



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

10 **Rasoul Khorram**, (\*Corresponding author) Young Researchers and Elite Club, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran. [rasoulKhorram@yahoo.com](mailto: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 occurred 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 deal 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

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 / m<sup>2</sup>, 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**



## مدل سازی پیامدهای رهایش عوامل سیانوزن در حریم نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از نرم افزارهای PHAST، ALOHA و WISER

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

### چکیده

#### کلیدواژه‌ها

PHAST  
ERPGs  
WISER  
ALOHA  
VCE  
عوامل سیانوزن

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

**روش بررسی:** از میان طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی معروف به گازهای جنگی، گروه سیانوزن‌ها شامل هیدروژن سیانید (AC)، سیانوزن کلرید (CK) و سیانوزن برومید (CB) انتخاب شد و سپس اثرات سمیت به کمک راهنماهای طرح‌ریزی شرایط اضطراری (ERPGs) و معیارهای جایگزین (IDLH و STEL) خطرات انفجار ناشی از مواجهه با آن‌ها از طریق روش Baker Strehlow با نرم‌افزارهای PHAST، ALOHA و WISER مدلسازی 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 بر اثر 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، از جمله کج شدن اسکلت فلزی ساختمان‌ها می‌شود. در این وضعیت، مرگ بر اثر 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 بر اثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با فشار تا مسافت ۸۴ متری ۱۰۰٪ بوده و پس از آن با افزایش مسافت، فشار کاهش یافته 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 مقدار ۴ ppm و بیشترین حریم خطر با فاصله ۷/۸ کیلومتر به گاز CK تعلق دارد.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج به دست آمده 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 غیرقابل برگشت) به دست آمده است، ملاک تصمیم‌گیری در مواجهه و محدود نمودن اثرات زیان‌بار این نوع سلاح‌ها در تهیه طرح‌های واکنش در شرایط اضطراری قرار گیرد.

**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 3.0 CC BY-NC-SA صورت گرفته است

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۷

تاریخ چاپ: ۹۹/۰۱/۲۷

## مقدمه

بروز حوادث در بسیاری از موارد قابل درک، 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 به‌کاربردند (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 استفاده شده 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 تهیه شده، سه نوع بود: گاز خردل، گاز اعصاب و گاز سیانید. گاز نوع سوم؛ از جمله 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 شناخته شده هستند (۳).

هیدروژن سیانید<sup>۱</sup> (AC)، سیانوژن کلرید<sup>۲</sup> (CK) و سیانوژن برومید<sup>۳</sup> (CB) از جمله 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 از جمله نرم‌افزارهای تحلیل و مدل‌سازی پیامد هستند می‌توان به دو روش process Areal and hazard analysis software tools (PHAST) 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 در نهایت 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 از این دست 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 ارائه شده به‌طوری که 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 مطالعه‌ی ای که در آن از نرم‌افزار PHAST برای مدل‌سازی پیامد حملات شیمیایی (AC) استفاده شده توسط جوادی و همکاران (۱۳۹۶) انجام شده است (۱۵).

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

<sup>۱</sup> Hydrogen Cyanide

<sup>۲</sup> Cyanogen Chloride

<sup>۳</sup> Cyanogen Bromide



شکل ۱- فواصل نواحی مسکونی تا مرکز نیروگاه هسته‌ای.

آن‌ها را در حملات نظامی (خصوصاً هوایی و دریایی) در پی 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 به شدت حادثه پی برد. بدین منظور در این مطالعه از معیارهای IDLH، ERPG و STEL برای تعیین ارزیابی پیامد اثرات مواد سمی استفاده شده است (۱۸). مقدار IDLH، ERPG و STEL مواد شیمیایی مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است (۱۹).

