

شبیه‌سازی تعیین شعاع آلودگی هیدروژن سیانید و ارزیابی پیامدهای ناشی از آن برای چند سناریوی مختلف در شرایط جوی متفاوت

نبی جوادی^{۱*}، محمدرضا غلامرضانیا^۲

۱- پژوهشگر، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۶/۰۷، پذیرش: ۹۷/۰۲/۳۰)

چکیده

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار PHAST نمودارهای غلظت برحسب زمان در فواصل و ارتفاع‌های مختلف از محل آلودگی اولیه عامل HCN در چند سناریوی مختلف استخراج گردیدند. در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، حداکثر میزان غلظت HCN مربوط به شرایط جوی خنثی است. با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، غلظت HCN کاهش یافته درحالی‌که مدت زمان آلودگی منطقه افزایش پیدا کرده است. در یک فاصله خاص از محل آلودگی اولیه، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، غلظت HCN افزایش یافته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که وضعیت جوی خنثی، بدترین وضعیت برای اقدامات حفاظتی و پدافندی است چرا که غلظت بیشتری از HCN در منطقه وجود داشته و مدت زمان آلودگی نیز بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: پدافند شیمیایی، عامل هیدروژن سیانید، نرم‌افزار PHAST

Simulation of Hydrogen Cyanide Domain Pollution Determination and Assessment of Its Consequences for Different Scenarios in Various Atmospheric Conditions

N. Javadi*, M. R. Gholamrezania

Imam Hossein University

(Received: 29/08/2017; Accepted: 20/05/2018)

Abstract

The aim of this study is construction of graphs of concentration versus time at different distances from the primary pollution place of the HCN agent and also the production of well tabulated data for the amount of HCN released at different distances and heights from the location of primary pollution using the PHAST software. At different distances from the primary pollution place and 2 meters height from the ground, the maximum concentration of HCN was due to neutral weather condition. With increasing the distance from 2 meters above the ground, the concentration of HCN decreased while the duration of contamination in area increased. At a certain distance from the primary pollution place, with increasing the height, the concentration of HCN increased. The results of this study indicate that the neutral weather condition is the worst condition for defensive protection actions, because there was a higher concentration of HCN in the region, and the duration of contamination has also been higher.

Keywords: Chemical Defence, Hydrogen Cyanide Agent, PHAST Software

۱. مقدمه

نشت مایع از مخازن و تبخیر از حوضچه‌های ایجادشده را مورد ارزیابی قرار دادند [۸]، غلظت‌های به‌دست‌آمده حاصل از پراکندگی CO₂ در این پژوهش با دقت بالا به دست آمدند. حساسیت نتایج پراکندگی برای گازهای آمونیاک، کلر و نیتریک اکسید که به‌وسیله نرم‌افزار Phast شبیه‌سازی شده‌اند، نسبت به پارامترهای مختلف گزارش شده است [۹]. نتایج این پژوهش به توسعه‌دهندگان و کاربران نرم‌افزار Phast این بینش را می‌دهد که کدام پارامترها روی نتایج پراکندگی، مهم و تأثیرگذار بوده و کدام پارامترها حتی قابل صرف‌نظر هستند.

ویتلوکس و همکاران [۱۰] دقت نتایج حاصل از مدل پراکندگی نرم‌افزار Phast را در مقابل داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مورد ارزیابی قرار دادند، تطابق خوبی برای پیش‌بینی‌های غلظت در مقابل آزمایش‌های میدانی به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از یک کار پژوهشی با هدف مقایسه کارایی نرم‌افزارهای Phast و ALOHA نشان می‌دهد که نرم‌افزار Phast نتایج بهتری را نسبت به نرم‌افزار ALOHA به دست می‌دهد [۵]. علاوه بر موارد مذکور، مطالعات متعدد دیگری در زمینه اعتبار سنجی داده‌های حاصل از نرم‌افزار Phast صورت گرفته است [۱۱-۱۷].

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی پخش عامل شیمیایی HCN در چند سناریوی مختلف جهت شناخت پیامدهای ناشی از چنین حوادثی به‌منظور اقدامات پدافندی مؤثرتر آورده می‌شود. غلظت‌های کم آن‌ها در بدن سمیت ندارند ولی سیانیدهای «هالوژنه» آثار تحریکی و خفه‌کننده در دستگاه تنفسی دارند، این عوامل در جنگ‌های شیمیایی با غلظت‌های بالا استفاده می‌شوند که موجب سردرد، اضطراب، گلگون شدن پوست و مخاط، تشنج، کاهش فشارخون، توقف تنفس و درنهایت مرگ را در پی خواهد داشت [۱۸].

