwind. Everyone at this distance could be exposed to AC gas for an hour without being affected by harm preventing them from taking safety measures, such as wearing individual protective equipment.
Modeling the results of cyanogen chloride (CK) and cyanogen bromide (CB) emission revealed that CK in the orange threat zone (0.05 ppm) would extend by 10 km based on ERPG-2 criterion, and red threat zone (4 ppm) would extend up by 7.8 km downwind based on ERPG-3 criterion. In the stable D class, the orange threat zone would increase by more than 10 km and the red threat zone would increase by 5.4 km downwind. Moreover, in the event of a cyanogen bromide leak, the immediate response to isolate the leakage or leakage area in all directions was at least 50 m (150 feet) for liquids and 25 m (75 feet) for solids.
The results of AC gas toxicity emission modeling using PHAST software based on alternative criteria revealed that concentration values based on alternative indices (IDLH and STEL) for distances close to the site of chemical spillage (bomb explosion containing AC gas) remained

Keywords
PHAST
ERPGs
WISER
ALOHA
VCE
Cyanogen agents

Received: 17/06/2018
Published: 15/04/2020

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

constant over the 900 to 1800 s period. Given the modeling of the instantaneous emission scenario, it is reasonable for the concentration values to be constant over time. The reason behind was that a large portion of the material was released into the surrounding environment in a short period, and its dilution happened slowly.

Comparison of the Detonation Explosion Results Using the Baker Computation Model

For the nearest (Halileh) and the farthest (harbor) locations, at 424 and 1382 m distances, respectively, from the power plant, it was confirmed that damage caused by explosion at distances close to the power plant, where constructions still happen, resulted in direct death of 10 to 50%, and indirect death of 25% to 50% of the individuals. Whereas, the blast impact was reduced to 154.6 ns / m2, equal to 0.02 Bar, for farther distances. As a result, at distances away from the power plant, detonation explosions, such as hot flashes, would not lead to any serious damages to buildings or individuals because of reduced flame speed and wave density. Comparison of the Modeling Results of CK and AC Gas emission against time revealed that The village of Helileh faced the greatest risk. Because at the initial stages of chemical spillage, both software reported relatively close results in reaching substantial CK and AC densities within a short period.According to the criteria used for evaluating the toxic effects, based on the ERPG-2 criterion, which indicated a rather low maximum allowable level for one hour of exposure to other gases, only 2 or 3 inhalations of these agents are enough to kill a human. Moreover, the concentration results, according to the IDLH and STEL (Alternative criteria) at distances near the chemical spillage spot, the necessity of quick response, particularly for areas close to the gas release center was highlighted. It can be concluded that the scheduling regarding taking defensive measures afforded by PHAST was more rational than that of ALOHA.

Comparing the results collected through the ALOHA and PHAST software based on the outcome evaluation criteria of the toxic impacts revealed that in high F / D atmospheric conditions (ERPG-3) the PHAST software provided relatively close results. While for lower concentrations (ERPG-2) with comparable atmospheric conditions, ALOHA also submitted very similar outcomes. Accordingly, a comparison of the results based on the Emergency Response Planning Guidelines criteria suggested that the PHAST software yielded more valid results than ALOHA over longer distances at a stable (F) and relatively stable (D) atmospheric conditions; that is, PHAST software was more capable of delivering accurate results at lower concentrations than ALOHA software. Comparing WISER with ALOHA and PHAST models based on computational speed unveiled that modeling using ALOHA and PHAST software necessitates correct information such as the release type, ambient temperature, humidity, wind velocity, and degree of stability. The above steps are suitable for outcome evaluation in places where the likelihood of an incident is predicted. But for other events, owing to the time insufficiency to obtain the mentioned information and the need for quick reaction, WISER would provide information regarding the protection period, which is within the first 30 minutes of chemical spillage, quickly and easily on mobile devices, tablets, and mobile communication terminals online and offline.

Conclusion: The results of the current research regarding a 10-ton AC vapor cloud explosion indicated that the distance of 3768 m from the power plant can be regarded as safe from the intrinsic hazard of flammable vapor cloud explosion (VCE), regardless of the type of flammable material - considering the mass of 4 g defined for AC explosion and its maximum flammability, which also covers the risk range of VCE incident scenarios with fewer volumes and flammability - to the environment.

Furthermore, considering the permitted exposure limits to CK and AC gases based on the results achieved in the current study, and the inadequacy of ALOHA software to the present results at low concentrations (ERPG-2), it was recommended that the farthest distance obtained using the PHAST software and the ERPG-2 criterion, which is determined based on not dealing serious or irreversible damages, should be considered in emergency planning. The limitation of the present study can be attributed to the shortage of access to information on vital (critical and delicate) sites because of their confidentiality. It is, consequently, necessary for the proper experts to examine the effects of the pressure wave and impact of the explosion of various volumes of combat gases on the actual resistance of buildings in those sites to eventually reach the required preparations to deal with possible emergencies in advance.

Conflicts of interest: None
Funding: None

How to cite this article:

Khorram R. Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software. Iran Occupational Health. 2020 (15 Apr);17:4.

*This work is published under CC BY-NC-SA 3.0 licence

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

سلامت کار ایران
دوره ۱۷ – ۴/۱۳۹۹
مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

مدل سازی پیامدهای رهایش عوامل سیانوژن در حریم نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از نرم‌افزارهای PHAST،ALOHA و WISER

رسول خرم: (*نویسنده مسئول) باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران. rasoulKhorram@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: تاریخ نشان داده است که تلاش‌های فراوانی در جهت منع به‌کارگیری ترکیبات شیمیایی به‌عنوان جنگ‌افزار صورت گرفته است که خیلی موفقیت‌آمیز نبوده است، به‌طوری‌که از سال ۱۹۴۵ تاکنون به‌کرّات از سلاح‌های شیمیایی در جنگ‌ها استفاده‌شده است که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حملات شیمیایی دولت عراق به شهر کردنشین حلبچه در جریان جنگ علیه ایران اشاره کرد. گازهای سمی که در این کشتارها استفاده شدند، طبق گزارش‌های عملی تهیه‌شده، از سه نوع زیر بودند: گاز خردل، گاز اعصاب و گاز سیانید. گاز نوع سوم، ازجمله گازهایی بود که استنشاق (دو یا سه تنفس) آن، علت مرگ تعداد زیادی از ساکنان شهر حلبچه گزارش‌شده بود. عدم انجام اقدامات پدافندی مناسب پس از انتشار این گازها می‌تواند منجر به آسیبی جبران‌ناپذیر بر روی سلامت ساکنینی که در معرض آن قرارگرفته‌اند، شود. مطالعه‌ی حاضر سناریوی انتشار عوامل سیانوژن را بر جمعیت حومه‌ی نیروگاه اتمی بوشهر در حملات شیمیایی به‌منظور به‌کارگیری نتایج آن در برنامه‌ی واکنش اضطراری بررسی نموده است.

روش بررسی: از میان طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی معروف به گازهای جنگی، گروه سیانوژن‌ها شامل هیدروژن سیانید(AC) ، سیانوژن کلرید (CK) و سیانوژن بروميد (CB) انتخاب شد و سپس اثرات سمیت به کمک راهنماهای طرح‌ریزی شرایط اضطراری (ERPGs) و معیارهای جایگزین (STEL و IDLH) خطرات انفجار ناشی از مواجهه با آن‌ها از طریق روش Baker Strehlow با نرم‌افزارهای PHAST، ALOHA و WISER مدسازی و تعیین گردید.

