

مدل سازی پیامد انتشار کلر از مخزن ذخیره به کمک داده های میدانی

مهدی پروینی^{۱*} و المیرا قراگوزلو^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: مدلسازی پیامد، انتشار، کلر، آزمایش جک رابیت، PHAST.</p>	<p>کلر و ترکیبات آن از مواد پرمصرف در صنعت می باشد و برای تولید طیف وسیعی از محصولات به وجود این ماده شیمیایی نیاز است. کلر عنصری است که در پوسته ی زمین و اقیانوس ها وجود دارد و یک ماده ی قوی و خورنده است. از این رو این ماده شیمیایی می تواند سبب ساز وقایع بسیار فاجعه باری گردد. در آمریکا، کلر پس از منواکسید کربن دومین ماده خطرناک از لحاظ میزان حادثه و آسیب زایی می باشد. یکی از مهم ترین مطالعات میدانی که اخیرا در زمینه کلر در آمریکا انجام شده، سری آزمایش هایی موسوم به جک رابیت می باشد که به منظور تهیه داده های ضروری و پایه جهت تخمین پیامدهای حاصل از انتشار گازهای سنگینی مثل کلر و آمونیاک طراحی و اجرا شده است. این آزمایشات در سال ۲۰۱۰ در ناحیه ای بیابانی در داگ وی در ایالت اوتاه آمریکا انجام گرفت. در این مقاله، مدل سازی انتشار کلر از مخزن مورد آزمایش انجام و آثار ایمنی و بهداشتی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نواحی پر مخاطره، پهنای ابر تشکیل شده و احتمال مرگ در مناطق مختلف از نتایج مدل سازی می باشد. ضمنا انطباق قابل قبولی بین نتایج تجربی و خروجی های مدل قابل مشاهده می باشد.</p>

۱- مقدمه

از این گاز قرار گیرد، سرفه شروع شده و اختلالات تنفسی را در پی دارد و چشم ها، پوست و گلو شروع به سوزش می کنند. تنفس مقدار بیشتر این گاز باعث تورم و تحریک گلو و ریه ها شده و راه های هوایی را مسدود می کند. در همین هنگام آب در ریه ها تجمع پیدا کرده و تنفس را بسیار مشکل می کند. اگر مقدار استنشاق شده این گاز بیشتر شود، کشیدن چند نفس مرگ آور خواهد بود.

به دلیل خواص کلر اعم از وزن مولکولی بالا، غلظت بالای ذرات آئروسول (ذرات میکروسکوپی جامد و مایع در فاز گازی) در کلر و دمای پایین انتشار، ابر تشکیل شده از کلر، چگالی بالایی داشته و در صورت انتشار در طی یک شناوری منفی در نزدیکی سطح زمین قرار می گیرد.

کلر یکی از سمی ترین گازهایی است که در مقادیر بسیاری در جهان تولید و مصرف می گردد [۱،۲]. از کلر در ساخت مواد پلاستیکی یا ساخت مواد دیگر استفاده می شود و برای تصفیه ی آب و فاضلاب و نیز ساخت مواد سرد کننده، براق کننده، حشره کش ها، داروها، ضد عفونی کننده ها، سفید کننده ها و دیگر محصولات مصرفی بکار گرفته می شود. غلظت های خطرناک این ماده بر حسب ppm در جدول (۱) قرار داده شده است [۳]. کارشناسان معتقدند اگر انسان در معرض اندکی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.parvini@sun.semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

