نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/jwwse.2026.588174.1490

کاربرد نرم افزار ALOHA و MARPLOT در بررسی پارامترهای جوی مؤثر بر نشت گاز کلر ناشی از حوادث در تصفیه‌خانه آب شهید محمدی شهر اهواز

احسان دریکوند[1]، محمدرضا وصالی ناصح[2*]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت، ایمنی و محیط زیست (HSE)، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

[2] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

[*]ایمیل نویسنده مسوول: m-vesalinaseh@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

چکیده:

این پژوهش با هدف بررسی نحوه انتشار گاز کلر و تأثیر پارامترهای جوی و تغییرات قطر نشت ناشی از مخاطرات مخزن یک تنی گاز کلر تحت فشار در تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز، با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و MARPLOT انجام شد. شبیه‌سازی پیامدها برای سناریوهایی با متغیرهای دما شامل ۲۰ و ۴۰ درجه، قطر سوراخ نشت ۲ و ۱۰ میلی‌متر، کلاس‌های پایداری A، D و F و سرعت باد ۲ و ۵ متر بر ثانیه انجام گردید. بیمارستان‌های ابوذر و نفت به‌عنوان نقاط حساس در مسیر باد غالب منطقه انتخاب شدند. نتایج پژوهش نشان داد با افزایش قطر نشت از ۲ به ۱۰ میلی‌متر، شعاع IDLH در کلاس‌های پایداری، ۳ تا ۵ برابر افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باد، شعاع کانتورهای غلظت را ۳۵ تا ۴۵ درصد کاهش و افزایش ۲۰ درجه‌ای دما، شعاع سطوح اثر گاز کلر را ۶ تا ۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین برای حوادث احتمالی با قطر نشتی بیش از ۱۰ میلی‌متر، بیمارستان ابوذر شرایط بحرانی سطح اثر IDLH را برای افراد بیرون از ساختمان تجربه خواهد نمود. نتایج این پژوهش می‌تواند در اجرای برنامه واکنش اضطراری (ERP) برای محیط پیرامون تصفیه‌خانه در راستای کاهش اثرات پیامدهای انتشار گاز سمی کلر حائز اهمیت باشد.

کلمات کلیدی: گاز کلر، ALOHA، پارامترهای جوی، MARPLOT، تصفیه‌خانه آب اهواز

Application of ALOHA and MARPLOT Software in Investigating Meteorological Parameters Affecting Chlorine Gas Leakage from Accidental Releases at Shahid Mohammadi Water Treatment Plant, Ahvaz

Ehsan Derikvand[1], Mohammadreza Vesali Naseh[2*]

[1] Ms. Student in HSE Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

[2] Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
[*]Corresponding author email: m-vesalinaseh@araku.ac.ir

Received: 18/07/2026
Revised: 08/10/2026
Accepted: 27/10/2026

Abstract
This study aimed to investigate the influence of meteorological parameters alongside leak diameter variations on chlorine gas dispersion at Shahid Mohammadi Water Treatment Plant in Ahvaz, using ALOHA and MARPLOT software. In this research, consequence modeling of a one-ton pressurized chlorine gas container was performed for scenarios involving temperatures of 20°C and 40°C, leak orifice diameters of 2 mm and 10 mm, atmospheric stability classes A, D, and F, and wind speeds of 2 and 5 m/s. Aboozar and Naft hospitals were selected as sensitive receptors along the prevailing wind direction. The results showed that increasing the leak diameter from 2 to 10 mm increased the IDLH radius by 3 to 5 times across stability classes. Increasing wind speed reduced the concentration contour radii by 35% to 45%, while a 20°C temperature rise increased the dispersion radius of chlorine effect levels by 6% to 7%. The results indicated that for potential incidents with leak diameters exceeding 10 mm, Aboozar Hospital would experience critical IDLH conditions for individuals outdoors. The findings of this study can be instrumental in implementing Emergency Response Plans (ERP) for the surroundings of water treatment plants to mitigate the adverse effects of toxic chlorine gas dispersion.

Keywords: Chlorine Gas, ALOHA, Meteorological Parameters, MARPLOT, Ahvaz Water Treatment Plant

۱- مقدمه

کلر (Cl_2) به عنوان یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین گندزداها در فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب در سطح جهان شناخته می‌شود (Sullivan and Krieger, 2020). این ماده با چگالی حدود ۲٫۵ برابر هوا، در صورت انتشار در محیط، به دلیل سنگین‌تر بودن از هوا در لایه‌های نزدیک به سطح زمین تجمع یافته و فرصت فرار را از افراد سلب می‌کند (White and Martin, 2019) . با این‌حال، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این ترکیب نظیر واکنش‌پذیری بالا با بافت‌های بیولوژیک و حلالیت محدود در آب، آن را به یکی از خطرناک‌ترین مواد شیمیایی مورد استفاده در تأسیسات آب و فاضلاب تبدیل کرده است(Achanta and Jordt, 2021) . آمارهای بین‌المللی حاکی از آن است که در چهار دهه اخیر، نزدیک به بیست حادثه قابل توجه نشت کلر در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب سراسر جهان رخ داده است (CCPS[1], 2018) .

بررسی دقیق پارامترهای موثر بر انتشار گاز کلر از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهشی با استفاده از روش FMEA به ارزیابی ریسک واحدهای کلرزنی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب پرداختند و مهم‌ترین ریسک‌ها را در بخش‌های الکتریکی و حمل‌ونقل گاز کلر شناسایی کردند (محسن‌زاده و همکاران،۱۴۰۰). نتایج تحقیق دیگر نشان داد که برنامه جایگزین نمودن سایر روش‌های ضدعفونی مانند الکترودیالیز می‌تواند از خطرات سیلندرهای گاز کلر جلوگیری کند (ابوطالبی شکور و جمشیدی، ۱۳۹۶). بررسی سوابق تاریخی این حوادث نشان می‌دهد که مهم‌ترین علل وقوع این سوانح، فرسودگی تجهیزات، نقص در اتصالات جوشی و خطای انسانی بوده است (Lees, 2017) . این فرآیند طی چند ثانیه منجر به آسیب شدید، ادم ریوی و نهایتاً نارسایی حاد تنفسی می‌گردد (Mannan, 2021).

حد مجاز مواجهه شغلی با کلر در استانداردهای NIOSH و OSHA برابر ۱ ppm (میانگین وزنی-زمانی ۸ ساعته) تعیین شده است، در حالی که غلظت ۱۰ ppm به عنوان آستانه خطر فوری برای زندگی و سلامت (IDLH[2]) در نظر گرفته می‌شود (NIOSH[3], 2018). بر اساس استانداردهای AEGL[4] تدوین شده توسط آکادمی ملی علوم آمریکا، مقادیر AEGL-1 (تحریک خفیف), AEGL-2 (آسیب جدی و برگشت‌ناپذیر) و AEGL-3 (تهدیدکننده زندگی) برای گاز کلر در زمان مواجهه ۳۰ دقیقه به ترتیب برابر ۰/۵، ۲/۸ و ۲۸ pپpmتعریف شده است(National Research Council, 2004) (جدول ۱).

جدول ۱: آستانه‌های AEGL گاز کلر بر حسب مدت زمان مواجهه (National Research Council, 2004)

سطح	تعریف	دقیقه ۱۰	دقیقه ۳۰	دقیقه ۶۰	ساعت ۴	ساعت ۸
AEGL-1(ppm)	تحریک خفیف و گذرا، بدون اثر ناتوان‌کننده	۰/۵۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
AEGL-2(ppm)	اثرات جدی و غیرقابل‌برگشت یا ناتوان‌کننده در فرار	۲/۸	۲/۸	۲	۱	۰/۷۱
AEGL-3(ppm)	تهدیدکننده حیات یا مرگ	۵۰	۲۸	۲۰	۱۰	۱/۷
IDLH(ppm)	بلافاصله خطرناک برای حیات و سلامتی	-	۱۰	-	-	-

رفتار ابر گاز کلر در فضای باز و فاصله انتشار آن تا آستانه‌های خطر، به شدت تحت تأثیر پارامترهای جوی قرار دارد (Crowl and Louvar, 2019). سرعت باد به عنوان یکی از مؤثرترین عوامل، مستقیماً بر نرخ رقیق‌سازی ابرگاز تأثیر می‌گذارد. در سرعت‌های پایین باد (کمتر از ۲ متر بر ثانیه)، تلاطم مکانیکی کاهش یافته و ابر گاز کلر به دلیل چگالی بیشتر از هوا، در لایه سطحی محبوس شده و تا فواصل دورتر گسترش می‌یابد (Hanna and Chang, 2008) . در مقابل، افزایش سرعت باد منجر به افزایش نرخ اختلاط با هوای محیط و کاهش فاصله انتشار می‌گردد (Gant et al., 2018) . کلاس پایداری جو (بر اساس طبقه‌بندی پاسکوئیل) نیز تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر الگوی پراکندگی دارد . در شرایط جو پایدار (کلاسF) ، اختلاط عمودی به حداقل می‌رسد و ابر در یک نوار باریک و طولانی در جهت باد حرکت می‌کند. مطالعات تجربی پروژه Jack Rabbit II که بزرگترین مجموعه آزمایش‌های رهایش کنترل‌شده

کلر در جهان است، به وضوح نشان داده است که در شرایط جوی پایدار(کلاسF)، ابر کلر تا فواصل بیش از ۱۱ کیلومتر گسترش می‌یابد (D'Ignazio, 2024). دمای محیط تأثیر دوگانه بر رفتار ابر کلر دارد. از یک سو، افزایش دما باعث کاهش چگالی گاز کلر و افزایش شناوری مثبت می‌شود که منجر به صعود ابر به ارتفاعات بالاتر و کاهش غلظت در سطح زمین می‌گردد (EPA[5], 2015).

در شرایط رطوبت بسیار بالا، مکانیسم شستشوی تر می‌تواند به طور فیزیکی کلر را از هوا حذف کند (Lacome et al., 2019). ناهمواری سطح زمین یکی دیگر از پارامترهای مهم در مدل سازی انتشار گازهای سمی است که در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته می‌شود (Mukherjee and Chakraborty, 2006). افزایش زبری سطح (نظیر وجود ساختمان‌ها، درختان و توپوگرافی ناهموار) باعث افزایش تلاطم مکانیکی و در نتیجه افزایش نرخ اختلاط عمودی و کاهش فاصله انتشار می‌گردد(Oke, 2020). در مقابل، سطوح صاف و هموار (مانند زمین‌های مسطح و بدون مانع) حداقل تلاطم را ایجاد کرده و بدترین سناریو از نظر حداکثر فاصله انتشار را رقم می‌زنند (Witlox et al., 2018).