۲. تعریف سناریو و شبیه‌سازی

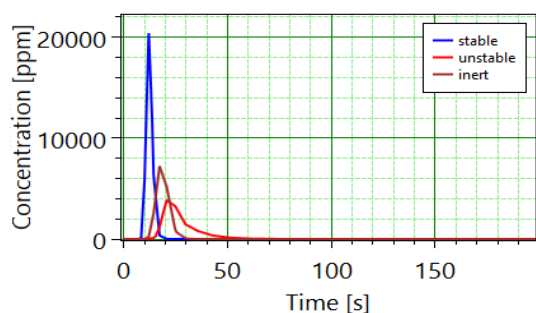
جهت شبیه‌سازی انتشار عوامل شیمیایی توسط نرم‌افزار Phast به اطلاعاتی نظیر مشخصات منبع آلودگی (نوع عامل شیمیایی، میزان عامل، نقطه‌جوش عامل و ...)، ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و داده‌های هواشناسی (جهت و سرعت وزش باد، میزان ابری بودن هوا، رطوبت و ...) نیاز است. به‌عنوان روشی مناسب برای ارزیابی پیامدهای ناشی از آلودگی اولیه شیمیایی، الگوی سه مرحله‌ای به شرح زیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در طول قرن بیستم به‌طور مکرر در اغلب منازعات بین‌المللی و منطقه‌ای از جنگ‌افزارهای شیمیایی استفاده شده است. بر اساس گزارش‌های بازرسان سازمان ملل متحد از سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۸ رژیم بعثی عراق در موارد متعددی از عوامل خردل، تابون، وی ایکس و سارین علیه رزمندگان ایرانی و غیرنظامیان ساکن روستاها و شهرهای مرزی ایران استفاده کرده است [۳-۱]. ارزیابی خطرات پخش عوامل شیمیایی ناشی از حملات شیمیایی حائز اهمیت بوده، مخصوصاً وقتی که این عوامل شیمیایی پیشروی به سمت مناطق مسکونی (شهری و روستایی) را داشته باشند که می‌توانند خسارات سهمگین و جبران‌ناپذیری به بار آورند. امروزه اقدامات پدافندی برای ایمنی از حملات شیمیایی و کاهش خطرات ناشی از آن به‌طور جدی موردتوجه قرار گرفته است. نشت گاز سمی ایزوسیانات متیل، از کارخانه تولید سموم شهر بوپال هندوستان در سال ۱۹۸۴ یکی از بدترین و مصیبت‌بارترین فجایع صنعتی کل تاریخ بشر است. بین چهل تا شصت تن گاز از یک منطقه شیمیایی شرکت آمریکایی به بیرون پخش شد. نشت این گاز تا بیست و پنج مایل دورتر هم ادامه داشت و نزدیک به پانصد هزار نفر از اهالی، تحت تأثیر این گاز قرار گرفتند. در عرض یک هفته حدود هشت هزار نفر از مصدومان فاجعه، جان خود را از دست دادند [۴-۶].

موارد مذکور گویای وجود تهدیدات جدی در این زمینه‌ها هستند، لذا شبیه‌سازی و ارزیابی پیامدهای ناشی از چنین حوادثی قبل از وقوع رخداد بسیار حائز اهمیت است. با این حال تا اکنون در داخل کشور، هیچ‌گونه مطالعه‌ای در زمینه شبیه‌سازی پخش عوامل شیمیایی ناشی از جنگ شیمیایی صورت نگرفته است. همچنین برای این موضوع، هیچ‌گونه مقاله و پژوهشی در خارج از کشور نیز یافت نشد. در زمینه نشت عوامل سمی - صنعتی در صنایع شیمیایی مطالعات متعددی با استفاده از نرم‌افزارهای گوناگون صورت گرفته است. مک‌کنا و همکاران، پیش‌بینی‌های حاصل از نرم‌افزارهای Phast و Drift را با نتایج آزمایش‌های چک رابیت مقایسه کردند [۷].