یافته‌ها: مطالعه اثر انتشار بخارهای گاز AC نشان داد این بخارها در فواصل بین ۱۵ تا ۱۳۳ متری از نقطه انتشار (محدوده اشتعال‌پذیری) ابری را ایجاد می‌کنند که اگر براثر شلیک اسلحه یا جرقه الکتریکی در محیط‌های با دانسیته پایین منفجر شوند، فشاری از نوع گُرگ‌رفتن ایجاد کرده که ضربه ناشی از موج آن تا شعاع ۲۴۹/۷ متری باعث آسیب‌های ساختمانی شدید، ازجمله کج شدن اسکلت فلزی ساختمان‌ها می‌شود. در این وضعیت، مرگ براثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با فشار به ترتیب زیر ۱٪ و ۲۵٪ تا مسافت ۴۰ متری است؛ و اگر در محیط‌های با دانسیته بالا منفجر شوند، انفجاری از نوع دتوناسیون ایجاد کرده که ضربه ناشی از موج فشار آن تا شعاع ۲۰۲۸ متری باعث کج شدن اسکلت فلزی ساختمان‌ها می‌شود. در این وضعیت، مرگ براثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با فشار تا مسافت ۸۴ متری ۱۰۰٪ بوده و پس‌ازآن با افزایش مسافت، فشار کاهش‌یافته تا جایی که در فاصله ۳۳۴ متری، فشار (۰/۸–۰/۱ بار) باعث پارگی پرده گوش ۱ تا ۹۰ درصد افرادی خواهد شد که در معرض آن هستند. همچنین نتایج بر اساس معیار ERPG-3 نشان دادند که از بین گازهای AC، CK و CB، کمترین غلظت مجاز مواجهه با مقدارppm ۴ و بیشترین حریم خطر بافاصله ۷/۸ کیلومتر به گاز CK تعلق دارد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی که نشان داد نرم‌افزار ALOHA قادر به ارائه‌ی نتایج در غلظت‌های پایین نبوده، پیشنهاد گردید که دورترین مسافت خطری که از نرم‌افزار PHAST و بر اساس معیار ERPG-2 (عدم ایجاد آسیب جدی یا غیرقابل‌برگشت) به‌دست‌آمده است، ملاک تصمیم‌گیری در مواجهه و محدود نمودن اثرات زیان‌بار این نوع سلاح‌ها در تهیه طرح‌های واکنش در شرایط اضطراری قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها
PHAST
ERPGs
WISER
ALOHA
VCE
عوامل سیانوژن

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۷
تاریخ چاپ: ۹۹/۰۱/۲۷

تعارض منافع: *گزارش نشده است.*
منبع حمایت کننده: *حامی مالی نداشته است.*

شیوه استناد به این مقاله:
Khorram R. Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software. Iran Occupational Health. 2020 (15 Apr);17:4.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 3.0 صورت گرفته است

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

مقدمه

بروز حوادث در بسیاری از موارد قابل‌درک، پیش‌بینی و اجتناب نیست (۱). یکی از مهم‌ترین حوادث، انتشار گازهای شیمیایی به دلایل عمدی (حملات تروریستی یا جنگی) به محیط است (۲). تاریخ نشان داده است، کوشش‌های زیادی در جهت به‌کارگیری ترکیبات شیمیایی به‌عنوان جنگ‌افزار صورت گرفته است تا اینکه آلمانی‌ها سیلندرهای گاز کلر را برای اولین بار در آوریل ۱۹۱۵ در ایپرس (Ypres) بلژیک علیه سربازان فرانسوی و کانادایی به کاربردند (۳). این نخستین کاربرد مؤثر عوامل شیمیایی بود که ۵۰۰۰ کشته و ۱۵۰۰۰ مجروح بجای گذاشت (۳).

پروتکل ژنو در ژوئن ۱۹۲۵، کوششی در جهت جلوگیری از کاربرد عوامل شیمیایی در جنگ بود ولی خیلی موفقیت‌آمیز نبود بطوریکه از سال ۱۹۴۵ تاکنون به‌کرات از سلاح‌های شیمیایی در جنگ‌ها استفاده‌شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به جنگ تحمیلی عراق علیه ایران اشاره کرد (۳). گازهای سمی که در این کشتارها استفاده شد، طبق گزارشات عملی تهیه‌شده، سه نوع بود: گاز خردل، گاز اعصاب و گاز سیانید. گاز نوع سوم؛ ازجمله گازهای بود که باعث مرگ تعداد زیادی از ساکنان حلبچه شده بود (۴).

زیرا به‌محض استنشاق (۲ یا ۳ تنفس) قابلیت خون در جذب اکسیژن را از بین برده و به‌تدریج خون را فاسد کرده و موجب یک مسمومیت کلی در بدن می‌شوند (۳-۵). به همین دلیل این ترکیبات در بین نظامیان به عوامل خون شناخته‌شده هستند (۳).

هیدروژن سیانید[۱] (AC)، سیانوژن کلرید[۲] (CK) و سیانوژن برومید[۳] (CB) ازجمله این ترکیبات هستند (۶). یکی از روش‌های مؤثر جهت مقابله با این نوع حملات استفاده از روش‌های مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار است (۷).

این کار جهت مشخص شدن حریم ایمن و خطر است تا بتوان در صورت وقوع چنین رویدادی افراد را از محدوده خطر دور کرده و میزان تلفات را کاهش داد (۱).

از روش‌های مرسوم که ازجمله نرم‌افزارهای تحلیل و مدل‌سازی پیامد هستند می‌توان به دو روش process hazard analysis software tools(PHAST) و Areal Locations of Hazardous Atmospheres(ALOHA) (۸)، و از میان نرم‌افزارهای بانک اطلاعاتی به WISER(Wireless Information System for Emergency Responders) اشاره نمود (۹).

PHAST قادر است اثرات سمی را با روش پروبیت و موج فشار را با مدل‌های محاسباتی موج انفجار محاسبه کند. همچنین می‌تواند نمودارهای متغیر بازمان رسم کرده و درنهایت نتایج را بر روی نقشه تطبیق دهد (۱۰). ALOHA در مدل‌سازی سناریوهای انتشار مانند ابر گازهای سمی، انفجار بخارات منبسط شونده‌ی ناشی از مایعات در حال جوش، آتش فورانی و مواردی ازاین‌دست کاربرد دارد (۸).

پایگاه اطلاعاتی نرم‌افزار WISER شامل ۵۲۵۶ ماده‌ی شیمیایی، بیولوژیکی و پرتوزا بوده و ویژگی‌های کامل این مواد اعم از خواص شیمیایی، فیزیکی، فیزیوپاتولوژیکی و نکات ایمنی در آن ارائه‌شده به‌طوری‌که با استفاده از نقشه‌های اینترنتی مناطق خطر را به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی نمایش می‌دهد (۹).