**نحوه‌ی مدل‌سازی و ارزیابی پیامد انفجار بخارهای AC:** هنگامی که 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 گرگرفتن ایجاد کند (شکل ۲)، (۵ و ۲۰). به‌همین دلیل به منظور پیش‌بینی غیرمتمثل‌ترین 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 PHAST

**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	-	-	-	-	-

محدود بودن مواد تعریف‌شده در بانک اطلاعاتی نرم‌افزارهای مدل‌سازی از جمله دلایلی است که تاکنون ارزیابی پیامد رهاش 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 گوناگونی 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

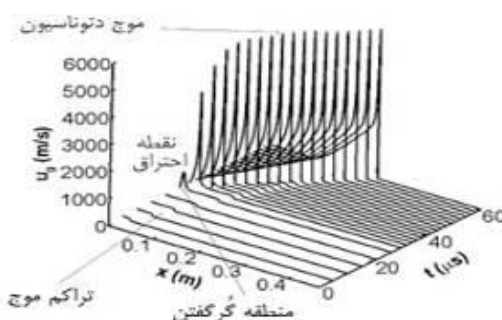


**جدول ۴- نوع و منبع انتشار، موقعیت و شرایط آب و هوایی منطقه (سال ۱۳۹۵)**

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

**ALOHA و WISER: WISER** برخلاف مدل های PHAST و ALOHA یک نرم افزار بانک اطلاعاتی بوده که فواصل تخلیه در آن تابعی از اندازه ی نشتی<sup>۵</sup> (جرم ماده ی انتشار یافته) و تغییرات زمان (شب و روز) است (۹). اما داده های مورد نیاز برای مدل سازی به کمک نرم افزارهای PHAST و ALOHA شامل موقعیت جغرافیایی منطقه، داده های اتمسفری، شرایط جوی و مشخصات منبع انتشار است (جدول ۴) (۱۷، ۲۳، ۲۴): سپس داده های به دست آمده از مراحل فوق به نرم افزارها داده شد تا در نهایت سطوح خطر براساس معیارهای ERPG، IDLH، STEL و روش Baker و Strehlow محاسبه گشته و بر اساس آن پیشنهاداتی برای برنامه ریزی در شرایط اضطراری ارائه شود.

<sup>۵</sup> اندازه ی نشتی بیش از ۲۰۸ لیتر یا کمتر از ۲۰۸ لیتر است.



**شکل ۲- منطقه ی گرگرفتن ناشی از احتراق و موج فشار ناشی از انفجار دتوناسیون**

**جدول ۲- آسیب های مستقیم و خسارات ساختمانی ناشی از موج فشار**

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

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

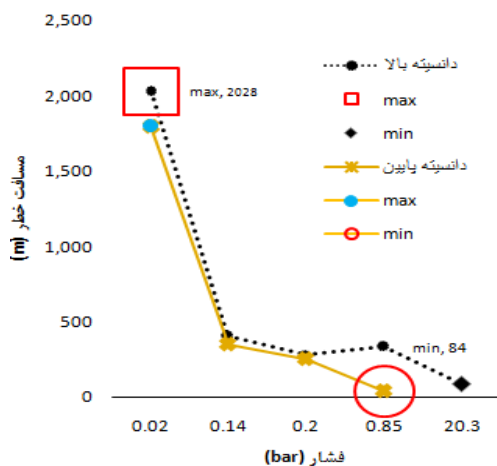
میزان افزایش فشار (bar)	احتمال مرگ (%)
۰/۰۴	۰
۱	۲۵
۱/۵	۵۰
۲	۱۰۰

مدل سازی 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 فاصله ای که بخارهای قابل اشتعال آزاد شده همچنان وجود خواهند داشت تا زمانی که بطور طبیعی غلظت آنها به کمتر از محدوده ی اشتعال پذیری برسد (۲۲)، توسط پارامترهای UEL، LEL و  $LEL_{frac}$  بررسی گردید.