در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی دو مجموعه آزمایش‌های عملی بزرگ‌مقیاس برای پراکندگی گاز کلر در ایالات‌متحده آمریکا انجام گرفت، این آزمایش‌ها به‌عنوان آزمایش‌های چک رابیت II شناخته شده‌اند. در این آزمایش‌ها مقادیر زیادی گاز کلر در محیط آزاد شد و حسگرهای تعبیه‌شده در منطقه تا فاصله ۱۱ کیلومتری از منبع گاز غلظت‌های کلر را ثبت کردند. هنک و همکاران در یک کار پژوهشی دقت نتایج نرم‌افزار Phast را برای

هیدروژن سیانید ۵۰۰ کیلوگرمی در شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار آورده می‌شوند. شکل (۱) نمودار غلظت بر حسب زمان را برای HCN در فاصله ۵۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای شرایط جوی پایدار بعد از گذشت ۸ ثانیه منطقه آلوده شده است، در حالی‌که برای شرایط جوی پایدار و ناپایدار منطقه به ترتیب بعد از گذشت تقریباً ۱۱ و ۱۵ ثانیه آلوده می‌شود. مدت زمان آلودگی منطقه برای شرایط جوی خنثی، پایدار و ناپایدار به ترتیب برابر ۲۰، ۱۰ و ۳۰ ثانیه بوده است. البته باید توجه داشت که در فاصله ۵۰ متری از محل آلودگی اولیه، حداکثر غلظت ماده HCN، مربوط به شرایط جوی پایدار بوده، که این عامل سبب می‌گردد علی‌رغم کوتاهی مدت زمان آلودگی منطقه میزان سمیت HCN در این شرایط جوی با شرایط جوی خنثی تقریباً برابر و بیشتر از شرایط جوی ناپایدار باشد.



شکل ۱. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۵۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.

شکل (۲) نمودار غلظت بر حسب زمان را برای HCN در فاصله ۱۰۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. روند آلوده شدن این منطقه در سه شرایط جوی مذکور، مشابه منطقه ۵۰ متری بوده است، با این تفاوت که در فاصله ۱۰۰ متری غلظت HCN به مراتب کاهش یافته است. در اینجا بیشترین مدت زمان آلودگی منطقه، مربوط به شرایط جوی ناپایدار بوده که تقریباً ۶۰ ثانیه طول کشیده است. قابل توجه است که دانسیته هیدروژن سیانید از هوا کمتر است، این عامل سبب شناوری مثبت هیدروژن سیانید در هوا می‌شود. یعنی هیدروژن سیانید بیشتر تمایل دارد که در جهت عمود بر سطح زمین، از سطح فاصله بگیرد.

شکل (۳) پروفایل غلظت HCN در فاصله ۲۰۰ متری در

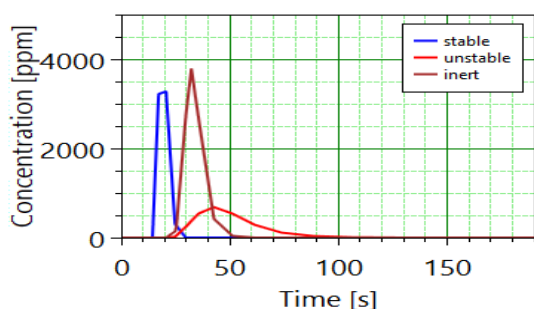
انتخاب سناریو: برگزیدن سناریوهای قابل اعتنا از بین تعداد بسیار زیادی گزینه، باعث کاهش زمان و حجم محاسبات به‌گونه‌ای چشمگیر می‌شود. مقصود از سناریوی قابل اعتنا، حادثه یا ترکیبی از حوادث است که اولاً محتمل باشد، یعنی حوادث نادر بررسی نمی‌شوند. دوم این‌که عواقب حادثه مورد نظر باید دارای شدت و تاثیر کافی باشد. یکی از سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش شامل ارزیابی پخش ۵۰۰ کیلوگرم هیدروژن سیانید در سه شرایط جوی پایدار، خنثی و ناپایدار است، سناریوی دیگر نیز شامل پخش ۳۰۰ کیلوگرم هیدروژن سیانید در شرایط جوی پایدار است. در هر دو سناریو، پروفایل غلظت عامل بر حسب زمان در فاصله‌ها و ارتفاع‌های مختلف از محل آلودگی اولیه استخراج می‌گردند. پایداری جو نشان‌دهنده میزان اختلاط لایه‌های جوی در جهت عمود بر سطح زمین است. هرچه جو پایدارتر باشد این اختلاط کمتر و در صورت ناپایدار بودن جو، اختلاط لایه‌های جوی بیشتر بوده و پخش مواد در جهت عمود بر سطح زمین را به حداکثر می‌رساند. واضح است که بدترین شرایط جوی برای اقدامات پدافندی هنگام حمله شیمیایی، شرایط جوی پایدار است که در این شرایط غلظت‌های بیشتری تا فاصله‌های زیاد از محل آلودگی اولیه توزیع می‌شوند. از جمله عوامل موثر در شکل‌گیری شرایط جوی پایدار، تابش شدید آفتاب و سرعت‌های پایین وزش باد است.