با مروری بر تحقیقات پارسا راد و همکاران (۱۳۸۹) [۷]، جهانگیری و همکاران (۱۳۹۰) (۱۱)، رشتچیان و همکاران (۱۳۹۲) (۱۲)، محمد فام و همکاران (۱۳۹۵) (۱۳) و جباری و همکاران (۱۳۹۶) (۱۴) می‌توان مشاهده کرد که این نرم‌افزارها برای بررسی واحدهای فرآیندی، خطوط لوله، حمل‌ونقل دریایی و جاده‌ای در مطالعات داخلی و خارجی متعددی به‌کاررفته‌اند. تنها مطالعه ای که در آن از نرم‌افزار PHAST برای مدل‌سازی پیامد حملات شیمیایی (AC) استفاده‌شده توسط جوادی و همکاران (۱۳۹۶) انجام‌شده است (۱۵).

هدف مطالعه حاضر بررسی پیامد سمیت و انفجار، عوامل سیانوژن با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA،PHAST و WISER است. مدل‌سازی پیامد با استفاده از نرم‌افزارهای فوق ازجمله روش‌های است که برای شبیه‌سازی انتشار گازهای جنگی بر جمعیت اطراف یک واحد نیروگاهی (نیروگاه اتمی بوشهر) برای اولین بار انجام شده است.

[۱] Hydrogen Cyanide
[۲] Cyanogen Chloride
[۳] Cyanogen Bromide

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

محدود بودن مواد تعریف‌شده در بانک اطلاعاتی نرم‌افزارهای مدل‌سازی ازجمله دلایلی است که تاکنون ارزیابی پیامد رهایش و انفجار عوامل سیانوژن در ایران صورت نپذیرفته است.

در این مطالعه ارزیابی پیامد سمیت AC و انفجار آن با استفاده از نرم‌افزار PHAST و اثرات سمیت CK و CB به ترتیب به کمک نرم‌افزارهای ALOHA و WISER، جهت به‌کارگیری نتایج آن در برنامه واکنش در شرایط اضطراری تعیین و بررسی گردیده است.

روش بررسی

پس از بررسی خصوصیات طیفی از ترکیبات مواد شیمیایی معروف به گازهای جنگی توسط منابع گوناگون چون نرم‌افزارهای بانک اطلاعاتی، وب‌سایت‌های فارسی و انگلیسی و کتاب‌های متعدد، گروه سیانوژن‌ها شامل سیانوژن کلرید و سیانوژن برومید به علت آزاد کردن یون سیانید و هیدروژن سیانید به دلیل سمیت و قابلیت اشتعال‌پذیری فوق‌العاده بالا، از بین ترکیبات مذکور انتخاب‌شده و سپس مسافت خطر گازهای سمی با استفاده از شاخص‌های IDLH،ERPG و STEL و محصولات انفجار به کمک روش Baker Strehlow مدل‌سازی گردید، تا در نهایت بر اساس آن‌ها انجام برنامه‌ریزی‌های لازم به منظور مقابله با شرایط اضطراری امکان‌پذیر گردد.

مکان مورد مطالعه: شهر بوشهر به صورت یک‌شبه جزیره بوده و تنها از قسمت شرق به واسطه‌ی محور بوشهر-شیراز با خشکی ارتباط دارد. شایان ذکر است که نیروگاه هسته‌ای در حدود ۱۱ کیلومتری جنوب غربی بندر بوشهر قرار دارد (۱۶).

به منظور دسترسی به داده‌های شفاف و جهت انطباق با نقشه‌ی اینترنتی و جانمایی عمومی واحدهای صنعتی و مسکونی در منطقه‌ی هدف، این منطقه به صورت 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 بوشهر با رنگ قرمز نمایش داده شده است. فاصله‌ی مناطق هلیله، بندرگاه و کمپ مروارید با نیروگاه بوشهر به ترتیب برابر ۴۲۴، ۱۳۸۲ و ۱۶۹۷ متر است (۱۷)، که چنین فاصله‌ای آسیب‌پذیری



شکل ۱- فواصل نواحی مسکونی تا مرکز نیروگاه هسته‌ای.

آن‌ها را در حملات نظامی (خصوصاً هوایی و دریایی) درپی خواهد داشت.

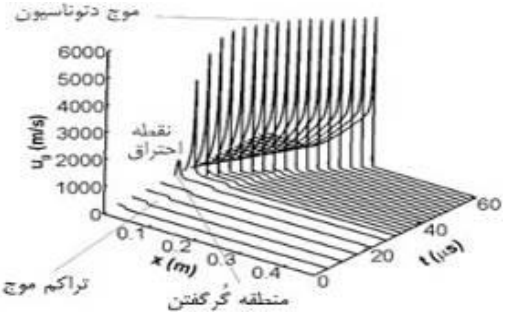
راهنمای معیارهای طرح‌ریزی واکنش در شرایط اضطراری به کمک مدل‌های PHAST و ALOHA: با مقایسه مقادیری که از مدل‌سازی یک حادثه بر اساس معیارهای استاندارد به دست می‌آید، می‌توان به‌شدت حادثه پی برد. بدین منظور در این مطالعه از معیارهای ERPG، IDLH و STEL برای تعیین ارزیابی پیامد اثرات مواد سمی استفاده‌شده است (۱۸). مقدار ERPG، IDLH و STEL مواد شیمیایی مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است (۱۹).

نحوه‌ی مدل‌سازی و ارزیابی پیامد انفجار بخارهای AC: الف) هنگامی‌که حالت بخار عامل سیانید هیدروژن روی محل استقرار نیروها پایین می‌آید، دو مورد را می‌توان به‌عنوان عامل تهدید به شمار آورد: مسمومیت با عامل و خطر انفجار که می‌تواند با شلیک اسلحه یا جرقه الکتریکی انفجاری از نوع دتوناسیون یا گُرگرفتن ایجاد کند (شکل ۲)، (۵ و۲۰). به‌همین دلیل به منظور پیش‌بینی غیرمحتمل‌ترین شرایط در این مطالعه، اثر انفجار بخارهای احتراق‌پذیر در منطقه‌ی هدف یک بار با چگالی بالای مواد سوختنی و یک بار هم با چگالی پایین از طریق روش Baker با نرم‌افزار PAHST

جدول ۱- معیارهای ارزیابی پیامد اثرات سمی برحسب (ppm).

ماده شیمیایی	ERPG			IDLH	STEL
	۱	۲	۳		
AC	-	۱۰	۲۵	۵۰	۴/۷
CK	-	۰/۰۵	۴	-	-
CB	-	-	-	-	-

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۲- منطقه‌ی گرگرفتن ناشی از احتراق و موج فشار ناشی از انفجار دتوناسیون

جدول ۲- آسیب‌های مستقیم و خسارات ساختمانی ناشی از موج فشار

پیامد مخرب	موج فشار (bar)
آسیب جزئی به ساختمان‌ها	۰/۰۲
فروریختن بخشی از دیوارها و سقف خانه‌ها	۰/۱
اسکلت فلزی ساختمان کج شده و از فونداسیون عقب‌نشینی می‌نماید	۰/۲
پارگی پرده‌ی گوش ۱ تا ۹۰ درصد افرادی که در معرض مواجهه با این فشار هستند	۰/۱-۰/۸
احتمال مرگ ۱۰ درصد افراد براثر تماس مستقیم با اثرات موج فشار	۱۷/۴
احتمال مرگ ۵۰ درصد افراد براثر تماس مستقیم با اثرات موج فشار	۲۰/۳
احتمال مرگ ۹۰ درصد افراد براثر تماس مستقیم با اثرات موج فشار	۲۴/۷

جدول ۳- درصد مرگ بر اثر آسیب غیرمستقیم ناشی از موج فشار.