**تعریف سناریو بر اساس مدل های PHAST.**

<sup>۴</sup> ۵۰٪ حد پایین کران پایین اشتعال پذیری

## یافته‌ها



نمودار ۱- مسافت خطر انفجار در دانسیته بالا و پایین

(معادل حداکثر ضربه  $5838/15 \text{ N.s/m}^2$ ) 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 بر حسب فاصله (دتوناسیون):** در منطقه‌ای با دانسیته‌ی بالا از مواد سوختنی، فشار در نقطه‌ی صفر کانون حادثه به  $20/3$  بار (معادل ضربه  $22711/98 \text{ N.s/m}^2$ ) رسیده که در این وضعیت مرگ بر اثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با آن فشار تا مسافت ۸۴ متری  $100\%$  (معادل حداکثر ضربه  $2723/28 \text{ N.s/m}^2$ ) و در  $334$  متری ( $770/19$ ) 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 انفجارپذیری AC ( $410000 \text{ ppm}$ ) بر اساس زمان میانگین‌گیری  $18/75$  ثانیه در مسافت ۱۵ متری، کرانه پایین ( $60000 \text{ ppm}$ ) در مسافت ۱۳۳ متری نقطه نشست و  $LEL_{frac}$  ( $30000 \text{ ppm}$ ) که به میزان  $50\%$  حد پایین انفجار (LEL) برای اطمینان از پیشگیری و احتمال وقوع حادثه در نظر گرفته می‌شود در فاصله‌ی ۲۰۴ متری از نقطه نشست است. با این حال در شرایط جوی  $D 1/5$  به ترتیب UEL, LEL، و  $LEL_{frac}$  با غلظت‌های فوق در فواصل  $14/8$ ،  $133/8$  و  $199/8$  متری قرار دارند. این بدین معنی است که احتمال وقوع انفجار در فواصلی بیش از مقادیر بیان

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 به اندازه کافی محور نشود (در اطراف آن موانع کافی وجود نداشته باشد)، انفجار آن قدرت کمتری در مقایسه با زمانی که محیط آن محصور باشد، خواهد داشت، چراکه وجود مانع سبب کند شدن و ایجاد آشفستگی 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 محاسبه شده است:

**مخاطرات ضربه و موج انفجار ابر بخار<sup>۶</sup> (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  $0/1$ ،  $0/02$  و  $0/21$  بار به ترتیب باعث آسیب جزئی به ساختمان‌ها تا مسافت ۱۷۹۷ متری (معادل ضربه ناشی از موج فشار  $132/78 \text{ N.s/m}^2$ )، فروریختن بخشی از دیوار و سقف خانه‌ها تا مسافت  $349/33$  متری (معادل ضربه  $670/15 \text{ N.s/m}^2$ ) و کج شدن اسکلت فلزی ساختمان‌ها تا مسافت  $249/723$  متری (معادل ضربه  $934/85 \text{ N.s/m}^2$ ) می‌شود.

**مخاطرات ضربه و موج انفجار ابر بخار (VCE) در دانسیته بالا:** اما در محیط‌های با دانسیته بالا، فشارهای  $0/13$ ،  $0/021$  و  $0/21$  بار منطقه را به ترتیب تا مسافت‌های  $2028$ ،  $403$  و  $283$  متری تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. پس از آن فشار با افزایش مسافت کاهش یافته تا جایی که در فاصله  $3768$  متری آسیب‌های ناشی از ضربه و موج آن به زیر  $0/1$  بار می‌رسد.

**مخاطرات VCE بر حسب فاصله (گرگرفتن):** در منطقه‌ای با دانسیته‌ی پایین از مواد سوختنی، فشار در نقطه‌ی صفر کانون حادثه به  $0/85$  بار (معادل ضربه  $22711/98 \text{ N.s/m}^2$ ) رسیده که در این وضعیت مرگ بر اثر آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مواجهه با آن فشار به ترتیب زیر  $1\%$  و  $25\%$  تا مسافت ۴۰