تصفیه‌خانه آب شهید محمدی شهر اهواز یا تصفیه‌خانه شماره یک، به‌عنوان قدیمی‌ترین و مهم‌ترین تصفیه‌خانه آب شرب این کلان‌شهر، نقشی کلیدی در تأمین آب آشامیدنی جمعیت شهری شمال شرق را ایفا می‌کند. این تصفیه‌خانه تا کنون چندین مرتبه نوسازی، بازسازی و ارتقاء ظرفیت در آن صورت گرفته است. فرآیند تصفیه در این واحد بر اساس تصفیه متعارف شامل اختلاط سریع، لخته‌سازی، ته‌نشینی، فیلتراسیون و کلرزنی نهایی می‌باشد. با تولید روزانه ۱۴۰ هزار مترمکعب آب شرب به عنوان یکی از تأسیسات زیربنایی تأمین آب شرب شهر اهواز، با استفاده از مخازن گاز کلر تحت فشار یک تُنی، فرآیند گندزدایی را انجام می‌دهد. موقعیت مکانی این تصفیه‌خانه در مجاورت مناطق مسکونی و با توجه به شرایط اقلیمی خاص اهواز (دمای بالای ۴۵ درجه در تابستان، رطوبت نسبی پایین، و الگوهای باد خاص منطقه جنوب غرب ایران)، ضرورت ارزیابی دقیق پیامدهای سناریوهای محتمل نشت کلر را دوچندان می‌کند (شمیزاده و همکاران ۱۳۹۷).

علیرغم مطالعات متعدد در زمینه مدل‌سازی انتشار کلر در تأسیسات مختلف کشور (حسینی ۱۳۹۵؛ شمیزاده و همکاران۱۳۹۷ ؛ کریمی و همکاران ۱۴۰۰) شکاف تحقیقاتی مشخصی در زمینه بررسی همزمان و سیستماتیک تأثیر چهار پارامتر جوی (دما، رطوبت، سرعت باد و ناهمواری سطح) بر فواصل انتشار کلر در تصفیه‌خانه‌های آب اهواز وجود دارد. پژوهش حاضر در نظر دارد با استفاده از قابلیت‌های مدل‌سازی نرم‌افزارهای ALOHA[6] (نسخه ۵,۴,۷) و MARPLOT[7] یک چارچوب تحلیلی برای تعیین فواصل خطر در شرایط مختلف جوی و توپوگرافی ارائه نماید. نتایج این پژوهش می‌تواند مستقیماً در بازنگری برنامه مدیریت بحران تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز، جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص گاز کلر، و تعیین محدوده تخلیه برای سطوح مختلف هشدار مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از ترکیب دو نرم‌افزار ALOHA و MARPLOT برای شبیه‌سازی انتشار گاز کلر و تعیین پهنه‌های خطر استفاده گردید. ALOHA یک نرم‌افزار مدل‌سازی انتشار مواد شیمیایی است که توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا و اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA[8])توسعه یافته، و در مطالعات ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی پاسخ به شرایط اضطراری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ilić et al., 2018). MARPLOT نیز به عنوان نرم‌افزار نقشه‌برداری مکمل ALOHA، برای ترسیم پهنه‌های خطر روی نقشه‌های واقعی و تعیین مسیرهای تخلیه استفاده می‌شود (Wang et al., 2025). مطالعه حاضر بر پایه ارزیابی پیامد (Consequence Assessment) استوار است و احتمال وقوع یا فراوانی سناریوهای نشت به‌صورت کمی برآورد نمی‌شود. بنابراین نتایج ارائه شده معرف ارزیابی پیامد بوده و با ارزیابی ریسک (که مستلزم برآورد احتمال وقوع است) متفاوت می‌باشد.

تصفیه‌خانه آب شهید محمدی شهر اهواز در استان خوزستان، در مجاورت رودخانه کارون واقع شده است. این تصفیه‌خانه با استفاده از مخازن گاز کلر تحت فشار یک تُنی، فرآیند گندزدایی آب را انجام می‌دهد. از مهم‌ترین حوادث در تصفیه‌خانه‌های آب، نشت گاز کلر از مخازن و تجهیزات می‌باشد. پیامدهای این رویداد می‌تواند اثرات نامطلوب بر محیط پیرامون تصفیه‌خانه داشته باشد. در راوند پژوهش مختصات جغرافیایی تصفیه‌خانه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth Pro (نسخه ۷,۳) برداشت گردید. فاصله تصفیه‌خانه تا نزدیک‌ترین مناطق مسکونی و بیمارستان‌های اطراف با استفاده از ابزار اندازه‌گیری فاصله در Google Earth Pro تعیین شد.



شکل ۱: تصویر ماهواره ایی موقعیت تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز و اماکن حساس پیرامون در سال ۱۳۹۴

در این پژوهش بیمارستان تخصصی ابوذر و بیمارستان نفت شهر اهواز که در مسیر غالب جهت وزش باد شمال غربی به جنوب شرقی بودند انتخاب شدند. این دو بیمارستان به ترتیب ۱۵۰۰ و ۲۷۰۰ متری از تصفیه‌خانه آب شهید محمدی قرار دارند همچنین فاصله تصفیه‌خانه تا نزدیکترین اماکن مسکونی اطراف کمتر از ۳۰۰ متر بود. شکل (۱)

در این پژوهش پارامترهای موثر محیطی همچون درجه حرارت، سرعت باد، میزان رطوبت و کلاس پایداری هوا به عنوان‌متغیرهای تاثیر گذار بر شعاع کانتورها، در سناریوهای نشت گاز سمی کلر بررسی شدند. تغییرات این پارامترها از سایت هواشناسی شهر اهواز برای سال ۱۴۰۴ استخراج گردید. تحقیق میدانی روی مخزن یک تنی کلر تحت فشار برای دمای ۲۰، و ۴۰ درجه سانتی گراد(به عنوان‌میانگین دمایی ۴ فصل سال به صورت ۲ فصل اول سال و دو فصل دوم سال) که برای همه سناریوها ثابت و به عنوان منبع نشت در نظر گرفته شد. قطر سوراخ نشت با مقادیر ۲و۱۰ میلی‌متر تعریف گردید. هر چند تحقیقات گذشته نشان از بررسی قطر نشتی‌های مویی (کمتر از یک میلی‌متر) تا ۵۰ میلی‌متر (معادل گسست ناگهانی) را نیز گزارش نموده‌اند. پس از آنالیز حساسیت مقادیر رطوبت، نتایج نشان داد این فاکتور تاثیری بر روی تغییرات شعاع کانتورهای غلظت ندارد، لذا جهت پارامترهای جوی بدون سطوح مقادیر رطوبت ، مجموعاً ۲۴ سناریو شامل سه سطح اثر در ALOHA شبیه‌سازی گردید. سناریوها، متغیرهای مورد بررسی و مقادیر آنها مشخص شدند. (جدول‌های ۲ تا ۴)

جدول ۲: طبقه‌بندی کلاس‌های پایداری جو (پاسکوئیل، ۱۹۶۱)

کلاس پایداری	نام	شرایط جوی	توضیحات
A	Very Unstable	بسیار ناپایدار	تابش شدید خورشید، همرفت قوی، پراکندگی سریع و عمودی آلودگی
B	Moderately Unstable	نسبتاً ناپایدار	تابش متوسط خورشید، پخش نسبتاً سریع
C	Slightly Unstable	کمی ناپایدار	تابش ضعیف خورشید یا هوای ابری، پخش متوسط
D	Neutral	خنثی	هوای ابری (روز یا شب) یا باد شدید، پخش معمولی
E	Slightly Stable	کمی پایدار	شب با پوشش ابر ۵۰-۹۰٪، پخش افقی محدود
F	Moderately Stable	نسبتاً پایدار	شب صاف (ابر کمتر از ۵۰٪)، کمترین میزان پخش عمودی

جدول ۳: متغیرهای مستقل تاثیرگذار در میزان انتشار گاز کلر از تصفیه‌خانه آب شهید محمدی شهر اهواز در سال ۱۳۹۴

پارامتر	مقادیر	واحد	توضیحات
کلاس پایداری جو	A, D, F	-	سه کلاس (ناپایدار، خنثی، پایدار)
سرعت باد	۲، ۵	m/s	باد کم، متوسط و نسبتاً شدید
رطوبت نسبی	۳۰، ۵۰، ۸۰	%	خشک، متوسط، مرطوب
دمای هوا	۲۰، ۴۰	°C	خنک، معتدل، گرم (تابستان اهواز)
قطر سوراخ نشت	۲، ۱۰	mm	نشت کوچک، متوسط و بزرگ

جدول۴: فهرست ۲۴ سناریوی شبیه‌سازی‌شده خروجی نرم افزار ALOHA برای مقادیر فواصل AEGL-۲، AEGL-۱ و IDLH پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴

سناریو	کلاس پایداری	قطر نشتی (mm)	سرعت باد (m/s)	دما (C°)	AEGL-۱(m)	AEGL-۲(m)	IDLH(m)
۱	A	۲	۲	۲۰	۱۴۰۰	۶۷۱	۲۹۰
۲	A	۲	۵	۲۰	۸۵۳	۴۱۳	۱۷۸
۳	A	۱۰	۲	۲۰	۵۱۰۰	۳۱۰۰	۱۵۰۰
۴	A	۱۰	۵	۲۰	۴۴۰۰	۲۲۰۰	۹۵۴
۵	A	۲	۲	۴۰	۱۵۰۰	۷۲۲	۳۱۲
۶	A	۲	۵	۴۰	۱۰۰۰	۴۹۲	۲۱۲
۷	A	۱۰	۲	۴۰	۵۲۰۰	۳۲۰۰	۱۶۰۰
۸	A	۱۰	۵	۴۰	۵۰۰۰	۲۶۰۰	۱۱۰۰
۹	D	۲	۲	۲۰	۲۸۰۰	۱۳۰۰	۵۵۹
۱۰	D	۲	۵	۲۰	۱۷۰۰	۸۳۲	۳۵۵
۱۱	D	۱۰	۲	۲۰	۷۶۰۰	۴۵۰۰	۲۳۰۰
۱۲	D	۱۰	۵	۲۰	۸۰۰۰	۴۳۰۰	۱۹۰۰
۱۳	D	۲	۲	۴۰	۳۳۰۰	۱۶۰۰	۶۶۶
۱۴	D	۲	۵	۴۰	۲۱۰۰	۹۹۴	۴۲۵
۱۵	D	۱۰	۲	۴۰	۷۸۰۰	۴۶۰۰	۲۴۰۰
۱۶	D	۱۰	۵	۴۰	۸۴۰۰	۴۸۰۰	۲۲۰۰
۱۷	F	۲	۲	۲۰	۴۹۰۰	۲۳۰۰	۸۲۷
۱۸	F	۲	۵	۲۰	۳۱۰۰	۱۵۰۰	۶۲۷
۱۹	F	۱۰	۲	۲۰	۹۳۰۰	۵۰۵۰	۲۵۰۰
۲۰	F	۱۰	۵	۲۰	بیش از ۱۰۰۰۰	۷۰۰۰	۳۲۰۰
۲۱	F	۲	۲	۴۰	۵۸۰۰	۲۷۰۰	۹۷۰
۲۲	F	۲	۵	۴۰	۳۷۰۰	۱۸۰۰	۷۵۲
۲۳	F	۱۰	۲	۴۰	۹۴۰۰	۵۱۰۰	۲۵۵۰
۲۴	F	۱۰	۵	۴۰	بیش از ۱۰۰۰۰	۷۴۰۰	۳۶۰۰