میزان افزایش فشار (bar)	احتمال مرگ (٪)
۰/۰۴	۰
۱	۲۵
۱/۵	۵۰
۲	۱۰۰

مدل‌سازی شده و سپس نتایج به دست آمده جهت ارزیابی پیامدهای ضربه و موج فشار با جدول ۲ و ۳ مقایسه شد (۱۸ و ۲۱). ب) در این مطالعه برآورد محاسباتی احتمال مکان و فاصله‌ای که بخارهای قابل اشتعال آزاد شده همچنان وجود خواهند داشت تا زمانی که بطور طبیعی غلظت آن‌ها به کمتر از محدوده‌ی اشتعال‌پذیری برسد (۲۲)، توسط پارامترهای UEL، LEL و LEL_{frac}[۴] بررسی گردید.

تعریف سناریو بر اساس مدل‌های PHAST،

جدول ٤- نوع و منبع انتشار، موقعیت و شرایط آب و هوایی منطقه (سال ۱۳۹۵)

نوع سناریو و مشخصات منبع انتشار	
نوع سناریو	رهایش آنی
جرم بمب	۱۰ تن
فاز رهایش	مایع
موقعیت جغرافیایی منطقه	
منطقه مورد مطالعه	حریم نیروگاه اتمی بوشهر
طول جغرافیایی	۵۰°،۵۳´ شرقی
عرض جغرافیایی	۲۸°،۴۹´ شمالی
ارتفاع از سطح دریا	۲ متر
داده های اتمسفری	
دما	۴۳ درجه‌ی سانتی‌گراد
رطوبت	٪۷۰
سرعت باد	۱/۵ متر بر ثانیه
باد غالب	جنوب غربی
شرایط جوی سطح زمین	
زبری سطح	موانع زیاد منظم در حومه‌ی شهر و جنگل‌ها
درجه‌ی پایداری جو	
کلاس F	کاملاً پایدار
کلاس D	خنثی

ALOHA و WISER: WISER برخلاف مدل‌های PHAST و ALOHA یک نرم‌افزار بانک اطلاعاتی بوده که فواصل تخلیه در آن تابعی از اندازه‌ی نشتی[۵] (جرم ماده‌ی انتشار یافته) و تغییرات زمان (شب و روز) است (۹). اما داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی به کمک نرم‌افزارهای PHAST و ALOHA شامل موقعیت جغرافیایی منطقه، داده‌های اتمسفری، شرایط جوی و مشخصات منبع انتشار است (جدول ۴) (۱۷، ۲۳، ۲۴):

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

[۴] ۵۰٪ حد پایین کران پایین اشتعال پذیری

[۵] اندازه‌ی نشتی بیش از ۲۰۸ لیتر یا کمتر از ۲۰۸ لیتر است.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

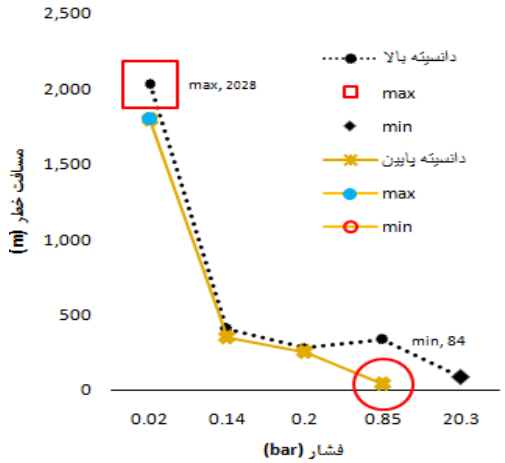
یافته‌ها

نتایج مدل‌سازی موج فشار ناشی از انفجار بخارات AC توسط نرم‌افزار PHAST: اگر ابری از بخارات قابل اشتعال(صرفه نظر از اندازه آن)، با هوا مخلوط شود ولی به‌اندازه کافی محور نشود(در اطراف آن موانع کافی وجود نداشته باشد)، انفجار آن قدرت کمتری در مقایسه بازمانی که محیط آن محصور باشد،خواهد داشت،چراکه وجود مانع سبب کند شدن و ایجاد آشفتگی و افزایش ناحیه سطحی شعله شده و نرخ احتراق و انبساط ابر قابل اشتعال را گسترش می‌دهد (۱۸). به همین دلیل در این مطالعه، اثر انفجار بخارهای احتراق‌پذیر در منطقه‌ی هدف یک‌بار با چگالی بالای مواد سوختنی و یک‌بار هم با چگالی پایین به شرح ذیل محاسبه‌شده است:

مخاطرات ضربه و موج انفجار ابر بخار[۶] (VCE) در دانسیته‌ی پایین: نتایج ارائه شده در نمودار ۱ نشان می‌دهد که حداکثر شعاع موج (Overpressure) ناشی از انفجار ابر بخار AC در فشارهای ۰/۱، ۰/۰۲ و ۰/۲۱ بار به ترتیب باعث آسیب جزئی به ساختمان‌ها تا مسافت ۱۷۹۷ متری (معادل ضربه ناشی از موج فشار ۱۳۲/۷۸ $N.s/m^2$)، فروریختن بخشی از دیوار و سقف خانه‌ها تا مسافت ۳۴۹/۳۳ متری (معادل ضربه ۶۷۰/۱۵ $N.s/m^2$) و کج شدن اسکلت فلزی ساختمان ها تا مسافت ۲۴۹/۷۲۳ متری (معادل ضربه ۹۳۴/۸۵ $N.s/m^2$) می‌شود.

مخاطرات ضربه و موج انفجار ابر بخار (VCE) در دانسیته بالا: اما در محیط‌های با دانسیته بالا، فشارهای ۰/۰۲۱، ۰/۱۳ و ۰/۲۱ بار منطقه را به ترتیب تا مسافت‌های ۲۰۲۸، ۴۰۳ و ۲۸۳ متری تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. پس از آن فشار با افزایش مسافت کاهش یافته تا جایی که در فاصله ۳۷۶۸متری آسیب‌های ناشی از ضربه و موج آن به زیر ۰/۰۱ بار می‌رسد.