باکس و یک مدل گوسی، پرداخته اند. جواد عدل و همکاران [۱۱] با روش تجزیه و تحلیل درخت خطا، عوامل خطرناک موثر در انتشار کلر در ایستگاه های کلرزی سیستم آب آشامیدنی را شناسایی کردند. از طرفی دیگر، سید باقر مرتضوی و همکاران [۱۲] با استفاده از مطالعه ی خطر و فرآیند و ماتریس ریسک سناریو های ممکن انتشار گاز کلر در واحد مخازن ذخیره یک مجتمع پتروشیمی را بررسی کرده اند. بیسواجیت راج و همکاران [۱۳] سناریویی مبنی بر انتشار کلر را طرح کرده و با مدل CHARM مدل سازی کرده اند و طی آن مسافت طی شده توسط ابر تشکیل شده و همچنین زمان لازم جهت تخلیه ی محل حادثه محاسبه گردیده است. ای. وای. سانچز و همکاران [۱۴] در مقاله ای با طرح یک سناریو و با استفاده از داده های مقاله ی هانا و همکاران [۸]، انتشار کلر را در شهر شیکاگو بررسی کرده و با ترکیبی از مدل های FLAC و DDC مدل سازی نموده اند. در این نوشته نقش موانع نیز در انتشار این ماده بررسی شده و مشخص گشته است که هر چه موانع بلند تر و بیشتری وجود داشته باشد، ابر تشکیل شده با سرعت بیشتری رقیق می گردد. از جانب دیگر، مقالاتی مدل PHAST را به عنوان یک نرم افزار کاربردی به عنوان اساس کار خود قرار داده و به بررسی انتشار موادی چون هیدروژن [۱۵،۱۶] و کربن دی اکسید [۱۷،۱۸] و مدل سازی آن ها با نرم افزار PHAST پرداخته اند.

مجموعه آزمایش های جک رابیت در سال ۲۰۱۰ در بخش بیابانی داگ وی در ایالت اوتاه آمریکا انجام گرفت [۱۹]. ناحیه ی آزمایش بصورت یک فرورفتگی با عمق ۲ متر و قطر ۵۰ متر اصلاح شده و تانک حاوی کلر و یا آمونیاک در وسط آن قرار گرفته بود. منطقه ی مرکزی این گود رفتگی، یک ناحیه ی مسطح با شعاعی در حدود ۱۲ متر بود. انواع مختلفی از نمونه بردارهای غلظتی و سنسورهای هواشناسی و همچنین بسیاری از ویدئو و دوربین ها به کار گرفته شدند. غلظت ها توسط چندین نوع نمونه گیرنده، اندازه گیری شده اند، شامل آن هایی

بنابراین انتشار گاز کلر می تواند آثار مخرب زیادی را بر جمعیت نزدیک به محل انتشار به بار بیاورد.

جدول ۱- غلظت های خطرناک ماده ی کلر و نشانه ها و آثار آن [۳].

نشانه ها و آثار آن	ppm
سوزش خفیف غشای مخاطی، قابل تحمل تا یک ساعت	۱-۳
تحریک شدید چشم ها و دستگاه تنفسی	۵-۱۵
درد در قفسه ی سینه، استفراغ و سرفه ی شدید	۳۰
ایجاد التهاب و ورمی ریوی	۴۰-۶۰
کشنده در مدت بالای ۳۰ دقیقه	۴۳۰
کشنده تنها در چند دقیقه	۱۰۰۰

باید به این نکته توجه داشت که انتشار این ماده به محیط می تواند به دلیل دو عامل غیر عمدی (نقص فنی در فرآیند، سوراخ شدن مخازن تحت فشار ماده، خارج شدن از ریل واگن های حمل آن و یا اختلاط مواد شیمیایی دیگر با کلر به دلیل اطلاع نداشتن از خواص آن) و یا عمدی (حملات تروریستی و خرابکارانه در مسیر حمل و نقل این ماده و یا در محل نگهداری آن) حادث گردد. از این رو جهت کاهش این مخاطرات باید راه چاره ای جست. اقداماتی جهت امکان سنجی حذف کلر و آئروسول اعم از واکنش شیمیایی [۴،۵]، خشک و رسوب کردن [۶،۷،۸] و جمع آوری آن به وسیله ی پوشش سبز گیاهی [۹] صورت گرفته است و بنابراین ضروری است که آزمایش هایی جهت شبیه سازی و تولید داده های کلیدی برای رهایش کلر، صورت گیرد تا بتوان در صورت انتشار تصمیم گیری های اضطراری را بهبود بخشید.