<sup>۶</sup> Vapor Cloud Explosion



شکل ۴- کنتور نشت CK در میدان اصلی منتهی به نیروگاه و حومه‌ی آن



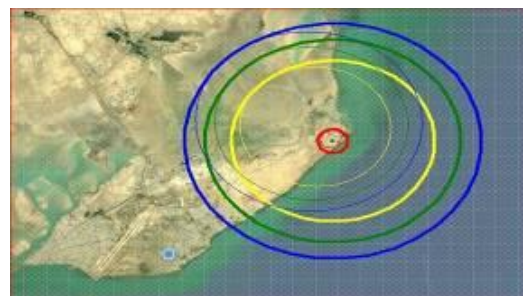
شکل ۵ - فاصله اقدام حفاظتی سیانوزن برومائیید (۹)

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 سیانوزن برومائیید 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 گاز AC 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. در نتیجه 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



شکل ۳- کنتور نشت عمدی AC در مرکز نیروگاه هسته‌ای بوشهر (مساحت منطقه قرمز، زرد و سبز به ترتیب  $7.0072 \times 10^7 + 2.56782 \times 10^7$  و  $5.11642 \times 10^7$  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 قابل قبول (۱۰ و ۲۵ ppm) از مرکز نیروگاه هسته‌ای در پایین‌دست جریان باد قرار دارند.

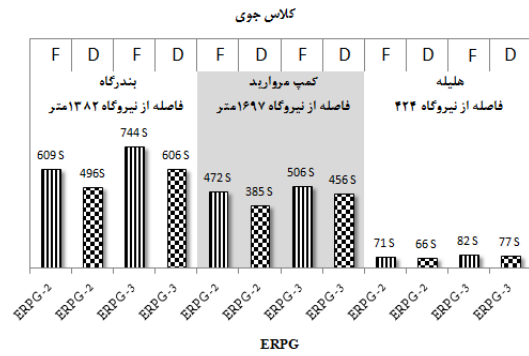
**نتایج مدل‌سازی نحوه انتشار سمیت گاز CK توسط نرم‌افزار ALOHA بر اساس فاصله:** نتایج ارائه شده در شکل ۴ (۲۶)، نشان می‌دهد که CK در منطقه‌ی تهدید نارنجی (۰/۵ ppm) بر اساس ERPG-2 تا بیشتر از ۱۰ کیلومتر و منطقه‌ی تهدید قرمز (۴) بر اساس ERPG-3 به میزان ۷/۸ کیلومتر در جهت باد گسترش خواهند یافت و در کلاس پایدار D منطقه‌ی تهدید نارنجی تا بیشتر از ۱۰ کیلومتر و



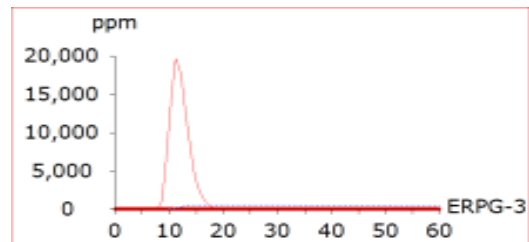
(STEL و IDLH) در فواصل نزدیک به محل ریختن مواد شیمیایی (انفجار بمب حاوی گاز AC) در بازه‌ی زمانی ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ ثانیه ثابت خواهد ماند. با توجه به مدل شدن سناریوی رهایش آنی، ثابت بودن مقادیر غلظت در فواصل زمانی فوق منطقی بوده زیرا حجم زیادی از مواد در مدت زمان کوتاهی به محیط اطرف پخش شده و رقیق شدن آن نیز به آهستگی صورت می‌گیرد.

**مقایسه نتایج انفجار دوتوناسیون و گرگرفتن 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  $154/6 \text{ N.s/m}^2$  معادل  $0/02$  بار کاهش می‌یابد؛ بنابراین در فواصل دور از نیروگاه نیز انفجار دوتوناسیون همچون گرگرفتن به علت کاهش سرعت شعله و تراکم موج، به ساختمان‌ها و افراد آسیب جدی وارد نخواهد کرد.