مخاطرات VCE برحسب فاصله (گُرگرفتن): در منطقه‌ای با دانسیته‌ی پایین از مواد سوختنی، فشار در نقطه‌ی صفر کانون حادثه به ۰/۸۵ بار (معادل ضربه‌ی ۲۲۷۱۱/۹۸ $N.s/m^2$) رسیده که در این وضعیت مرگ بر اثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با آن فشار به ترتیب زیر ۱٪ و ۲۵٪ تا مسافت ۴۰



نمودار ۱– مسافت خطر انفجار در دانشیته بالا و پایین

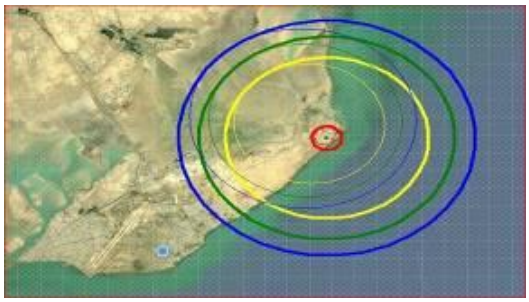
(معادل حداکثر ضربه ۵۸۳۸/۱۵ $N.s/m^2$) متری است. پس از آن فشار با افزایش مسافت کاهش یافته تا جایی که در فاصله ۶۲۱۸ متری آسیب‌های ناشی از ضربه و موج آن به صفر می‌رسد.

مخاطرات VCE برحسب فاصله (دتوناسیون): در منطقه‌ای با دانسیته‌ی بالا از مواد سوختنی، فشار در نقطه‌ی صفر کانون حادثه به ۲۰/۳ بار (معادل ضربه ۲۲۷۱۱/۹۸ $N.s/m^2$) رسیده که در این وضعیت مرگ بر اثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با آن فشار تا مسافت ۸۴ متری ۱۰۰٪ (معادل حداکثر ضربه ۲۷۲۳/۲۸ $N.s/m^2$) و در ۳۳۴ متری (۷۷۰/۱۹ $N.s/m^2$) به ۰/۸ بار کاهش پیدا کرده که این فشار باعث پارگی پرده گوش ۱ تا ۹۰ درصد افرادی خواهد شد که در معرض آن هستند.

تعیین حد بالا و پایین انفجارپذیری بخارات AC انتشار یافته به محیط به کمک نرم‌افزار PHAST: کرانه‌ی بالای انفجار پذیری AC (۴۱۰۰۰۰ ppm) بر اساس زمان میانگین‌گیری ۱۸/۷۵ ثانیه در مسافت ۱۵ متری، کرانه پایین (۶۰۰۰۰ ppm) در مسافت ۱۳۳ متری نقطه نشت و LEL_{frac} (۳۰۰۰۰ ppm) که به میزان ۵۰٪ حد پایین انفجار (LEL) برای اطمینان از پیشگیری و احتمال وقوع حادثه در نظر گرفته می‌شود در فاصله‌ی ۲۰۴ متری از نقطه نشت است. با این حال در شرایط جوی D ۱/۵ به‌ترتیب UEL، LEL، و LEL_{frac} با غلظت‌های فوق در فواصل ۱۴/۸، ۱۳۳/۸ و ۱۹۹/۸ متری قرار دارند. این بدین معنی است که احتمال وقوع انفجار در فواصلی بیش از مقادیر بیان

[۶] Vapor Cloud Explosion

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۳- کنتور نشت عمدی AC در مرکز نیروگاه هسته‌ای بوشهر (مساحت منطقه قرمز، زرد و سبز به‌ترتیب ۳/۵۶۷۸۲e+۷۰۰۷۰۲،۰۰۷، ۵/۸۱۶۴۲e+۰۰۷ و مترمربع می‌باشد).

شده به علت پراکنده شدن بخارات انفجار پذیر تا زیر ۵۰٪ LEL به هیچ وجه وجود نخواهد داشت.

نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز AC توسط نرم‌افزار PHAST بر اساس فاصله: با توجه به محاسبات انجام گرفته مطابق شکل ۳ (۲۵)، دوز سمی معادل بر اساس ERPG-3 در مسافت ۳۲۶۷ متری پایین‌دست جریان باد قرار دارد. همه‌ی افراد در این فاصله قادر خواهند بود به مدت یک ساعت در معرض گاز AC قرار گیرند بدون آن که درگیر آسیبی شوند که آن‌ها را از انجام اقدامات ایمنی به مانند پوشیدن تجهیزات حفاظت انفرادی بازدارد. همچنین در فواصل بیش از ۵۰ هزار متر بر اساس پایین‌ترین سطح غلظت (ERPG-2) ماده‌ی AC، همه افراد به مدت یک ساعت بدون احتیاج به تجهیزات حفاظت انفرادی قادر خواهند بود به فعالیت‌های خود ادامه داده بدون این که حتی در معرض بوی ناخوشایندی از آن ماده قرار گیرند.

اما برای کلاس جوی D با شرایط مشابه معیارهای ERPG-2 و ERPG-3 به ترتیب در فواصل ۴۷۱۶ و ۳۰۳۰ متری به عنوان غلظت‌های قابل‌قبول (۱۰ و ۲۵ ppm) از مرکز نیروگاه هسته‌ای در پایین‌دست جریان باد قرار دارند.

نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز CK توسط نرم‌افزار ALOHA بر اساس فاصله: نتایج ارائه شده در شکل ۴ (۲۶)، نشان می‌دهد که CK در منطقه‌ی تهدید نارنجی (۰/۰۵ ppm) بر اساس ERPG-2 تا بیشتر از ۱۰ کیلومتر و منطقه‌ی تهدید قرمز (۴ ppm) بر اساس ERPG-3 به میزان ۷/۸ کیلومتر در جهت باد گسترش خواهند یافت و در کلاس پایدار D منطقه‌ی تهدید نارنجی تا بیشتر از ۱۰ کیلومتر و



شکل ٤- کنتور نشت CK در میدان اصلی منتهی به نیروگاه و حومه‌ی آن



شکل ۵ – فاصله اقدام حفاظتی سیانوژن برومائید (۹)

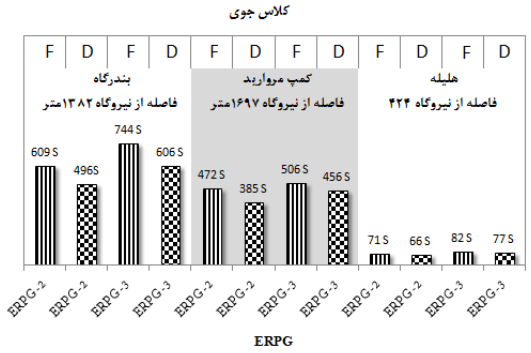
منطقه‌ی تهدید قرمز به میزان ۵/۴ کیلومتر در جهت باد گسترش خواهند یافت.

نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز CB توسط نرم‌افزار WISER بر اساس فاصله: با توجه به محاسبات نرم‌افزار WISER مطابق شکل ۵، در حوادث نشت سیانوژن برومائید به عنوان یک اقدام فوری پیشگیرانه می‌توان به ایزوله کردن نشتی و یا منطقه‌ی نشت در همه‌ی جهات حداقل ۵۰ متر (۱۵۰ فوت) برای مایعات و ۲۵ متر (۷۵ فوت) برای مواد جامد اشاره کرد (۹).