تحلیل شرایط و شبه‌سازی حادثه: در این مرحله سعی می‌شود تمام شرایط فیزیکی تاثیرگذار بر حادثه شناسایی شود. یعنی برای هر یک از سناریوها به‌طور جداگانه، عواملی که بر چگونگی شکل‌گیری و پیشرفت آن موثرند، باید مشخص شوند. بعد از انتخاب و تعریف پارامترها در نرم‌افزار، مرحله شبه‌سازی توسط نرم‌افزار شروع می‌شود.

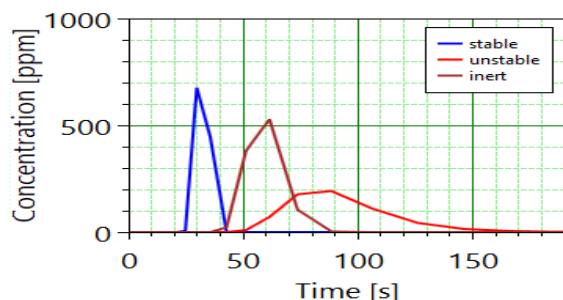
استخراج نتایج و ارزیابی پیامدها: بر اساس نتایج خروجی از شبه‌سازی و سنجیدن آنها، شدت آسیب‌رسانی سناریوی مورد مطالعه، مشخص می‌شود. در این مرحله با داشتن داده‌هایی نظیر پروفایل‌های غلظت عامل شیمیایی در فواصل و ارتفاع‌های مختلف از محل آلودگی اولیه، می‌توان راجع به انواع اقدامات حفاظتی به‌منظور کاهش آثار ناگوار ناشی از آلودگی شیمیایی، تصمیم‌گیرهای لازم و مقتضی را انجام داد.

۳. نتایج و بحث

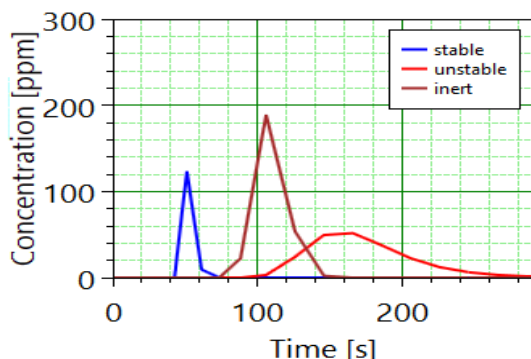
در ادامه نمودارهای غلظت بر حسب زمان در فواصل مختلف از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای عامل



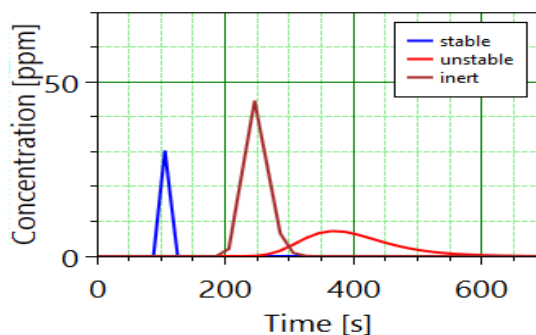
شکل ۲. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۱۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.



شکل ۳. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۲۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.



شکل ۴. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۴۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.



شکل ۵. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۱۰۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.

جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه میزان غلظت HCN کاهش، ولی مدت زمان آلودگی منطقه افزایش یافته است. برای شرایط جوی پایدار در این فاصله از محل آلودگی اولیه، بیش از ۲۵ ثانیه، زمان برای اقدامات حفاظتی قبل از آلوده شدن منطقه وجود دارد.

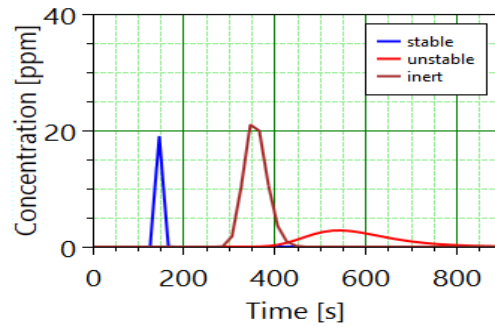
شکل (۷) نمودار غلظت بر حسب زمان را برای HCN در فاصله ۳۰۰۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. برای فاصله ۳۰۰۰ متری از محل آلودگی اولیه، تحت شرایط جوی پایدار منطقه بعد از گذشت ۲۲۰ ثانیه آلوده شده در حالی که برای شرایط جوی خنثی این زمان به ۵۵۰ ثانیه افزایش یافته است. با توجه به این که در شرایط جوی خنثی منطقه مدت زمان بیشتری تحت آلودگی بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که این شرایط جوی برای اقدامات پدافندی سخت تر است.