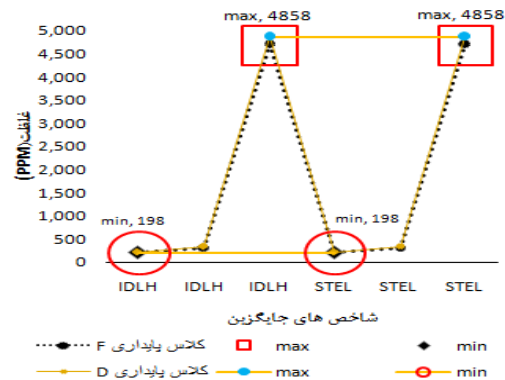
**مقایسه نتایج مدل سازی نحوه انتشار گاز CK و AC بر اساس زمان:** نمودار ۲ و ۳ نشان می‌دهد بیشترین خطر متوجه روستای هلیله است زیرا در فواصل اولیه‌ی ریختن مواد شیمیایی، هر دو نرم‌افزار نتایج نسبتاً نزدیکی را در رسیدن غلظت به حد مواجهه‌ی CK و AC در مدت زمان کوتاهی را گزارش نموده‌اند. با استناد به معیارهای 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 (STEL و IDLH) 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



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



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



نمودار ۴- 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  $19500 \text{ ppm}$  می‌رسد که بالاتر از آستانه مواجهه‌ی  $4 \text{ ppm}$  برای کلرید سیانوزن بر اساس معیار ERPG-3 در مدت زمان یک ساعت است.

**نتایج مدل سازی 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

است.

**مقایسه نتایج به دست آمده توسط نرم افزار ALOHA و PHAST بر اساس معیارهای ارزیابی پیامد اثرات سمی:** نمودار ۲ نشان می دهد در شرایط جوی D/F در غلظت های بالا (ERPG-3) نرم افزار PHAST نتایج نسبتاً نزدیکی ارائه نموده است، در حالی که در غلظت های پایین تر (ERPG-2) با شرایط جوی مشابه ALOHA نیز نتایج کاملاً یکسانی را ارائه می دهد؛ بنابراین از مقایسه نتایج حاصله بر مبنای معیارهای راهنمای طرح ریزی واکنش در شرایط اضطراری مشخص می شود که نرم افزار PHAST در شرایط جوی پایدار (F) و نسبتاً پایدار (D) نتایج دقیق تری را نسبت به ALOHA در مسافت های طولانی تر ارائه می دهد. به عبارات دیگر نرم افزار PHAST در ارائه نتایج در غلظت های کم توانمندی بالاتری نسبت به نرم افزار ALOHA دارد.

**مقایسه WISER با مدل های ALOHA و PHAST بر اساس سرعت محاسبه نتایج:** مدل سازی به کمک نرم افزارهای ALOHA و PHAST مستلزم اطلاعات دقیقی شامل نوع رهایش، دمای محیط، رطوبت، سرعت باد و درجه ی پایداری است. مراحل فوق برای ارزیابی پیامد در مکان هایی که احتمال وقوع حادثه از قبل پیش بینی می شود، 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 فاصله ی حفاظتی یعنی ۳۰ دقیقه اول را پس از انتشار مواد شیمیایی به سرعت و سهولت بر روی دستگاه های تلفن همراه، تبلت ها و پایانه های ارتباطی سیار به صورت آنلاین و آفلاین ارائه می دهد (۹).

### بحث

نتایج حاصل با استفاده از نرم افزار PHAST نشان داد که احتمال بروز تلفات جانی در اثر پدیده های دتوناسیون و گرگرفتن در فواصل دور از کانون انفجار بعید است، اما در فواصلی که مقدار اضافه فشار به حد ۰/۰۲ بار برسد، سازه ها به صورت جزئی تخریب خواهند شد. همچنین در ارائه ی نتایج در غلظت های پایین (ERPG-2)، PHAST نشان داد قابلیت بیشتری نسبت به ALOHA دارد، در حالی که در غلظت های بالا

(ERPG-3) ALOHA بالاترین مسافت خطر را با استفاده از معیارهای ارزیابی 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 دهنده ی سمیت فوق العاده بالای بوده قابل قبول است.

مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات جباری و همکاران (۱۳۹۶) که با استفاده از نرم افزارهای ALOHA و PHAST انجام شده بود، نشان می دهد 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 نظر گرفته شد. در تحقیق جباری از بین مواد مورد بررسی بر اساس ERPG-3 مشخص شد که ALOHA در سه مورد (آمونیاک، بوتادین و بنرن) و PHAST در یک مورد (کلر) بالاترین مسافت خطر را بر اساس بیشترین غلظت از بین شاخص های CEI نشان می دهند.

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

در هر دو مطالعه (ERPG-2) PHAST در غلظت های پایین تر نشان می دهد 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 روش های مختلف مدل سازی را برای رسیدن به نتایج دقیق تر روشن می سازد (۱۴).

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

### نتیجه گیری

نتایج مطالعه حاضر برای انفجار ابر بخار ۱۰ تن AC نشان می‌دهد فاصله ۳۷۶۸ متری 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 تعریف شده برای انفجار AC و قابلیت اشتعال پذیری<sup>۷</sup> حداکثری آن = ۴، که محدوده خطر سناریوهای حوادث مربوط به VCE مواد با حجم و قابلیت اشتعال پذیری کمتر را نیز تحت پوشش قرار می‌دهد) انتشار یافته 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<sup>۸</sup> 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 به‌دست آمده توسط نرم‌افزار PHAST، با استفاده از معیار ERPG-2 که بر اساس عدم ایجاد آسیب جدی یا غیرقابل برگشت 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، مورد توجه قرار گیرد.

این مطالعه به بررسی اثرات سلاح‌های نامتعارف شیمیایی بر اماکن و جمعیت 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. با این وجود بایستی محدودیت‌های مطالعه نیز در نظر گرفته شود.

شیمیایی با استفاده از شاخص CEI در یک صنعت پتروشیمی انجام شده بود نیز نشان داد که در صورت وقوع حوادثی که منجر به رهاش مواد سمی از مخازن شود، کارکنان مستقر در داخل حریم خطر می‌بایست سریعاً تخلیه شده و از آنجا 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 گرفته شده است نیز مشخص گردید که بیشترین خطر متوجه روستای هلیله است زیرا غلظت بعد از ۶۶s بر اساس معیار ERPG-2 به ۱۰ ppm رسیده و عملاً با گذشت 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 شرایط 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 نشستی در دو مطالعه‌ی انجام شده نشان می‌دهد که امکان مقایسه‌ی سایر نتایج با یکدیگر وجود ندارد (۱۵).

<sup>۷</sup> قابلیت اشتعال پذیری مواد از ۰ (مشتعلم نمی‌شود) تا ۴ (بسیار اشتعال پذیر) تقسیم‌بندی می‌شود

<sup>۸</sup> سلاح‌های شیمیایی، بیولوژیکی و هسته‌ای

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. 1<sup>st</sup> ed. Tehran: Fanavar; 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, Kohhpae 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](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:

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 انجام گرفته تا در نهایت برای مقابله با شرایطهای اضطراری محتمل آمادگی‌های لازم را از قبل کسب کنند.

### تقدیر و تشکر

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

### References

- 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]
- 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]
- Fakhraeian H. Chemical Factors. 1<sup>st</sup> ed. Tehran: Imam Hossein; 2003:1-4,151. [Persian]
- Al Gharib MM. Crimes of Chemical Wars. Asgari M A, Translator. Tehran: Holy Defense Studies; 210,123. [Persian]
- Norris G, Fuller Weil. Modern War (Chemical, Biological, and Nuclear Warfare). Minaei ME, Translator. Tehran: Imam Hossein University Press; 2010, 35-36. [Persian]
- Marrs TT, Maynard RL, Sidell F. Chemical Warfare Agents (Toxicology and Treatment). 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2007:709,525.
- 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]
- Moradi Hanifi S, Omid 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]
- WebWISER & WISER Application, Version 4.6 software. Available from: <https://wiser.nlm.nih.gov/>
- Kariznovi H, Farshad A A, Yarahmadi R,

<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.