در این پژوهش ترکیبی از سه سطح اثر مورد بررسی قرار گرفت. پیامدهای مواجهه گاز کلر برای افراد در مناطق سطوح اثر مشخص شدند. این سطوح اثرکمتر از مقادیر قابلیت شناسایی گاز کلر به صورت چشمی در هوا بوده لذا می‌تواند میزان کشف را کمتر نموده و پیامدهای در معرض قرارگرفتن را افزایش دهد. میزان قابل رویت گاز کلر به صورت چشمی در هوا غلظت‌های بیش از ۲۵ ppm می‌باشد (جدول۵).

جدول ۵: سطوح غلظت گاز کلر و پیامدهای مواجهه مورد بررسی در پژوهش(NIOSH, 2018; EPA, 2015)

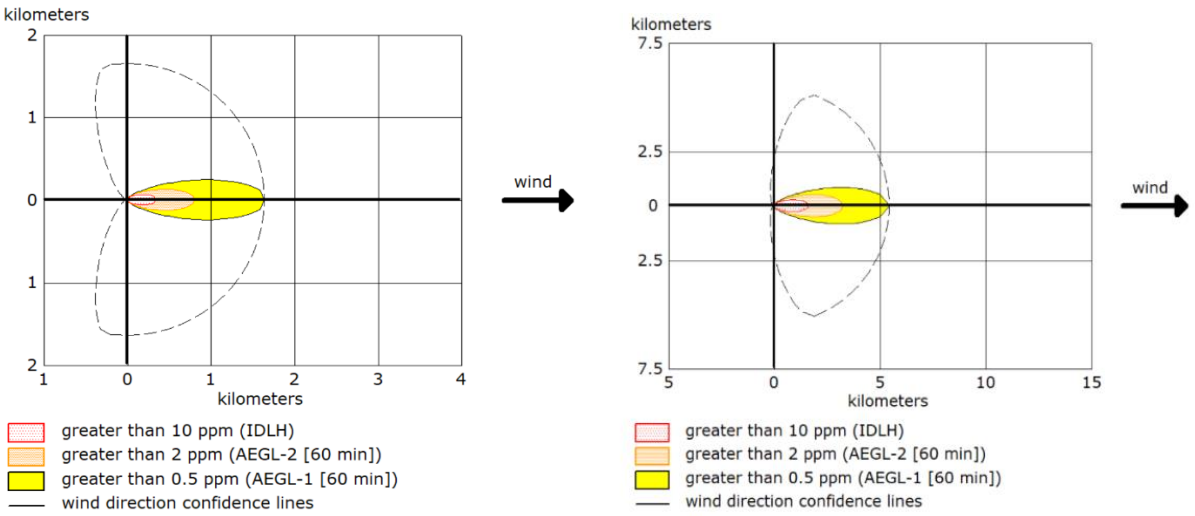
سطح	نام	آستانه غلظت(ppm)	رنگ در نقشه ALOHA	پیامد برای انسان	اقدام لازم
۱	AEGL-1	۰/۵	زرد	سوزش چشم و گلو، بوی قابل تشخیص، ناراحتی جزئی	اطلاع‌رسانی، آماده باش
۲	AEGL-2	۲	نارنجی	اختلالات جدی تنفسی، ناتوانی در تخلیه	تخلیه فوری مناطق داخل قطاع
۳	IDLH	۱۰	قرمز	خطر فوری برای زندگی(NIOSH)	ورود فقط با SCBA[9]، ماسک مستقل

۳- نتایج و بحث

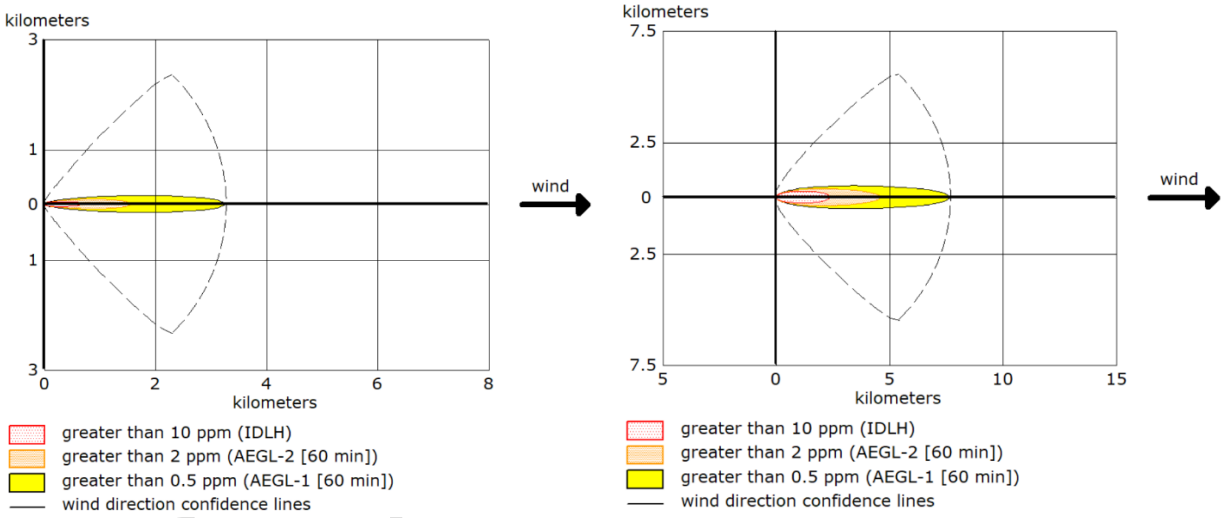
۳-۱ تاثیر قطر نشتی

بارگذاری متغیرها در مدل ALOHA برای سناریوهای مورد بررسی انجام گردید. نتایج خروجی نشان داد، تغییر قطر نشتی از ۲ به ۱۰ میلی‌متر شعاع پراکنش برای همه سطوح اثر غلظت ابر کلر در کلاس‌های پایداری A,D و F افزایش قابل‌توجهی نشان داد. ۳ تا ۵ برابر شدن شعاع سطوح اثر گاز کلر با تغییر ۵ برابر شدن قطر نشتی می‌تواند اثرات نامطلوب برگشت ناپذیر، برای افراد در منطقه تحت تاثیر ایجاد نماید.(شکل‌های ۱ تا ۳). یافته‌های این تحقیق با نتایج گزارش (Patil et al., 2023) که اعلام نمودند، افزایش اندازه نشتی به‌طور مستقیم غلظت و گستره ابر خطرناک را افزایش می‌دهد همراستا می‌باشد.

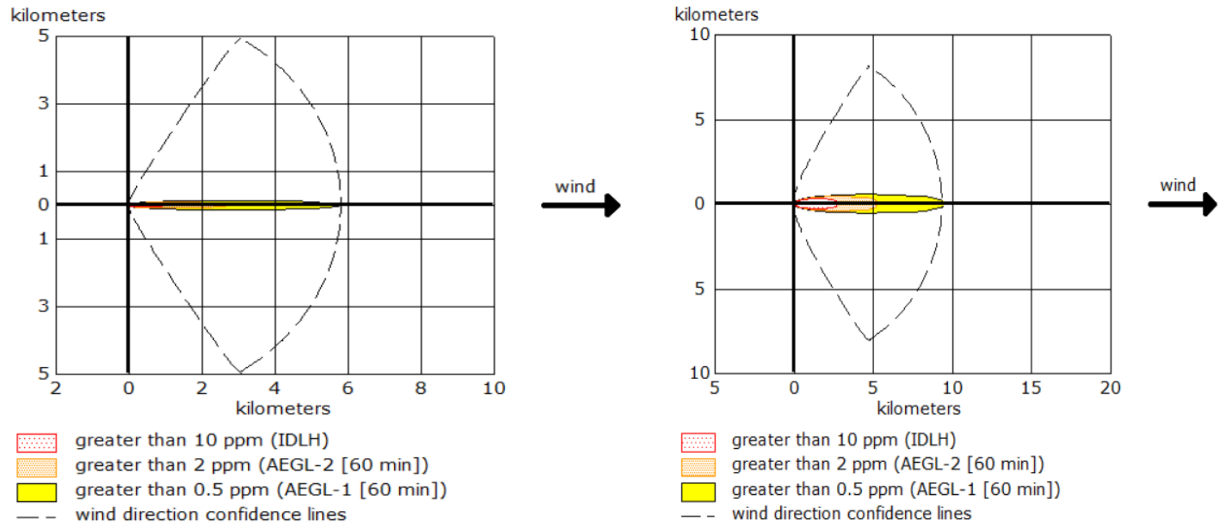
پذیرفته شده / ویرایش نشده



شکل ۱: خروجی نرم افزار ALOHA برای کانتورهای غلظت کلاس پایداری A ، تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴ (تصویر سمت چپ نشتی با قطر ۲ میلی‌متر (سناریو ۵)، تصویر سمت راست نشتی با قطر ۱۰ میلی‌متر (سناریو ۷))