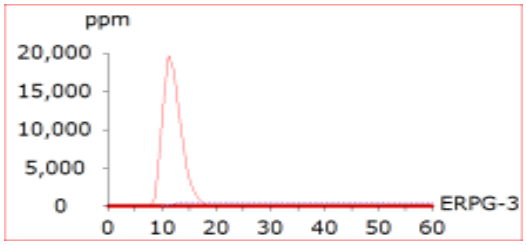
نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گازAC توسط نرم‌افزار PHAST بر اساس زمان مواجهه: همان‌طور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین خطر متوجه روستای هلیله که در فاصله ۴۲۴ متری از مرکز نیروگاه هسته‌ای قرار دارد است زیرا غلظت بعد از ۶۶s بر اساس معیار ERPG-2 به ۱۰ppm رسیده و این غلظت بعد از گذشت ۱۱s دیگر به بالاترین میزان مجاز تماس AC (۲۵ppm) می‌رسد. درنتیجه بعد از ۷۷ ثانیه غلظت آلاینده‌ها از آستانه‌ی مواجهه فراتر رفته و عملاً با گذشت زمان فرار از این منطقه غیرممکن می‌شود.

نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز CK توسط نرم‌افزار ALOHA بر اساس زمان مواجهه: همان‌طور که در نمودار ۳ (۲۶)، دیده می‌شود بیشترین خطر متوجه همسایه‌ی شمالی نیروگاه در فاصله ۴۲۴

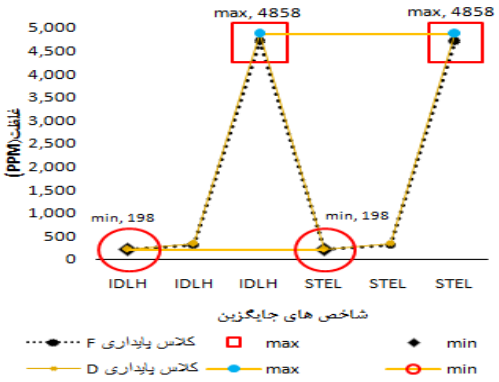
[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]



نمودار ۲- آستانه‌ی حد تماس AC با توجه به معیار ERPGs



نمودار ۳- نمودار غلظت بر مبنای معیار ERPG برای انتشار گاز CK



نمودار ٤- نتایج غلظت بر مبنای شاخص‌های جایگزین

متری است زیرا پس از گذشت حدود ۷ دقیقه (با در نظر گرفته جهت باد) از رهایش، خط غلظت (ماده شیمیایی) بیرونی به مدت ۱۰ دقیقه بالاتر از صفر قرار می‌گیرد. در این مدت غلظت بیرونی به مقدار ۱۹۵۰۰ppm می‌رسد که بالاتر از آستانه مواجهه‌ی ۴ ppm برای کلرید سیانوژن بر اساس معیار ERPG-3 در مدت زمان یک ساعت است.

نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز AC توسط نرم‌افزار PHAST بر اساس شاخص‌های جایگزین: نتایج ارائه شده در نمودار ۴ نشان می‌دهد که مقادیر غلظت بر اساس شاخص‌های جایگزین (IDLH و STEL) در فواصل نزدیک به محل ریختن مواد شیمیایی (انفجار بمب حاوی گاز AC) در بازه‌ی زمانی ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ ثانیه ثابت خواهد ماند. با توجه به مدل شدن سناریوی رهایش آنی، ثابت بودن مقادیر غلظت در فواصل زمانی فوق منطقی بوده زیرا حجم زیادی از مواد در مدت زمان کوتاهی به محیط اطرف پخش شده و رقیق شدن آن نیز به آهستگی صورت می‌گیرد.

مقایسه نتایج انفجار دوتوناسیون و گُرگرفتن به کمک مدل محاسباتی موج انفجار Baker: بررسی نزدیک‌ترین و دورترین مکان به نیروگاه، هلیله و بندرگاه به ترتیب در فواصل ۴۲۴ و ۱۳۸۲ متری نشان می‌دهد که آسیب‌های ناشی از انفجار در فواصل نزدیک به نیروگاه که هنوز ساخت و ساز صورت می‌گیرد باعث مرگ ۱۰ تا ۵۰ درصد از افراد به‌صورت مستقیم و ۲۵ تا ۵۰ درصد به‌صورت غیرمستقیم خواهد شد. این در حالی است که در فواصل دورتر، ضربه‌ی ناشی از انفجار به ۱۵۴/۶ $N.s/m^2$ معادل ۰/۰۲ بار کاهش می‌یابد؛ بنابراین در فواصل دور از نیروگاه نیز انفجار دتوناسیون همچون گُرگرفتن به علت کاهش سرعت شعله و تراکم موج، به ساختمان‌ها و افراد آسیب جدی وارد نخواهد کرد.

مقایسه نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار گاز CK و AC بر اساس زمان: نمودار ۲ و ۳ نشان می‌دهد بیشترین خطر متوجه روستای هلیله است زیرا در فواصل اولیه‌ی ریختن مواد شیمیایی، هر دو نرم‌افزار نتایج نسبتاً نزدیکی را در رسیدن غلظت به حد مواجهه‌ی CK و AC در مدت زمان کوتاهی را گزارش نموده‌اند. با استناد به معیارهای ارزیابی پیامد اثرات سمی جدول ۱ بر اساس ERPG-2، که حداکثر میزان مجاز بسیار پایین این گازها جهت یک ساعت مواجهه نسبت به سایر گازها را نشان می‌دهد به طوری که تنها ۲ یا ۳ تنفس از این عوامل برای کشتن یک انسان کافی است. همچنین نتایج غلظت بر اساس شاخص‌های جایگزین (IDLH و STEL) در فواصل نزدیک به محل ریختن مواد شیمیایی، تأکیدی بر لزوم واکنش سریع به خصوص برای مناطقی است که در فواصل نزدیک به کانون رهایش گاز قرار دارند. می‌توان نتیجه گرفت که زمان‌بندی ارائه شده توسط نرم‌افزار PHAST برای انجام اقدامات پدافندی نسبت به ALOHA منطقی‌تر

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

است.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار ALOHA و PHAST بر اساس معیارهای ارزیابی پیامد اثرات سمی: نمودار ۲ نشان می‌دهد در شرایط جوی D/F در غلظت‌های بالا (ERPG-3) نرم‌افزار PHASTنتایج نسبتاً نزدیکی ارائه نموده است، در حالی که در غلظت‌های پایین‌تر (ERPG-2) با شرایط جوی مشابه ALOHA نیز نتایج کاملاً یکسانی را ارائه می‌دهد؛ بنابراین از مقایسه نتایج حاصله بر مبنای معیارهای راهنمای طرح ریزی واکنش در شرایط اضطراری مشخص می‌شود که نرم‌افزار PHAST در شرایط جوی پایدار (F) و نسبتاً پایدار (D) نتایج دقیق‌تری را نسبت به ALOHA در مسافت‌های طولانی‌تر ارائه می‌دهد. به عبارات دیگر نرم‌افزار PHAST در ارائه نتایج در غلظت‌های کم توانمندی بالاتری نسبت به نرم‌افزار ALOHA دارد.