شکل (۴) پروفایل غلظت HCN در فاصله ۴۰۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فاصله ۴۰۰ متری از محل آلودگی اولیه، مدت زمان بیشتری طول کشیده است تا غلظت‌های اولیه HCN منطقه را آلوده کنند. همچنین مدت زمان بیشتری نسبت به فاصله‌های کمتر، این ناحیه تحت آلودگی HCN بوده است. به عنوان نمونه در شرایط جوی خنثی، این ناحیه ۱۶۰ ثانیه آلوده بوده که نسبت به فاصله ۲۰۰ متری از محل آلودگی اولیه تقریباً ۲ برابر است. شکل (۵) نمودار غلظت بر حسب زمان را برای HCN در فاصله ۱۰۰۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، وضعیت جوی خنثی، بدترین وضعیت برای اقدامات حفاظتی و پدافندی است چرا که غلظت بیشتری از HCN در منطقه وجود داشته و مدت زمان آلودگی نیز بیشتر بوده است.

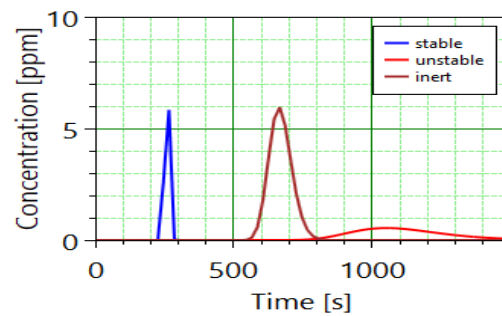
شکل (۶) پروفایل غلظت HCN در فاصله ۱۵۰۰ متری در جهت باد از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار نشان می‌دهد. در فاصله ۱۵۰۰ متری از محل آلودگی اولیه، روند آلوده شدن منطقه، مشابه فاصله ۱۰۰۰ متری می‌باشد. با افزایش فاصله از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ متر میزان غلظت HCN در منطقه تقریباً به نصف کاهش پیدا کرده است.

همچنین ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین را برای سناریوی پخش هیدروژن سیانید ۵۰۰ کیلوگرمی را در شرایط جوی پایدار نشان می‌دهد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۱) نشان می‌دهند که در یک فاصله خاص از محل آلودگی اولیه، با افزایش ارتفاع غلظت HCN افزایش یافته در حالی که مقدار پارامترهای t_1 و t_2 تقریباً ثابت باقی مانده‌اند. برای یک ارتفاع خاص با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه، غلظت HCN کاهش یافته در حالی که مقادیر پارامترهای t_1 و t_2 افزایش یافته‌اند.

جدول (۲) مقادیر سه پارامتر t_1 ، C_{max} و t_2 که به ترتیب نشان‌دهنده مدت لازم برای رسیدن اولین غلظت از HCN به منطقه، حداکثر غلظت HCN در منطقه و مدت زمان آلودگی منطقه هستند، در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و همچنین ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین را برای سناریوی پخش هیدروژن سیانید ۳۰۰ کیلوگرمی را در شرایط جوی پایدار نشان می‌دهد. برای این سناریو نیز در یک فاصله خاص از محل آلودگی اولیه، با افزایش ارتفاع غلظت HCN افزایش یافته در حالی که مقدار پارامترهای t_1 و t_2 تقریباً ثابت باقی مانده‌اند. برای یک ارتفاع خاص با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه، غلظت HCN کاهش یافته در حالی که مقادیر پارامترهای t_1 و t_2 افزایش یافته‌اند. مقایسه داده‌های جدول‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهند که برای سناریوی پخش هیدروژن سیانید ۳۰۰ کیلوگرمی در مقایسه با مورد ۵۰۰ کیلوگرمی مقادیر C_{max} کاهش، مقادیر t_2 افزایش و مقادیر t_1 ثابت باقی مانده‌اند.



شکل ۶. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۱۵۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.



شکل ۷. پروفایل غلظت HCN در فاصله ۳۰۰۰ متری از محل آلودگی اولیه و در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در سه شرایط جوی ناپایدار، خنثی و پایدار.