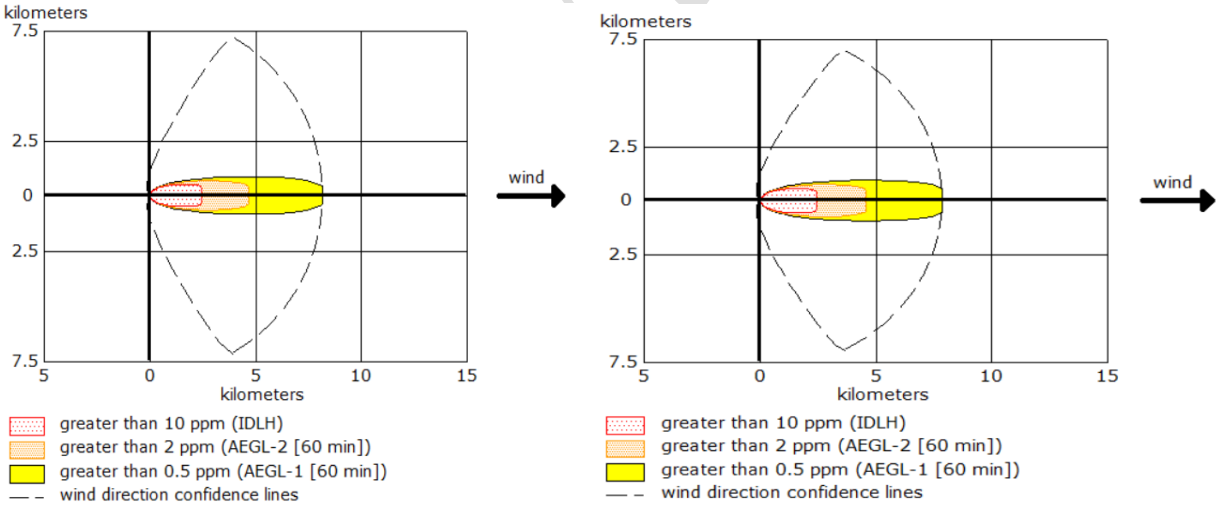


شکل ۲: خروجی نرم افزار ALOHA برای کانتورهای غلظت کلاس پایداری D ، تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴ (تصویر سمت چپ نشتی با ۲ قطر میلی‌متر(سناریو۱۳)، تصویر سمت راست نشتی با قطر ۱۰ میلی‌متر(سناریو ۱۵)



شکل ۳: خروجی نرم افزار ALOHA برای کانتورهای غلظت کلاس پایداری F، تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴ (تصویر سمت چپ نشتی با قطر ۲ میلی‌متر (سناریو۲۱)، تصویر سمت راست نشتی با قطر ۱۰ میلی‌متر (سناریو۲۳))

به جهت مشخص نمودن اثرات تغییر قطر نشتی سناریوهای مرتبط با شرایط بحرانی‌تر(کلاس پایداری F) با قطر نشتی‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.



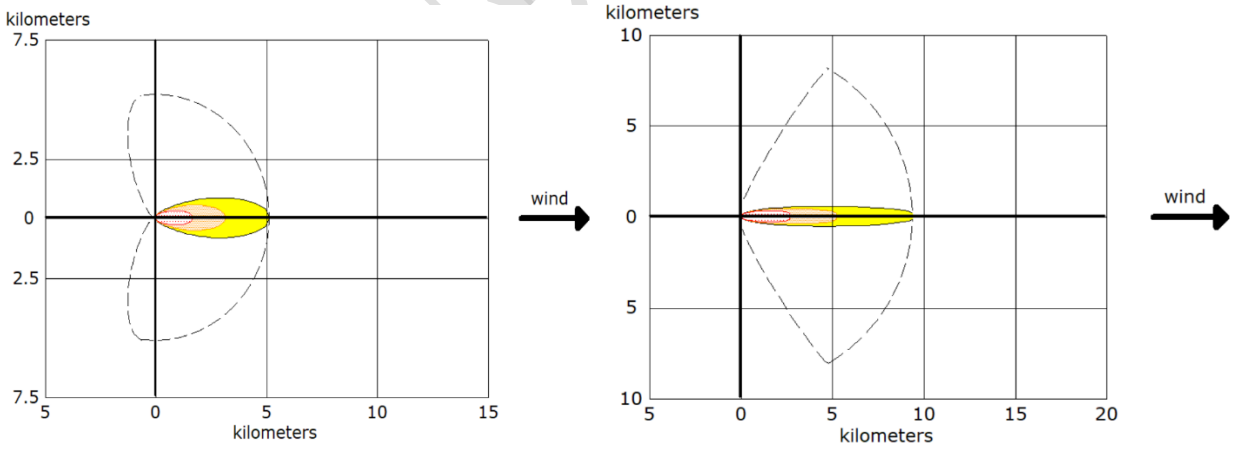
شکل۴: خروجی نرم افزار ALOHA برای کانتورهای غلظت کلاس پایداری F، تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴(تصویر سمت چپ نشتی با قطر ۲۰ میلی‌متر، تصویر سمت راست نشتی با قطر ۵۰ میلی‌متر)

نتایج خروجی نرم افزار برای این تغییر قطر نشان از ثابت بودن فواصل سطوح اثر را داشت که می‌توان اظهار داشت که برای نشتی‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر تغییرات محسوسی در فواصل سطوح اثر مشاهده نمی‌شود. هر چند تصاویر خروجی نشان از عریض شدن سطوح اثر نسبت به نشتی ۱۰ میلی‌متر را دارند، اما در نشتی‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر بیشترین فاصله سطوح اثر ۸۰۰۰ متر برآورد گردیده

که نسبت به نشتی با قطر ۱۰ میلی‌متر برابر ۹۴۰۰ متر کمتر می‌باشند. لذا می‌توان با احتیاط بیشتر برای برنامه‌ریزی‌ها در مواقع بحران نشت کلر از تصفیه‌خانه‌های آب، سناریو قطر نشتی ۱۰ میلی‌متر مورد استفاده واقع شود. هر چند نتایج خروجی برای قطر نشتی‌های بیشتر محیط پیرامون را با پهنه بیشتری تحت تاثیر قرار خواهد داد، لذا برای مشخص‌نمودن مکان‌های امن اطراف تصفیه‌خانه ضریب اطمینان بیشتری خواهند داشت (شکل۴).

۳-۲ تاثیر کلاس پایداری جو

کلاس پایداری جوی (طبقه‌بندی پاسکوئیل، شش‌رده A تا F) میزان آشفتگی مکانیکی و حرارتی جو را توصیف می‌کند. در شرایط پایدار (کلاس F)، وارونگی دمایی و سرکوب آشفتگی باعث می‌شود پلوم گاز کلر که چگالی بیشتر از هوا دارد و ذاتاً گرایش به تجمع نزدیک سطح زمین دارد به‌صورت باریک و متمرکز باقی بماند و غلظت خطرناک را تا فواصل دورتری حفظ کند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شعاع کانتورهای غلظت در شرایط جو پایدار، باریکتر بوده و فاصله‌های بیشتری را طی می‌کنند. شرایط کلاس پایداری برای نتایج این پژوهش می‌تواند A<D<F نمایش داده شوند. در کلاس پایداری F زمانی که سرعت بیشتر می‌شود شعاع کانتورها افزایش یافته، می‌تواند ناشی از ناسازگاری فیزیکی این ترکیب با تعریف کلاس پایداری F باشد، چرا که این کلاس معمولاً با سرعت باد پایین همراه است. لذا سناریوهای با جو پایدار و سرعت باد بالا صرفاً برای پوشش کامل فضای سناریوها لحاظ می‌شود و این محدودیت مدل می‌بایست مد نظر قرار گیرد. نتایج این پژوهش با نتایج تحقیق جهانگیری و همکاران (۱۳۸۹) که اعلام نمودند کلاس پایدار جو می‌تواند فواصل بیشتری را آلوده نماید همخوانی دارد (شکل۵).



شکل ۵ : خروجی نرم افزار ALOHA تحت اثر کلاس پایداری جوی بر گستره پیامد نشت گاز کلر از تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴ (تصویر سمت چپ سناریو۷، تصویر سمت راست سناریو ۲۱)

۳-۳ تاثیر سرعت باد

سرعت باد از پارامترهای تاثیرگذار بر انتشار ابر گاز کلر می‌باشد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تغییر سرعت باد از ۲ به ۵ متر بر ثانیه (۷,۶ تا ۱۸ کیلومتر بر ساعت) سبب اختلاط بیشتر هوا با گاز سمی منتشر شده گردیده و سطوح غلظت کاهش می‌یابند. تغییر سرعت باد، همراه با افزایش ناپایداری جوی، کاهش بیشتر شعاع کانتورهای غلظت را سبب گردید. کاهش ۴۵ درصدی شعاع غلظت‌ها در کلاس پایداری A با تغییر سرعت باد از ۲ به ۵ متر برثانیه (مقادیر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، سایت هواشناسی شهر اهواز سال ۱۴۰۴) حاصل گردید. این کاهش شعاع تاثیرگذاری برای کلاس‌های پایداری D و F تا ۳۵ درصد برآورد گردید. (جدول ۶) بر اساس نتایج مدل‌سازی، افزایش سرعت باد از ۲ به ۵ متر بر ثانیه که به صورت دستی به مدل اضافه می‌شوند، باعث کاهش محسوس (۳۵ تا ۴۵ درصدی) در شعاع کانتورهای غلظت گردید. این موضوع نشان‌دهنده نقش حیاتی سرعت باد در رقیق‌سازی ابر گاز سمی است. نتایج یک پژوهش، سرعت باد را به عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مدل‌سازی انتشار کلر با ALOHA معرفی کرده است که با یافته‌های پژوهش حاضر همسو است (Hassan et al., 2024).