مقایسه WISER با مدل‌های ALOHA و PHAST بر اساس سرعت محاسبه نتایج: مدل‌سازی به کمک نرم‌افزارهای ALOHA وPHAST مستلزم اطلاعات دقیقی شامل نوع رهایش، دمای محیط، رطوبت، سرعت باد و درجه‌ی پایداری است. مراحل فوق برای ارزیابی پیامد در مکان‌هایی که احتمال وقوع حادثه از قبل پیش‌بینی می‌شود، مناسب هستند. اما در سایر موارد با توجه به نبود زمان کافی برای دست‌یابی به اطلاعات فوق و لزوم واکنش سریع، WISER اطلاعات مربوط به فاصله‌ی حفاظتی یعنی ۳۰ دقیقه اول را پس از انتشار مواد شیمیایی به سرعت و سهولت بر روی دستگاه‌های تلفن همراه، تبلت‌ها و پایانه‌های ارتباطی سیار به‌صورت آنلاین و آفلاین ارائه می‌دهد (۹).

بحث

نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار PHAST نشان داد که احتمال بروز تلفات جانی در اثر پدیده‌های دتوناسیون و گرگرفتن در فواصل دور از کانون انفجار بعید است، اما در فواصلی که مقدار اضافه فشار به حد ۰/۰۲ بار برسد، سازه‌ها به‌صورت جزئی تخریب خواهند شد. همچنین در ارائه‌ی نتایج در غلظت‌های پایین (ERPG-2)، PHAST نشان داد قابلیت بیشتری نسبت به ALOHA دارد، در حالی که در غلظت‌های بالا (ERPG-3) ALOHA بالاترین مسافت خطر را با استفاده از معیارهای ارزیای پیامد اثرات سمی برای CK (با فاصله خطر ۷/۸ کیلومتر) ارائه نموده است به طوری که نتایج بدست آمده با توجه به حداکثر میزان مجاز بسیار پایین این گاز (مطابق با جدول ۱) جهت یک ساعت مواجهه نسبت به هیدروژن سیانید (با فاصله خطر ۳۲۶۷ متر) که نشان دهنده‌ی سمیت فوق‌العاده بالای بوده قابل‌قبول است.

مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات جباری و همکاران (۱۳۹۶) که با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST انجام شده بود، نشان می‌دهد که تطابق نسبتاً یکسانی بین نتایج بدست آمده در دو تحقیق وجود دارد. در هر دو تحقیق سناریوی انتخابی شکافت کامل و شرایط پایداری F در نظرگرفته شد. در تحقیق جباری از بین مواد مورد بررسی بر اساس ERPG-3 مشخص شد که ALOHA در سه مورد (آمونیاک، بوتادین و بنزن) و PHAST در یک مورد (کلر) بالاترین مسافت خطر را بر اساس بیشترین غلظت از بین شاخص‌های CEI نشان می‌دهند.

در مطالعه حاضر نیز مسافت ۷/۸ کیلومتری برای سیانوژن کلرید (توسط ALOHA) و ۳۲۶۷ متری برای هیدروژن سیانید (توسط PHAST) بالاترین مسافت خطر را بر اساس بیشترین غلظت (ERPG-3) نشان می‌دهند. در هر دو تحقیق (ERPG-3) ALOHA نسبت به PHAST مسافت خطر بیشتری را در غلظت‌های بالا ارائه نموده است.

در هر دو مطالعه (ERPG-2) PHAST در غلظت‌های پایین‌تر نشان می‌دهد که فواصل خطر حاصله از پراکندگی زیاد نسبت به هم برخوردار بوده در حالی که ALOHA نشان داده است که تطابق یکسانی بین نتایج بدست آمده وجود ندارد. به طور کلی ALOHA اهمیت استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی را برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر روشن می‌سازد (۱۴).

بر اساس مطالعات جائوجیاهونگ و همکاران (۲۰۰۵) و پارساراد و همکاران (۱۳۹۰) که با استفاده از نرم‌افزار PHAST انجام‌شده ساکنین مناطقی که غلظت گاز کلر بر اساس معیار ERPG-2 در آنجا حداکثر تا ppm ۳ می‌رسد، فرصت فرار به مکان‌های دورتر را ندارند (۷، ۲۷). از طرف دیگر تحقیقات جهانگیری و همکاران (۱۳۸۹) که جهت تعیین حریم خطر رهایش مواد

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

شیمیایی با استفاده از شاخص CEI در یک صنعت پتروشیمی انجام شده بود نیز نشان داد که در صورت وقوع حوادثی که منجر به رهایش مواد سمی از مخازن شود، کارکنان مستقر در داخل حریم خطر می‌بایست سریعاً تخلیه شده و ازآنجا که ممکن است امکان تخلیه افراد از اتاق کنترل وجود نداشته باشد (به علت ضرورت حضور آن‌ها جهت کنترل فرآیند) ضروری است اقدامات لازم جهت ایمن‌سازی این اتاق‌ها از قبل به عمل آید (۱۱).

در تحقیق حاضر که همچون سه مطالعه‌ی فوق سناریوی انتخابی (شکافت کامل) و شرایط پایداری (D) یکسان در نظر گرفته‌شده است نیز مشخص گردید که بیشترین خطر متوجه روستای هلیله است زیرا غلظت بعد از ۶۶s بر اساس معیار ERPG-2 به ppm ۱۰ رسیده و عملاً باگذشت زمان فرار از این منطقه غیرممکن می‌شود. بنابراین با توجه به زبری سطح شعاع منطقه‌ی مطالعاتی و عدم وجود نقاط مرتفع با در نظر گرفتن چگالی گاز AC، این مطالعه نیز به‌مانند سه مطالعه دیگر وجود اتاق‌هایی با امکاناتی نظیر سیستم تهویه فشار مثبت را در اماکن با طبقه‌بندی حساس، حیاتی و مهم مثل بیمارستان‌ها، نیروگاه‌ها، مناطق نظامی و غیره برای مقابله با شرایط‌های اضطراری به خصوص انتشار گازهای سمی در حملات تروریستی و جنگی توصیه می‌کند.

مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه‌ی جوادی و همکاران (۱۳۹۶) که با استفاده از نرم‌افزار PHAST جهت تعیین حریم خطر گاز AC ناشی از انفجار بمب شیمیایی که در شرایط جوی خنثی (D) انجام شده بود نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج این دو تحقیق وجود دارد. نتایج مطالعه‌ی جوادی نشان می‌دهد که وضعیت جوی خنثی بدترین وضعیت برای انجام اقدامات حفاظتی و پدافندی بوده چرا که منطقه زودتر آلوده می‌شود. مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در نمودار ۲ این تحقیق با مطالعه‌ی جوادی در شرایط جوی مشابه نشان می‌دهد که غلظت بیشتری از AC در مدت زمان کوتاه‌تری در شرایط جوی خنثی نسبت به شرایط جوی پایدار منطقه را آلوده می‌کند. بررسی اختلاف موجود بین حجم نشتی در دو مطالعه‌ی انجام شده نشان می‌دهد که امکان مقایسه‌ی سایر نتایج با یکدیگر وجود ندارد (۱۵).

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر برای انفجار ابر بخار ۱۰ تن AC نشان می‌دهد فاصله ۳۷۶۸متری از نیروگاه می‌تواند به‌عنوان حریم ایمن از خطر ذاتی موج انفجار ابر بخار قابل اشتعال(VCE) فارغ از نوع ماده قابل اشتعال (با توجه به جرم تعریف‌شده برای انفجار AC و قابلیت اشتعال‌پذیری[۷] حداکثری آن= ۴، که محدوده خطر سناریوهای حوادث مربوط به VCE مواد با حجم و قابلیت اشتعال‌پذیری کمتر را نیز تحت پوشش قرار می‌دهد) انتشاریافته به محیط باشد.