جدول (۱) مقادیر سه پارامتر t_1 ، C_{max} و t_2 که به ترتیب نشان‌دهنده مدت لازم برای رسیدن اولین غلظت از HCN به منطقه، حداکثر غلظت HCN در منطقه و مدت زمان آلودگی منطقه هستند، در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و

جدول ۱. مقادیر پارامترهای t_1 (s) و C_{max} (ppm) و t_2 (s) در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و همچنین ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین برای سناریوی پخش هیدروژن سیانید ۵۰۰ کیلوگرمی.

| ارتفاع (متر) | پارامتر | فاصله (متر) | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| | | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰ | ۵۰۰ | ۷۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۳۰۰ | ۱۶۰۰ | ۲۰۰۰ |
| ۲ | t_1 | ۸ | ۱۵ | ۲۵ | ۳۵ | ۵۰ | ۶۵ | ۹۰ | ۱۲۰ | ۱۴۵ | ۱۷۵ |
| | C_{max} | ۲۰۰۰۰ | ۳۳۰۰ | ۶۸۰ | ۳۴۰ | ۱۳۲ | ۴۷ | ۳۰ | ۱۶ | ۱۷/۵ | ۱۳/۲۵ |
| | t_2 | ۱۲ | ۱۵ | ۲۰ | ۴۷ | ۳۷ | ۵۷ | ۵۷ | ۷۵ | ۷۷ | ۷۷ |
| ۴ | t_1 | ۱۵ | ۲۶ | ۴۲ | ۶۱ | ۱۰۵ | ۱۲۸ | ۱۸۸ | ۲۲۸ | ۲۶۵ | ۳۲۸ |
| | C_{max} | ۲۱۴۰۰ | ۶۵۷۰ | ۱۴۵۰ | ۴۲۰ | ۱۶۵ | ۵۵ | ۳۷ | ۱۸/۷ | ۲۰/۲ | ۱۵/۱ |
| | t_2 | ۲۰ | ۳۲ | ۴۴ | ۴۴ | ۴۰ | ۵۷ | ۵۷ | ۶۲ | ۷۸ | ۷۷ |
| ۶ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۲ | ۶۲ | ۱۰۵ | ۱۲۷ | ۱۸۶ | ۲۲۸ | ۲۶۸ | ۳۲۶ |
| | C_{max} | ۲۲۲۰۰ | ۷۵۷۰ | ۱۶۲۰ | ۵۲۵ | ۲۰۴ | ۷۰ | ۴۳/۷ | ۲۲ | ۲۳/۵ | ۱۷/۲ |
| | t_2 | ۲۰ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۳ | ۴۰ | ۵۸ | ۵۹ | ۷۶ | ۷۹ | ۷۹ |
| ۸ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۲ | ۶۲ | ۱۰۵ | ۱۲۶ | ۱۸۸ | ۲۲۶ | ۲۶۷ | ۳۲۶ |
| | C_{max} | ۲۸۰۰۰ | ۸۵۷۰ | ۱۹۰۰ | ۶۳۰ | ۲۵۰ | ۸۵ | ۵۳ | ۲۵/۵ | ۲۷ | ۱۹/۵ |
| | t_2 | ۲۰ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۲ | ۴۰ | ۵۷ | ۵۷ | ۷۶ | ۷۸ | ۷۹ |
| ۱۰ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۲ | ۶۲ | ۱۰۶ | ۱۲۸ | ۱۸۸ | ۲۲۸ | ۲۶۷ | ۳۲۷ |
| | C_{max} | ۳۳۳۰۰ | ۹۵۰۰ | ۲۲۰۰ | ۷۵۰ | ۳۰۰ | ۱۰۲ | ۶۳ | ۲۹ | ۳۱ | ۲۲ |
| | t_2 | ۲۰ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۳ | ۳۹ | ۵۷ | ۵۷ | ۷۵ | ۷۸ | ۷۸ |

جدول ۲. مقادیر پارامترهای t_1 (s)، C_{max} (ppm) و t_2 (s) در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و همچنین ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین برای سناریو پخش هیدروژن سیانید ۳۰۰ کیلوگرمی.