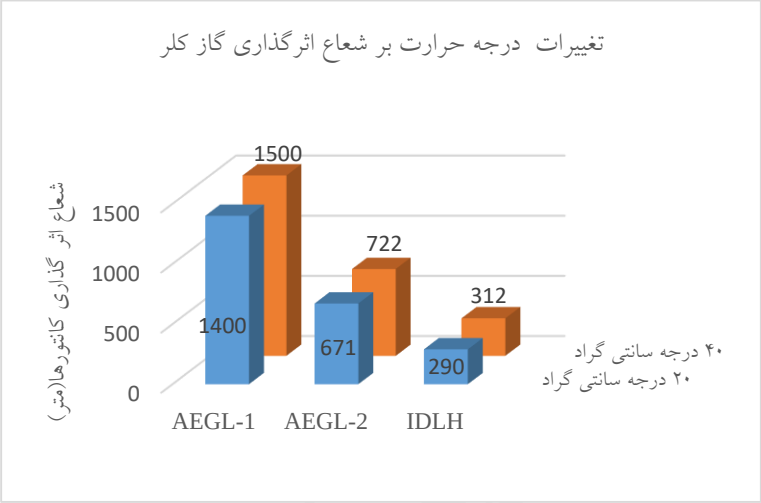
جدول ۶: نتایج خروجی نرم افزار ALOHA سناریوهای نشت گاز کلر از تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز برای سطوح مختلف غلظت (AEGL-1، AEGL-2 و IDLH) با تغییرات سرعت باد در سال ۱۳۹۴

سناریو	کلاس پایداری	قطر نشتی(mm)	سرعت باد(m/s)	درجه حرارت(C^0)	AEGL-1(m)	AEGL-2(m)	IDLH(m)
۱	A	۲	۲	۲۰	۱۴۰۰	۶۷۱	۲۹۰
۲	A	۲	۵	۲۰	۸۵۳	۴۱۳	۱۷۸
۳	D	۲	۲	۲۰	۲۸۰۰	۱۳۰۰	۵۵۹
۴	D	۲	۵	۲۰	۱۷۰۰	۸۳۲	۳۵۵
۵	F	۲	۲	۲۰	۴۹۰۰	۲۳۰۰	۸۲۷
۶	F	۲	۵	۲۰	۳۱۰۰	۱۵۰۰	۶۲۷

۴-۳ تاثیر درجه حرارت

تغییرات درجه حرارت نیز از عوامل تاثیرگذار بر شعاع کانتورهای غلظت انتشار کلر می‌باشند. نتایج افزایش درجه حرارت(مستخرج از سایت هواشناسی شهر اهواز سال ۱۴۰۴) به مقدار ۲۰ درجه سانتی گراد، ۶ درصد افزایش شعاع کانتورها را حاصل نمود. این نتایج نشان داد که حوادث احتمالی در فصول گرم سال می‌توانند مناطق بیشتری را آلوده نمایند. (شکل ۶)

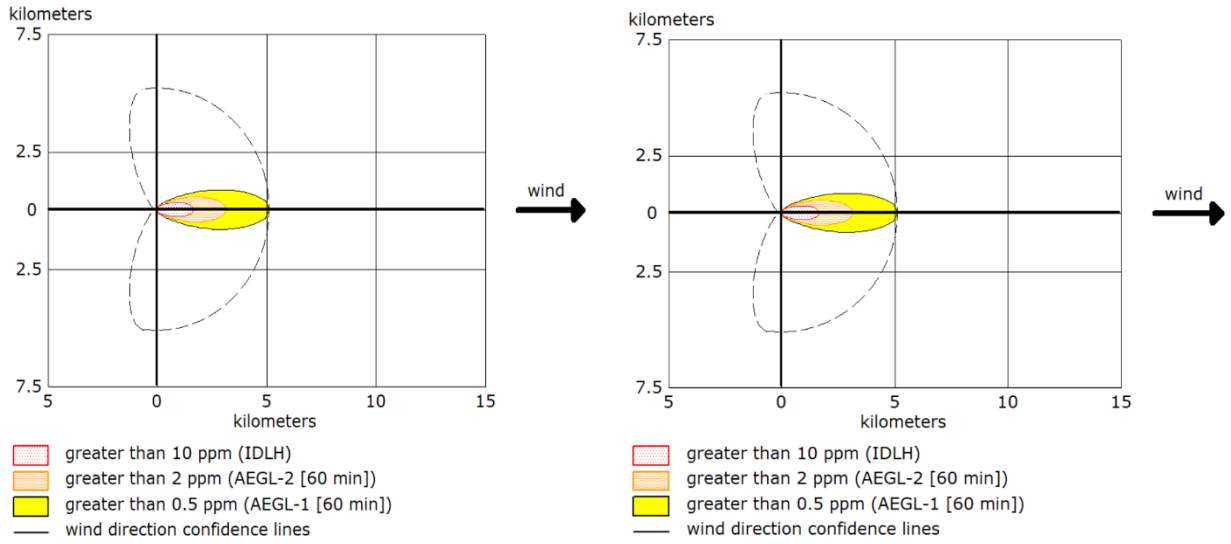
این نتیجه با رویکرد استانداردهای معتبر مانند راهنمای (NOAA,2023) که استفاده از بالاترین دمای ثبت‌شده را برای تحلیل بدترین سناریو توصیه می‌کند، همسو است، اگرچه برخی مطالعات تأثیر دمای محیط را بر غلظت در فضای باز ناچیز گزارش کرده‌اند ، اما در شبیه‌سازی نشت مایع تحت فشار، افزایش دما می‌تواند با افزایش نرخ تبخیر، دبی خروجی را بالا ببرد (Hassan et al., 2024) .



شکل۶: نمودار سطوح غلظت در مقابل تغییرات درجه حرارت محیط شهر اهواز در سال ۱۳۹۴

۳-۵ تاثیر رطوبت محیط

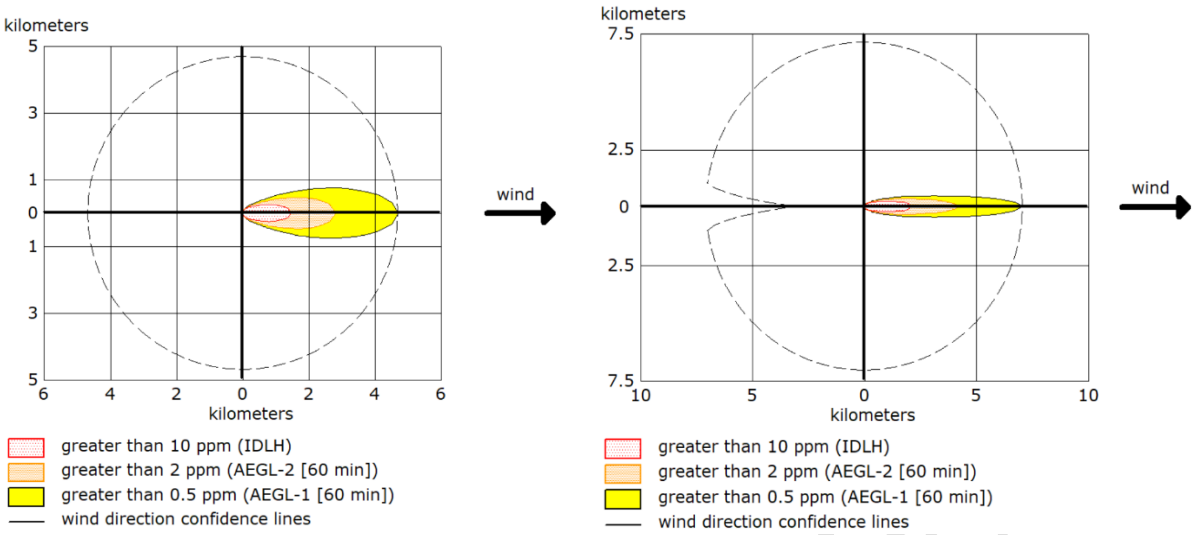
نتایج تحقیق نشان داد که تغییرات رطوبت (افزایش یا کاهش) تأثیر محسوسی بر شعاع کانتورهای غلظت گاز کلر نداشت. هر چند افزایش رطوبت در فواصل کم احتمال تشکیل اسید کلرید را افزایش داده و پیامدهای نامطلوب برای پرسنل در محیط تصفیه‌خانه‌ها شدیدتر خواهد نمود (شکل۶). این یافته با نتایج مطالعه (Chen and Zhao, 2016) همخوانی داشته که با استفاده از نرم‌افزار ALOHA به بررسی تأثیر پارامترهای هواشناسی بر انتشار کلر پرداخته و گزارش کرده‌اند که در شرایط شبیه‌سازی، سرعت باد و پایداری جو عوامل اصلی تأثیرگذار هستند، دما در رتبه بعدی قرار داشته و رطوبت تقریباً هیچ تأثیری بر انتشار کلر ندارد.



شکل ۷: خروجی های نرم افزار ALOHA ،کانتورهای غلظت تحت تاثیر تغییرات رطوبت هوا پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴برای سناریو۷ (تصویر سمت چپ رطوبت ۵۰ درصد، تصویر سمت راست رطوبت ۸۰ درصد)

۳-۶ تاثیر سطح ناهمواری

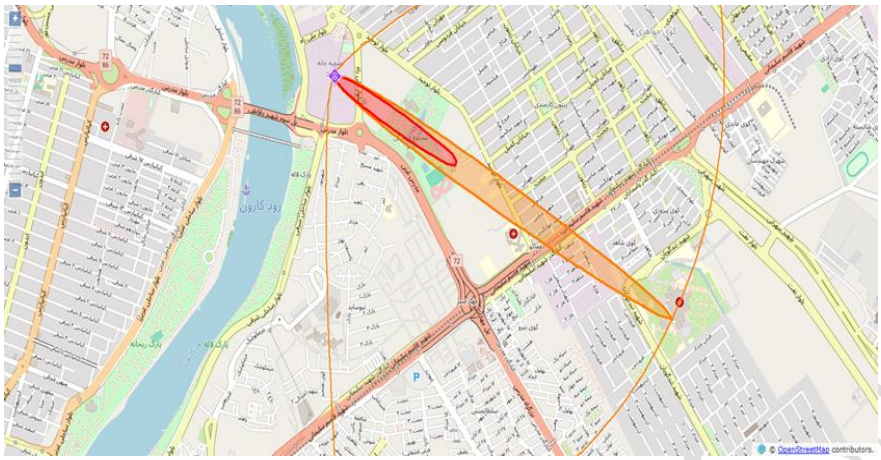
در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر ناهمواری سطح بر الگوی پخش گاز کلر و در نتیجه بر فواصل تهدید دو سناریوی مختلف ناهمواری در نرم افزار ALOHA تعریف و تحلیل شد. Open Country (زمین باز و مسطح) و Urban or Forest (مناطق شهری با ساختمان، پوشش جنگلی متراکم). این سناریوها بر نرخ تلاطم و رقیق شدگی ابر گاز تاثیر می‌گذارند. الگوی بدبینانه زمین باز و مسطح که اطراف تصفیه‌خانه آب شهید محمدی به فاصله ۲۵۰ متر می‌باشد، در ۲۴ سناریو لحاظ گردید (جدول ۴). برای سناریوهای ۷ و ۱۵ الگوی اطراف تصفیه‌خانه به صورت مناطق شهری با ساختمان‌های بلند شبیه‌سازی شد. (Oke, 2020; Witlox et al., 2018) گزارش کردند که افزایش زبری سطح زمین باعث افزایش تلاطم مکانیکی و در نتیجه کاهش شعاع کانتورهای غلظت گازهای سنگین می‌شود. در این پژوهش نیز افزایش ناهمواری سطح زمین در مناطق با زبری زیاد، موجب کاهش حدود ۱۰ درصدی شعاع کانتورها گردیده، که با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد.