نتایج مدل سازی پیامد در مطالعه حاضر، وجود قوانین بین‌المللی که برای منع حملات نظامی به این تأسیسات وضع گردیده و عواقبی که حمله به آن‌ها با توجه انتشار وسیع نخاله‌های رادیواکتیو، ممکن است دامن همسایه‌های کشور مورد تهاجم گرفته را نیز در برگیرد، شواهدی بر محتمل‌تر بودن حملات شیمیایی توسط گازهای سمی نسبت به سایر سلاح‌ها (متعارف و نامتعارف[۸] انفجاری) در شعاع مطالعه‌ی فوق هستند.

بنابراین با توجه به حدود تماس مجاز مواجهه‌ی گازهای CK و AC بر اساس نتایج حاصله در این پژوهش و عدم قابلیت نرم‌افزار ALOHA در ارائه‌ی نتایج در غلظت‌های پایین (ERPG-2) پیشنهاد می‌شود دورترین مسافت خطر به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار PHAST، با استفاده از معیار ERPG-2 که بر اساس عدم ایجاد آسیب جدی یا غیرقابل‌برگشت تعیین می‌شود، در برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری مدنظر قرار گیرد و همچنین اقدامات پدافندی در رابطه با این نوع سلاح مخصوصاً در مناطقی که نیروگاه‌های اتمی قرار دارند، موردتوجه قرار گیرد.

این مطالعه به بررسی اثرات سلاح‌های نامتعارف شیمیایی‌بر اماکن وجمعیت حومه‌ی نیروگاه اتمی بوشهر پرداخته است. یافته‌های مطالعه حاضر می‌تواند تا حد زیادی به درک بهتر اقدامات پدافندی در رابطه با این نوع از سلاح‌ها کمک کند. بااین‌وجود بایستی محدودیت‌های مطالعه نیز در نظر گرفته شود.

[۷] قابلیت اشتعال پذیری مواد از ۰ (مشتعل نمی شود) تا ۴ (بسیار اشتعال پذیر) تقسیم‌بندی می‌شود

[۸] سلاح‌های شیمیایی، بیولوژیکی و هسته‌ای

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

محدودیت مطالعه‌ی حاضر را می‌توان عدم دسترسی به اطلاعات اماکن استراتژیک (حیاتی و حساس) به علت محرمانه بودن آن‌ها دانست. بنابراین می‌بایست مطالعه‌ی اثرات موج فشار و ضربه ناشی از انفجار حجم‌های گوناگون گازهای جنگی بر مقاومت واقعی ساختمان‌ها در آن اماکن توسط کارشناسان مربوطه انجام‌گرفته تا درنهایت برای مقابله با شرایط‌های اضطراری محتمل آمادگی‌های لازم را از قبل کسب کنند.

تقدیر و تشکر

از استاد نخبه علی خرّم رحمت‌الله علیه و همسر مهربانم که در مسیر رشد و اعتلای علمی مشوق بنده بودن صمیمانه سپاسگزارم.

References

1.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). J Health Saf Work. 2019;9(2):158. [Persian]

2. Parvini M, Gharagouzlou E. Consequence modeling for chlorine release of a storage tank with the field experiment data. Model Engin. 2014;16(55):16. [Persian]

3. Fakhraeian H .Chemical Factors. 1st ed. Tehran: Imam Hossein; 2003:1-4,151. [Persian]

4. Al Gharib MM. Crimes of Chemical Wars. Asgari M A, Translator. Tehran: Holy Defense Studies; 210,123. [Persian]

5. Norris G, Fuller Weil. Modern War (Chemical, Biological, and Nuclear Warfare). Minaei ME, Translator. Tehran: Imam Hossein University Press; 2010, 35-36. [Persian]

6. Marrs TT, Maynard RL, Sidell F. Chemical Warfare Agents (Toxicology and Treatment). 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2007:709,525.

7. Mortazavi S, Parsarad M, Asilian Mahabadi H, Khavanin A. Evaluation of chlorine dispersion from storage unit in a petrochemical complex to providing an emergency response program. Iran Occup Health. 2011;8(3):68-77. [Persian]

8. Moradi Hanifi S, Omidi L, Moradi G. Risk calculation and consequences simulation of natural gas leakage accident using ALOHA software. J Health Saf Work. 2019;9(1):14. [Persian]

9. WebWISER & WISER Application, Version 4.6 software. Available from: https://wiser.nlm.nih.gov/

10. Kariznovi H, Farshad A A, 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 Occup Health. 2017;14(3):39. [Persian]

11. Jahangiri M, Parsarad A. Determination of hazard distance of chemical release in a petrochemical industry by chemical exposure index (CEI). Iran Occup Health. 2010;7(3):55-62. [Persian]

12. Bagheri M, Badri N, Rashtchian D. Determining the safe region of sour gas pipelines by quantitative risk assessment method. J Chem Chem Engin. 2013;32(2):57-71. [Persian]

13. Shahedi ali abadi S, Assari M J, Kalatpour O, Zarei E, Mohammadfam I. Consequence modeling of fire on Methane storage tanks in a gas refinery. J Occup Health Environ. 2016;3(1):51-59. [Persian]

14. 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 Occup Health. 2017;14(4):38-41. [Persian]

15. 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. [Persian]

16. Zangabadi A. Shahsvani MJ. Space analysis of nuclear power plant construction effects on the physical structure of Bushehr City. Secur Soc Order Strategic Stud. 2012;1(3):85. [Persian]

17. Google Earth. Ver Pro7.1.2.2041. Available from: https://www.google.com/earth.

18. Jahangiri M, Noroozi A, Sareban Zadeh K. Management and risk assessment. 1st ed. Tehran: Fanavaran; 2013:140,157, 190. [Persian]

19. CAMEO Chemicals, Version 2.7 Software. Available from: https://cameochemicals.noaa.gov.

20. Narin B, Ozyörük Y, Ulas A. Two dimensional numerical prediction of deflagration-to-detonation transition in porous energetic materials. J Hazard Mat. 2014;273(3):49.

21. Naserzadeh Z, Mehrabani M, Kohhpaee H. Modeling Software training for the Consequences of ALOHA Events. 1st ed. Tehran: Sepid Ber; 1394:18. [Persian]

22. Nolan DP. Handbook of fire and explosion protection engineering principles. Rahimi Monjezi I,Parsi M,Nassim H, Translator. Tehran: Oil Industry; 2014, 141.

23. European Center for Medium-Range Weather Forecast. ECMWF. Available from: http://www.ecmwf.int.

24. Iran Meteorological Organization. Available from:http://reports.irimo.ir/jasperserver/flow.html?_flowId=searchFlow.

25. PHAST (Process hazard analysis software). Available from: Ver 6.5. https://softsara.ir/?p=14464

26. ALOHA. Ver 5.4.4. Available from:

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]

https://www.epa.gov/cameo/aloha-software.
27. Jia HJ, Shu LY, Tsai CM. Using consequence analysis on some chlorine operation hazards and their possible effects on neighborhoods in central Taiwan. J Loss Prev Process Indust. 2005;18:474-480.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17]