| ارتفاع (متر) | پارامتر | فاصله (متر) | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰ | ۵۰۰ | ۷۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۳۰۰ | ۱۶۰۰ | ۲۰۰۰ |
| ۲ | t_1 | ۸ | ۱۵ | ۲۵ | ۴۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۱۰۰ | ۱۹۰ | ۲۸۵ | ۳۳۵ |
| | C_{max} | ۱۴۷۵۰ | ۲۱۹۵ | ۵۷۵ | ۲۸۰ | ۷۴ | ۴۵ | ۱۹/۵ | ۱۸/۲ | ۱۱/۲ | ۱۱/۲ |
| | t_2 | ۱۵ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۰ | ۶۰ | ۶۰ | ۷۴ | ۷۷ | ۸۰ | ۹۰ |
| ۴ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۵ | ۶۵ | ۱۰۵ | ۱۴۵ | ۱۸۵ | ۲۲۸ | ۲۸۵ | ۳۳۵ |
| | C_{max} | ۱۸۲۵۰ | ۲۶۵۰ | ۷۴۴ | ۳۷۰ | ۹۷ | ۵۸ | ۲۳/۹ | ۲۱/۵ | ۱۳/۳ | ۱۲/۵ |
| | t_2 | ۲۵ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۰ | ۶۰ | ۵۸ | ۷۵ | ۷۷ | ۸۰ | ۹۰ |
| ۶ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۵ | ۶۵ | ۱۰۵ | ۱۴۵ | ۱۸۵ | ۲۲۸ | ۲۸۵ | ۳۳۵ |
| | C_{max} | ۲۲۱۵۰ | ۳۱۵۰ | ۹۴۵ | ۴۸۰ | ۱۲۵ | ۷۳ | ۲۹ | ۲۵/۹ | ۱۵/۳ | ۱۴/۵ |
| | t_2 | ۲۵ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۰ | ۶۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۷۷ | ۸۰ | ۹۰ |
| ۸ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۵ | ۶۵ | ۱۰۵ | ۱۴۵ | ۱۸۵ | ۲۲۸ | ۲۸۵ | ۳۳۵ |
| | C_{max} | ۲۵۵۰۰ | ۳۵۵۰ | ۱۱۵۰ | ۶۱۰ | ۱۵۸ | ۹۲ | ۳۵ | ۳۰ | ۱۷/۹ | ۱۶/۲ |
| | t_2 | ۲۵ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۰ | ۶۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۷۷ | ۸۰ | ۹۰ |
| ۱۰ | t_1 | ۱۵ | ۲۵ | ۴۵ | ۶۵ | ۱۰۵ | ۱۴۵ | ۱۸۵ | ۲۲۸ | ۲۸۵ | ۳۳۵ |
| | C_{max} | ۲۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۱۳۵۰ | ۷۵۰ | ۱۹۸ | ۱۱۲ | ۴۱ | ۳۸ | ۲۰/۵ | ۱۷/۵ |
| | t_2 | ۲۵ | ۳۵ | ۴۴ | ۴۰ | ۶۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۷۷ | ۸۰ | ۹۰ |

۵. مراجع‌ها

- Khateri, S. "An Open Wound: Consequences of the Use of Chemical Weapons against Iran during the Iran-Iraq War"; Society for Chemical Weapons Victims Support SCWVS. Tehran Peace Museum, 2009.
- Hiltermann, J. R. "A Poisonous Affair: America, Iraq, and the Gassing of Halabja"; Cambridge University Press, 2007.
- Timmerman, K. R. "The Death Lobby: How the West Armed Iraq After the Gulf War"; Houghton Mifflin, 1991.
- Khan, F. I.; Abbasi, S. "Major Accidents in Process Industries and an Analysis of Causes and Consequences"; J. Loss. Prev. Process Ind. 1999, 12, 361-378.
- Langari, M.; Shamohammadi, E.; Rashtchian, D. "Consequence Modeling Analysis with PHAST and ALOHA Computer Software"; First International Conference of Inspection and Safety in the Oil and Energy Industries, Tehran, 2011.
- Reddy, K.; Yarrakula, K. "Analysis of Accident in Chemical Process Industries in the Period 1998-2015"; Int. J. Chem. Tech. Res. 2016, 9, 177-191.
- McKenna, B.; Garcia, M. M.; Gant, S.; Batt, R.; Wardman, M.; Tucker, H.; Tickle, G.; Witlox, H.; Fernandez, M.; Harper, M.; Stene, J. "Dispersion Model Prediction of the Jack Rabbit II Chlorine Experiments Using Drift and Phast"; Symposium Series No. 161, Hazards 26, 2016.
- Witlox, H.; Harper, M.; Oke, A. "Phast Validation of Discharge and Atmospheric Dispersion for Pressurized Carbon dioxide Releases"; Symposium Series No. 158, Hazards 23, 2012.
- Pandya, N.; Gabas, N.; Marsden, E. "Sensitivity Analysis of Phast Atmospheric Dispersion Model for Three Toxic Materials (Nitric Oxide, Ammonia, Chlorine)"; Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2012, 25, 20-32.
- Witlox, H.; Harper, M.; Pitblado, R. "Validation of PHAST Dispersion Model as Required for USA LNJ Siting Applications"; Chem. Eng. Trans. 2013, 31, 49-54.