شکل۸: خروجی های نرم افزار ALOHA،کانتورهای غلظت تحت تاثیر تغییرات سطح ناهمواری محیط اطراف تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز در سال ۱۳۹۴ در حالت urban or Forest (تصویر سمت چپ سناریو شماره ۷، تصویر سمت راست سناریو شماره ۱۵)

۳-۷ پیامدهای نشت براماکن پیرامون تصفیه‌خانه آب

پیامدهای ناشی از حوادث نشت گاز کلر در تصفیه‌خانه‌های آب می‌تواند مناطق اطراف را آلوده نماید. برخی از این اماکن همانند بیمارستان‌ها، جزء مناطق حساس بوده و الزامی است که در بررسی سناریوهای احتمالی نشت گاز سمی کلر مورد توجه قرار گیرند. در این تحقیق ملاحظه گردید که بیمارستان ابوذر و بیمارستان نفت اهواز در مسیر باد غالب شمال غربی به جنوب شرقی قرار دارند (استخراج از سایت هواشناسی شهر اهواز ۱۴۰۴). خروجی‌های نرم افزار MARPLOT بر روی نقشه‌های مناطق اطراف تصفیه‌خانه نشان داد که در سناریوهای با نشتی ۲ میلی‌متر کانتور سطح غلظت IDLH بیمارستان‌های ابوذر و نفت را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. در بیشترین مقدار این سطح غلظت، با فاصله ۸۲۷ متر برای جو پایدار (کلاس F) برآورد گردیده که تا فاصله ۱۵۰۰ متری نزدیک‌ترین بیمارستان یعنی ابوذر فاصله زیادی وجود دارد. برای سناریوهای با نشتی کمتر از ۲ میلی‌متر می‌توان گفت که بیمارستان‌های هدف این تحقیق دارای شرایط نسبی مناسبی می‌باشند. یافته‌ای که با نتایج مطالعات پیشین مبنی بر تأثیر نشت کلر بر مراکز حساس پیرامون تصفیه‌خانه‌های آب هم‌خوانی دارد (Wang et al., 2025) .



شکل۹: خروجی نرم افزار MARPLOT محیط پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز برای سناریو با قطر نشتی ۲ میلی‌متر و کلاس پایداری F نسبت به بیمارستان‌های هدف (ابوذر و نفت) در سال ۱۳۹۴

اما برای افزایش قطر نشتی از ۵ میلی‌متر به بالا شرایط ابر کلر برای سطح خطرناک IDLH در سناریوهای بدبینانه (جو پایدار و سرعت باد کم) باعث تحت تاثیر قرار دادن بیمارستان ابوذر گردید (شکل ۱۰).

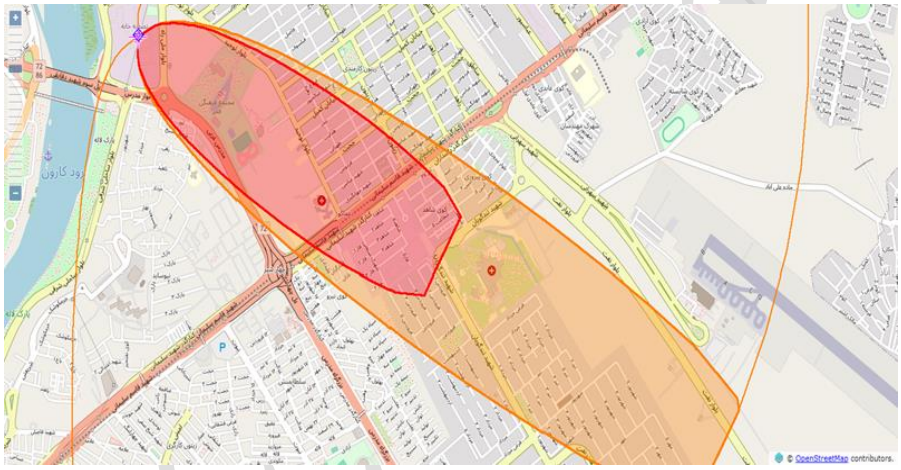


شکل۱۰: خروجی نرم افزار MARPLOT محیط پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز برای سناریو با قطر نشتی ۵ میلی‌متر و کلاس پایداری F نسبت به بیمارستان‌های هدف (ابوذر و نفت) در سال ۱۳۹۴

در سناریوهای با قطر نشتی بیشتر از ۵ میلی‌متر شرایط انتشار گاز کلر به حالت بحرانی می رسد، تا جایی که در قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری شعاع‌های تاثیرگذاری ابر کلر بر محیط پیرامون به‌حالت اشباع درآمده و تفاوت چندانی در فواصل خروجی‌های مدل مشاهده نمی‌شود. به علت تخلیه سریع کلر در این سناریوها در هر نوع کلاس پایداری بیشترین شعاع اثرگذاری مشاهده می‌گردد (شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل۱۰: خروجی نرم افزار MARPLOT محیط پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز برای سناریو با قطر نشتی ۱۰میلی‌متر و کلاس پایداری F نسبت به بیمارستان‌های هدف (ابوذر و نفت) در سال ۱۳۹۴



شکل ۱۱: خروجی نرم افزار MARPLOT محیط پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی اهواز برای سناریو با قطر نشتی ۲۰میلی‌متر و کلاس پایداری F نسبت به بیمارستان‌های هدف (ابوذر و نفت) در سال ۱۳۹۴

نتایج مدل‌سازی حاصل نشتی‌های با قطر بیش از ۱۰ میلی‌متر شبیه خروجی‌های مدل به هنگام تخریب کامل بوده و می‌تواند این نتایج جایگزین شرایطی همچون حملات جنگی احتمالی به تاسیسات تصفیه‌خانه‌ها در نظر گرفته شود. تفاوت در این سناریوها را می‌توان در پهنای ابرکلر برای افزایش قطر نشتی‌ها مشاهده نمود. هر چند فواصل حرکت ابر کلر در همه سناریوهای بالاتر از قطر نشتی ۱۰ میلی‌متر مشابه هم می‌باشند. پیشنهاد شده است که برای معادل‌سازی با تخریب سیستم کلرزنی قطر سوراخ ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود (شکل۱۲).



شکل۱۲: خروجی نرم افزار MARPLOT با قطر نشتی ۵۰ میلی‌متر و کلاس پایداری F نسبت به بیمارستان‌های هدف (ابوذر و نفت)

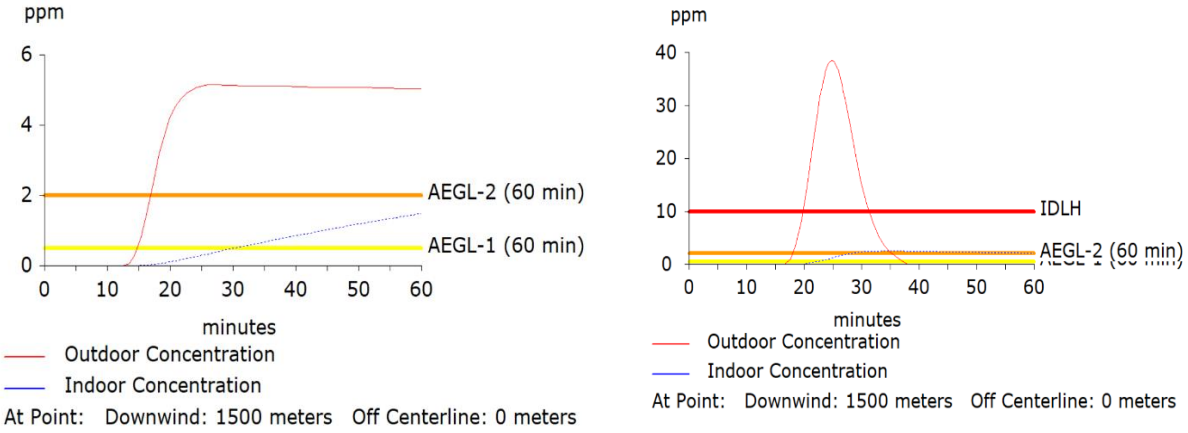
بر اساس خروجی سناریو بدبینانه در این تحقیق، نشت احتمالی به قطر ۱۰ میلی‌متر و کلاس پایداری F با سرعت باد حداقل فواصل تحت تاثیر سطوح AEGL-2 و IDLH می توانند به ترتیب تا بیش از ۵۰۰۰ و ۲۵۰۰ متر گسترش یابند. این شعاع تاثیر گذاری در جهت باد غالب مناطق اطراف بویژه بیمارستان‌ها، مدارس، اماکن مسکونی و اداری، راه‌های ارتباطی برون‌شهری، فرودگاه بین‌المللی شهر اهواز، تحت تاثیر قرار داده که خود نیازمند برنامه ریزی و آمادگی در سطح بالا برای واکنش‌های اضطراری ERP را ایجاد می‌کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه (Zainulabidin et al., 2025) که در شرایط کلاس F ، گستره خطر IDLH را تا حدود ۲۹۰۰ متر گزارش کردند، همخوانی دارد. همچنین، تأثیر بسزای جو پایدار(کلاس F) بر پخش گازهای سنگین در داده‌های پروژه معتبر Jack Rabbit II, 2024) نیز به اثبات رسیده است.

۳-۸ غلظت کلر درون و بیرون ساختمانها در شعاع سطوح تاثیر

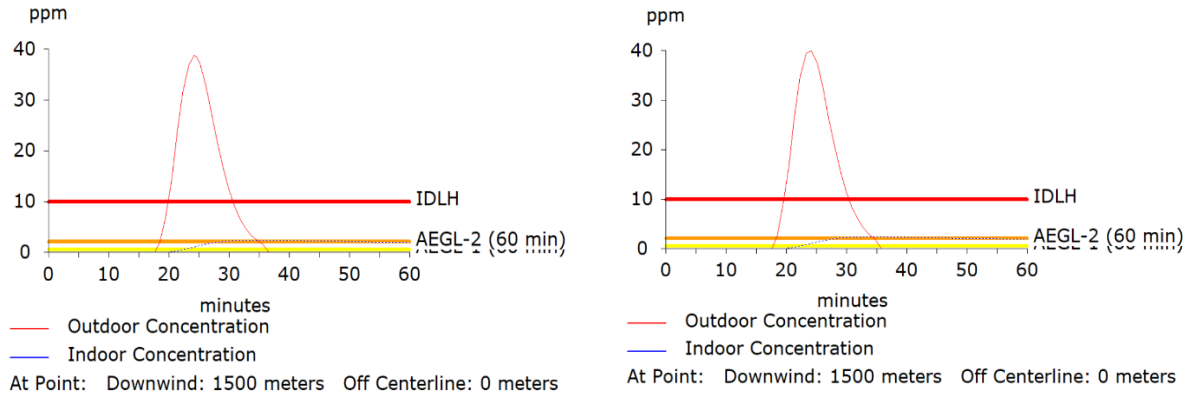
از دیگر نتایج این پژوهش مقایسه غلظت سطوح کلر، درون و بیرون ساختمان‌ها بود. نقاط مورد بررسی در این تحقیق بیمارستان‌های ابوذر و نفت در مسیر باد غالب منطقه تحت سناریو نشت‌های احتمالی بودند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که غلظت گاز کلر در محیط بیرون، به مراتب بیشتر از درون ساختمان‌ها می‌باشد. با توجه به عدم جابجایی افراد در مکان‌هایی همچون بیمارستان‌ها می‌توان شرایط حفاظتی و نظارت بر تهویه ساختمان این بیمارستان‌ها از وقوع حوادث نامطوب احتمالی پیشگیری نمود. نتایج شبیه‌سازی نشان می دهد که افراد درون و بیرون از ساختمان بیمارستان ابوذر با فاصله ۱۵۰۰ متری از تصفیه‌خانه آب می توانند تحت تاثیر سناریوهای بحرانی(قطر نشتی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر و جو پایدار) در معرض آسیب‌های برگشت ناپذیر سطح IDLH قرار گیرند. با توجه به زمان رسیدن ابر گاز کلر به فاصله ۱۵۰۰ متری، غلظت گاز سمی برای مدت زمان تماس نمایش داده می شود. در سناریو با قطر نشتی ۲ میلی‌متر نتایج شبیه‌سازی نشان می دهد که از زمان ۱۵ دقیقه بعد از رهایش تا ۶۰ دقیقه زمان نهایی

مدل‌سازی بیمارستان ابوذر تحت تاثیر سطوح غلظت AEGL-1 و AEGL-2 قرار میگیرد. در سناریوهای با قطر نشتی بیش از ۱۰ میلی‌متر غلظت تاثیر گذار گاز کلر برای بیمارستان ابوذر به بیش از سطح اثر IDLH خواهد رسید. این میزان غلظت در خروجی مدل به صورت قله غلظت گاز کلر با زمان تماس در نقطه مورد بررسی نمایش داده می شود. خط آبی در نتایج مدل‌سازی نشان از روند تغییرات غلظت گاز کلر در درون ساختمان می باشد در صورتی افراد در درون ساختمان مستقر باشند احتمال بروز خطرات کاهش چشمگیری خواهد داشت. برای سناریوهای بدبینانه افراد در بیرون از ساختمان بیمارستان ابوذر در معرض غلظت گاز سمی کلر تا ۴۰ ppm می توانند قرار گیرند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که غلظت کلر در داخل ساختمان‌ها به‌مراتب کمتر از فضای باز است و ساختمان‌ها به‌عنوان یک عامل محافظتی عمل می کنند.(Dillon & Sextro, 2019)

شکل(۱۳ و ۱۴)

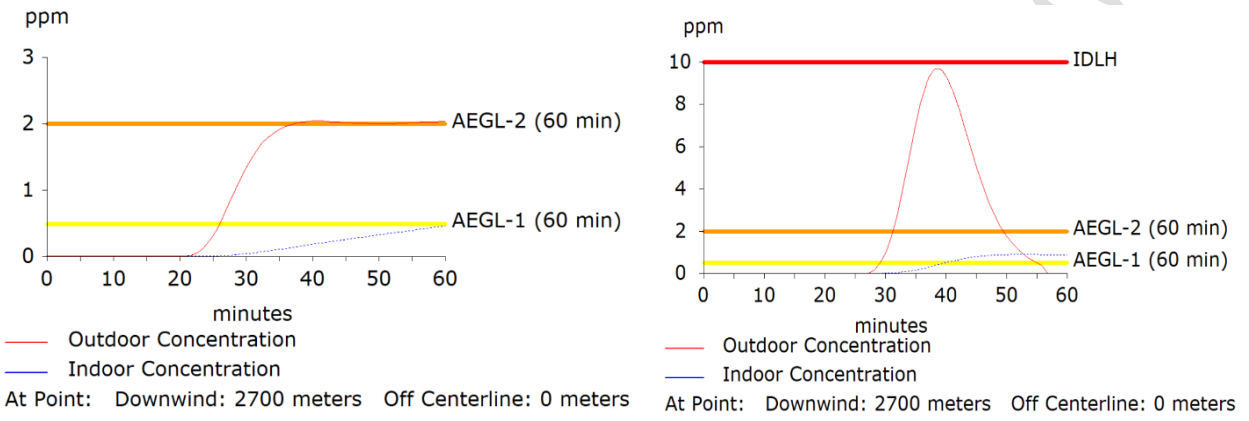


شکل۱۳: ارزیابی بیمارستان ابوذر تحت تاثیر سطوح غلظت ابر کلر (تصویر سمت چپ سناریو با قطر نشتی ۲ میلی‌متر ، تصویر سمت راست سناریو با قطر نشتی ۱۰ میلی‌متر)

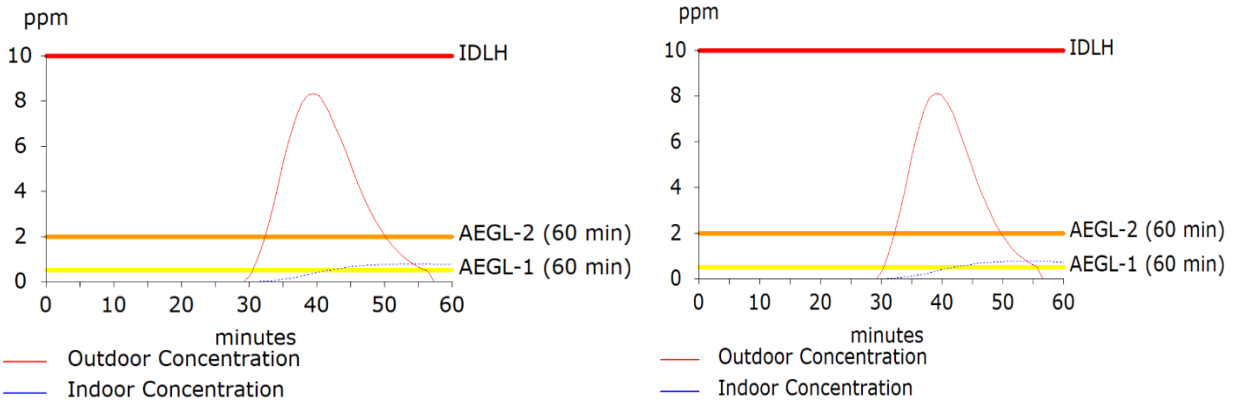


شکل۱۴: ارزیابی بیمارستان ابوذر تحت تاثیر سطوح غلظت ابر کلر (تصویر سمت چپ سناریو با قطر نشتی ۲۰ میلی‌متر ، تصویر سمت راست سناریو با قطر نشتی ۵۰ میلی‌متر)

در خصوص بیمارستان نفت با توجه به فاصله ۲۷۰۰ متری از تصفیه‌خانه نتایج شبیه‌سازی نشان داد، در صورتی افراد در درون ساختمان‌ها مستقر باشند احتمال بروز اثرات نامطلوب کاهش می‌یابد. در همه سناریوها بیمارستان تحت تاثیر سطح غلظت AEGL-2 قرار می گیرد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که غلظت گاز سمی در درون ساختمان‌ها در این فاصله همواره کمتر از سطح اثر AEGL-1 می باشد. با این حال این برآوردها بر پایه مفروضات عمومی نرم‌افزار ALOHA برای شرایط داخل ساختمان بوده و نیازمند تأیید با مشخصات واقعی تهویه بیمارستان خواهد بود.



شکل۱۵: ارزیابی بیمارستان نفت تحت تاثیر سطوح غلظت ابر کلر (تصویر سمت چپ سناریو با قطر نشتی ۲ میلی‌متر ، تصویر سمت راست سناریو با قطر نشتی ۱۰ میلی‌متر)



شکل۱۶: ارزیابی بیمارستان نفت تحت تاثیر سطوح غلظت ابر کلر (تصویر سمت چپ سناریو با قطر نشتی ۲۰ میلی‌متر ، تصویر سمت راست سناریو با قطر نشتی ۵۰ میلی‌متر)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم افزارهای ALOHA و MARPLOT به شبیه‌سازی سناریوهای احتمالی نشت گاز کلر از مخازن یک تنی تحت فشار در تصفیه‌خانه آب شهید محمدی شهر اهواز پرداخته شد. فاکتورهای تاثیر گذار در ایجاد سطوح اثر غلظت‌های گاز سمی کلر در ۲۴ سناریو کلی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش قطر نشت از ۲ به ۱۰ میلی‌متر شعاع سطوح اثر ۳ تا ۵ برابر گسترش یافتند. با افزایش قطر نشتی به بیش از ۱۰ میلی‌متر تاثیر محسوس در فواصل سطوح غلظت‌ها مشاهده نشد. نتایج نشان داد که سناریوهای با نشتی ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر محیط پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی را با عرض بیشتری(قطاع تاثیر) در معرض آلودگی قرار دادند. تغییرات قطر نشتی به عنوان‌حساس‌ترین متغیر اثر گذار بر سطوح غلظت گاز کلر شناخته شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شعاع کانتورهای غلظت در شرایط جو پایدار، بارکتر و فاصله‌های بیشتری را طی می کنند. شرایط کلاس پایداری برای نتایج این پژوهش به صورت A<D<F حاصل شد. شعاع سطوح تاثیر در کلاس جوی F ، ۲ برابر نسبت به پایداری جو در کلاس A افزایش یافتند. متغیرکلاس پایداری مهم‌ترین فاکتور محیطی در مدل‌سازی سناریوها شناخته شد. در روند تحقیق به بررسی تغییرات سرعت باد پرداخته شد. سرعت باد از پارامترهای تاثیرگذار بر انتشار ابر گاز کلر می باشد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تغییر سرعت باد از ۲ به ۵ متر بر ثانیه (۷,۶ تا ۱۸ کیلومتر بر ساعت)سبب اختلاط بیشتر هوا با گاز سمی منتشر شده گردیده و سطوح غلظت کاهش می یابند. تغییر سرعت باد، همراه با افزایش ناپایداری جوی ،کاهش بیشتر شعاع کانتورهای غلظت را سبب گردید. سرعت باد باعث کاهش محسوس (۳۵ تا ۴۵ درصدی) در شعاع کانتورهای غلظت گردید. این موضوع نشان‌دهنده نقش حیاتی سرعت باد در رقیق‌سازی ابر گاز سمی کلر است.