۴. نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی، پیامدهای ناشی از پخش عامل هیدروژن سیانید را در چند شرایط جوی مختلف با استفاده از نرم‌افزار PHAST شبیه‌سازی شد. نمودارهای غلظت برحسب زمان در فواصل مختلف از محل آلودگی اولیه شیمیایی هیدروژن سیانید و همچنین داده‌های جدول‌بندی شده برای میزان ماده منتشرشده در فواصل و ارتفاع‌های مختلف از محل آلودگی اولیه برای چند سناریوی مختلف به‌دست آمد. نتایج نشان داد که برای عامل هیدروژن سیانید در فاصله‌های مختلف از محل آلودگی اولیه و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، حداکثر میزان غلظت HCN مربوط به شرایط جوی خنثی بوده است. با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، غلظت HCN کاهش یافته درحالی‌که مدت زمان آلودگی منطقه افزایش پیدا کرده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که وضعیت جوی خنثی، بدترین وضعیت برای اقدامات حفاظتی و پدافندی است چرا که غلظت بیشتری از HCN در منطقه وجود داشته و مدت زمان آلودگی نیز بیشتر بوده است. نتایج نشان دادند که در یک فاصله خاص از محل آلودگی اولیه، با افزایش ارتفاع غلظت HCN افزایش یافته درحالی‌که مقدار پارامترهای t_1 و t_2 تقریباً ثابت باقی مانده‌اند. برای یک ارتفاع خاص با افزایش فاصله از محل آلودگی اولیه، غلظت HCN کاهش یافته درحالی‌که مقادیر پارامترهای t_1 و t_2 افزایش یافته‌اند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که برای سناریوی پخش هیدروژن سیانید ۳۰۰ کیلوگرمی در مقایسه با مورد ۵۰۰ کیلوگرمی مقادیر C_{max} کاهش، مقادیر t_2 افزایش و مقادیر t_1 ثابت باقی مانده‌اند.

- [11] Zohdirad, H.; Ebadi, T.; Givehchi, S. "Optimization of the Calculation of Hazardous Zones Boundries for Classification Hazardous Area Using Risk-Based Approach"; *Journal of Health and Safty at Work* 2016, 6, 1.
- [12] Shahedi Aliabadi, S.; Assary, M. J.; Kalatpour, O.; arei, E.; Mohammadfam, I. "Consequence Modeling of Fire on Methane Storage Tanks in a Gas Refinery"; *Journal of Accupational Hygiene Engineering* 2016, 3, 1.
- [13] Holmes, N. S.; Morawska, L. "A Review of Dispersion Modeling and Its Applications to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available"; *Atmos. Environ.* 2006, 40, 5902-5928.
- [14] Kesavkar, A. P.; Dalvi, M.; Venkatram, A.; Cimorelli, A.; Kaginalkar, A.; Ojha, A. "Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for Pollutant Dispersion Modeling"; *Atmos. Environ.* 2007, 41, 1976-1988.
- [15] Zhang, Q.; Wei, Y.; Tian, W.; Yang, K. "GIS-Based Emission Inventories of Urban Scale: A Case Study of Hangzhou"; *Atmos. Environ.* 2008, 42, 5150-5165.
- [16] Hanna, S.; Dharmavaram, S.; Zhang, J.; Sykes, I.; Witlox, H.; Khajehnajafi, S.; Koslan, K. "Comparison of Six Widely-Used Dence Gas Dispersion Models for Three Actual Railcar Accidents"; in: Borrego, C., Miranda, A. L. (eds), *Air Pollution Modeling and Its Application X IX*, NATO Science for Pease and Security Series C: Environmental Security, 2008.
- [17] Hanna, S.; Hansen, O. R.; Ichard, M.; Strimaitis, D. "CFD Model Simulation of Dispersion from Chlorine Railcar Releases in Industrial and Urban Areas"; *Atmos. Environ.* 2009, 43, 262-270.
- [18] Information Base of Chemical Weapons Victims. <http://www.chemicalvictims.com/HomePage.aspx?TabID=4398&Site=chemical-victims&Lang=fa-IR>.