تاثیرات درجه حرارت محیط از عوامل مورد بررسی بر شعاع کانتورهای غلظت انتشار گاز کلر بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش درجه حرارت(مستخرج از سایت هواشناسی شهر اهواز سال ۱۴۰۴) به مقدار ۲۰ درجه سانتی گراد، ۶ درصد شعاع کانتورهای غلظت را بیشتر می کند. این نتایج نشان داد که حوادث احتمالی در فصول گرم سال می توانند مناطق بیشتری را آلوده نمایند.

همچنین نتایج تحقیق نشان داد که تغییرات رطوبت(افزایش یا کاهش) تأثیر محسوسی بر شعاع کانتورهای غلظت گاز کلر ندارد. هر چند افزایش رطوبت در فواصل کم احتمال تشکیل اسید کلرید را افزایش داده و پیامدهای نامطلوب را برای پرسنل در محیط تصفیه‌خانه‌ها شدیدتر خواهد نمود.

تاثیر ناهمواری‌های سطح در دو سناریو Open Cuntry(سناریو بدبینانه به صورت زبری حداقل محیطی) و Urban or Forest(محیط پیرامون با زبری زیاد) صورت پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شعاع کانتورهای غلظت در محیط پیرامون با زبری زیاد ۱۰ درصد کاهش داشتند.

پیامدهای نشت براماکن حساس پیرامون تصفیه‌خانه آب شهید محمدی برای دو نقطه هدف، بیمارستان‌های ابوذر(با فاصله ۱۵۰۰ متری از منبع نشت) و نفت(با فاصله ۲۷۰۰ متری از منبع نشت) در مسیر باد غالب منطقه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد حوادث احتمالی با قطر نشتی بیش از ۱۰ میلی‌متر، بیمارستان ابوذر شرایط بحرانی سطح اثر IDLH را برای افراد بیرون از ساختمان‌ها تجربه خواهد نمود . مقادیر گاز کلر در این فاصله ۴۰ ppm تخمین زده شد. نتایج شبیه‌سازی برای بیمارستان نفت گذر از سطح اثر IDLH را تایید نکرد. مقدار گاز کلر در این نقطه حداکثر ۸ ppm برآورد گردید.

نتایج تکمیلی این پژوهش می تواند بخشی از برنامه گسترده ERP برای محیط پیرامون تصفیه‌خانه در راستای کاهش اثرات پیامدهای انتشار گاز سمی باشند.

۵- پی نوشت‌ها:

1-Center for Chemical Process Safety
2-Immediately Dangerous to Life or Health
3-National Institute for Occupational Safety and Health
4-Acute Exposure Guideline Level
5-Environmental Protection Agency
6- Areal Locations of Hazardous Atmospheres
7-Mapping Application for Response, Planning, and Local Operational Tasks
8- National Oceanic and Atmospheric Administration
9-Self-Contained Breathing Apparatus

۶- سپاسگزاری:

ضمن سپاس فراوان از همه کسانی که در این تحقیق همراهی نمودند. این پژوهش مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست(HSE) دانشگاه اراک می باشد.

۷- اظهارنامه نحوه استفاده از هوش مصنوعی

در فرآیند نگارش این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی فقط در راستای تصحیح متن و نگارش استفاده شده و به هیچ عنوان در تولید داده و شکل و نمودار یا گراف استفاده نشده است. محتوا، تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری نهایی به‌طور کامل توسط نویسندگان بازبینی و تأیید شده و مسئولیت نهایی آن بر عهده نویسندگان است.

پذیرفته شده / ویرایش نشده

۸- مراجع

ابوطالبی شکور، ا.، و جمشیدی، ح.، (۱۳۹۶)، "استفاده از بررسی فنی و مالی و روش AHP برای یافتن بهترین روش گندزدایی بر پایه کلر"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۲)، ۴۷-۴۱ https://doi.org/10.22112/jwwse.2018.88015.1015 .

جهانگیری، م.، و پارساراد، ع.، (۱۳۸۹)، "تعیین حریم خطر رهایش مواد شیمیایی با استفاده از شاخص مواجهه شیمیایی (CEI) در یک صنعت پتروشیمی"، مجله سلامت کار ایران، ۷(۳)، ۱۰-۱.

حسینی، س.ح. (۱۳۹۵)" ارزیابی و مدل‌سازی انتشار گاز کلر در منطقه شهری (مطالعه موردی: تأمین آب شهر ایوان)"، مجله پژوهش‌های پایه در علوم پزشکی ایران،(۳)۳، ۱۴-۷ https://doi.org/10.29252/jbrms.3.3.15 .

شمیزاده، ح.، علی‌نژاد شهابی، ر.، و ارجمند، م. (۱۳۹۷)، "مدل‌سازی پخش گاز کلر در تصفیه‌خانه آب تهران با استفاده از "PHAST، مجله خطرات شیمیایی و سلامت، ۸(۲)، ۱۳۹-۱۲۷.https://doi.org/10.22034/jchr.2018.544205

کریمی، ا.، زارعی، ا.، و قاسم‌زاده، ر. (۱۴۰۰) "ارزیابی کمی ریسک مخازن گاز کلر در تصفیه‌خانه‌های آب با استفاده از نرم‌افزار "PHAST، مجله سلامت و محیط زیست ایران، ۱۳(۲)، ۲۳۰-۲۱۵ https://doi.org/10.22041/ijhe.2020.123456

محسن‌زاده هدشی، حانیه؛ رزم‌آرا، حسام؛ دشتی، علی؛ روستا، هادی؛ نخعی، هادی؛ توکلی امینیان، ثمانه؛ روح‌بخش، مسعود؛ و فضائلی ترابی، علی. (۱۳۹۹). ارزیابی ریسک در واحدهای کلرزنی تصفیه آب و فاضلاب به روش FMEA. علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۵(۴)، ۴۰-۳۱. DOI: 10.22112/jwwse.2020.221545.1193

Achanta, S. and Jordt, S.E., (2021), "Toxic effects of chlorine gas and potential treatments: A literature review", Toxicology Mechanisms and Methods, 31(4), 244-256. https://doi.org/10.1080/15376516.2021.1883190

CCPS, (2018), Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.

Chen, H.Y. and Zhao, X.J., (2016), "Study on the influences of meteorological conditions on the liquid chlorine leakage and diffusion based on ALOHA software", Coal and Chemical Industry, 39(3), 147-150.

Crowl, D.A. and Louvar, J.F., (2019), Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 4th ed., Pearson.

D'Ignazio, M., (2024), "CFD analysis of chlorine dispersion in an urban area: a comparative study with Jack Rabbit II test data", MSc. Thesis, Politecnico di Milano..

Dillon, M.B. and Sextro, R.G., (2019), "Illustration of key considerations determining hazardous indoor inhalation exposures", Report No. LLNL-TR-771864, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA. https://doi.org/10.2172/1569185

EPA, (2015), Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.

Gant, S., Weil, J., Delle Monache, L., McKenna, B., Garcia, M.M., Tickle, G. and Wardman, M., (2018), "Dense gas dispersion model development and testing for the Jack Rabbit II phase 1 chlorine release experiments", Atmospheric Environment, 192, 218-240. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.016

Hanna, S.R. and Chang, J.C., (2008), "Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents", Process Safety Progress, 27(3), 248-259. https://doi.org/10.1002/prs.10264

Hassan, O., Khan, Z.A., Irfan, M. and Rashid, M.I., (2024), "Beyond ALOHA: Quickly predict accidental release of toxic chemicals using machine learning", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 94, 105542. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105542

Lacome, J.M., Penelon, T., Leroy, G. and Truchot, B., (2019), "Adaptation of three atmospheric dispersion models for Jack Rabbit II case study and comparisons with observations", Proceeding 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO 19).

Lees, F.P., (2017), Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control, 2nd ed., Elsevier.

Mannan, S., (2021), Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control, 2nd ed., Elsevier.

Mukherjee, P. and Chakraborty, S., (2006), "Influence of wind speed profile and roughness parameters on the downwind extension of vulnerable zones during dispersion of toxic dense gases", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(5), 478-480. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.11.002

National Research Council (US), (2004), Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4, National Academies Press, Washington DC. https://doi.org/10.17226/10902

NIOSH, (2018), Pocket Guide to Chemical Hazards: Chlorine, National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta.

Oke, T.R., (2020), Urban Climates and Air Quality, Cambridge University Press, Cambridge. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Patil, G.K., Naik, J.B., Patil, N.K., Dandawate, P. and Pardeshi, S.R., (2023), "The study of wind speed and various leak size repercussion on toxic chlorine leakage from tonner using 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis technique", in: E. Chinthapudi, S. Basu & B.N. Thorat (eds.), Sustainable Chemical, Mineral and Material Processing, pp. 45-63, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7264-5_4

Setareshenas, N., Khalilipour, M., Shahraki, F. and Mansouri, M., (2014), "Consequence modeling of chlorine release from water treatment plant", American Chemical Science Journal, 4(1), 97-104. https://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/5961

Sullivan, J.B. and Krieger, G.R., (2020), Clinical Environmental Health and Toxic Exposures, 3rd ed., Wolters Kluwer.

Wang, Z.L., Low, J.Y., Chin, S.C. and Gimbun, J., (2025), "Modelling the chlorine dispersion from hypothetical leak in Kasigui water treatment plant", Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences, 21(1), 1611-1625. https://doi.org/10.11113/mjfas.v21n1.3807

White, C.W. and Martin, J.G., (2019), "Acute chlorine gas inhalation: Mechanisms of injury and clinical management", Journal of Intensive Care Medicine, 34(6), 456-468.

Witlox, H.W.M., Harper, M., Oke, A. and Stene, J., (2018), "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, 55, 457-470. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.018

Zainulabidin, S., Rashid, Z.A. and Ahmad, M.A., (2025), "Investigation of critical leak locations in 1-ton chlorine drums for assessing worst-case toxic dispersion accident scenario using ALOHA simulation", Proceeding 2025 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), pp. 262-266. https://doi.org/10.1109/I2CACIS65476.2025.11100440

پذیرفته شده / ویرایش نشده