طی سال های اخیر بررسی های زیادی درباره ی انتشار کلر صورت گرفته است. به عنوان مثال، آ. دوندریو و همکاران [۱۰] انتشار کلر را در مقیاس کوچک و به طور تجربی مورد آزمایش قرار داده اند و سپس به مدلسازی نتایج بدست آمده با سه نوع مدل انتشار اعم از دو مدل

افزاری در آمده اند. مدل‌هایی اعم از DEGADIC, PHAST و ALOHA, HGSYSTEM, SLAB شماری از این مدل‌های نرم افزاری مشهوری هستند که هر کدام ویژگی‌های مثبت و معایب خاص خود را دارند. مدل DEGADIC تنها برای رهایش دائمی گاز‌های سنگین کاربرد دارد و تاثیر ارتفاع محل رهایش و نیز سطح زمین را بر پراکندگی در نظر می‌گیرد. از معایب آن این است که فقط رهایش مواد را در جهت عمود از منبع نشستی مدل سازی کرده و نیز برای مدل سازی مخلوطی از مواد مناسب نیست و وقتی ارتفاع ناهمواری زیاد باشد دقت کافی ندارد. این مدل محاسبات مربوط به تبخیر از سطح حوضچه و نیز رهایش ناگهانی را در نظر نمی‌گیرد. SLAB رهایش ناگهانی و دائمی گازهای سبک و سنگین را مدل سازی می‌کند و همچنین محاسبات تبخیر از حوضچه را انجام داده و قادر به محاسبه ی رهایش مواد در ارتفاعات مختلف و در جهت عمودی و افقی می‌باشد اما پروفایل غلظت را در جهت عمود بر باد در نظر نگرفته و تنها آن را بصورت یک بعدی محاسبه می‌کند. از دیگر معایب آن این است که قادر به محاسبه ی نرخ رهایش مواد از منبع نشستی نیست و سرعت خروج مواد از منبع را به عنوان یکی از پارامترهای ورودی در نظر می‌گیرد. هر دو مدل ALOHA و HGSYSTEM توانایی مدل سازی رهایش ناگهانی و یا مداوم مواد سنگین یا سبک را دارند و تبخیر از حوضچه ی مایع نیز جزو محاسبات این مدل‌ها هستند. از معایب این دو مدل، نداشتن دقت مناسب در تخمین پروفایل غلظت مواد در شرایطی است که جو خیلی پایدار و سرعت باد کم است. مدل PHAST اما یکی از بهترین مدل‌های ارائه شده جهت مدل سازی پخش مواد در محیط است. این مدل می‌تواند رهایش ناگهانی و یا مداوم مواد سنگین و سبک را مدل سازی کرده و تبخیر از حوضچه ی مایع را مورد بررسی قرار دهد. این مدل همچنین ارتفاع رهایش و متوسط ناهمواری را در نظر می‌گیرد.

که در هر ثانیه پاسخ‌های سریعی را نسبت به غلظت انتشار یافته گزارش می‌کردند و آن‌هایی که غلظت‌های پیوسته‌ای را در دوره ی زمانی تعیین شده‌ای با پوشش کل زمان اثر ابر، مثلا ۳۰ دقیقه تا ۲ ساعت، گزارش کرده اند. خیلی از نمونه گیرنده‌های پاسخ سریع MiniRAE در موقعیت‌هایی دایره‌ای در فواصل مختلف (مانند ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ متری) قرار داده شده اند. تصویری از این آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. حدود ۱۰ آزمایش موفقیت آمیز در طول این آزمایش انجام شد که دوتای آن حاوی ۱ تن ماده و هشت تای دیگر حاوی ۲ تن ماده بودند. آزمایش‌های شامل ۱ تن ماده "آزمایش پابلوت" و آزمایش‌های شامل ۲ تن ماده "آزمایش رکورد" نامیده شدند. تا به حال داده‌های این آزمایش برای مدل سازی با مدل‌های مختلفی چون SLAB [۱۹] و VLSTRACK [۲۰] استفاده گردیده است. این مقاله تنها یکی از آزمایش‌ها را که حاوی رهایش یک تن کلر بوده، مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۱- نمایی از آزمایش جک رابیت [۱۹]

۲- شیوه

مدل‌های زیادی برای تخمین غلظت مواد پخش شده در محیط، اعم از مواد سمی یا اشتعال پذیر در یک زمان یا فاصله ی معین ایجاد شده اند. این مدل‌ها اکثرا به منظور مدل سازی پخش گازهای متراکم و به وسیله ی روش‌های ریاضی ایجاد گردیده اند و به صورت بسته‌های نرم-

به هم مربوط هستند. پروفایل آزادسازی پیوسته، از منبع در جهت باد گسترش می یابد. یک آزادسازی بالا رفته ی بخار / آئروسول سنگین، با یک مقطع عرضی دایره ای آغاز می شود. ضمن پایین آمدن، مقطع عرضی به صورت بیضی ناقص تبدیل می شود، و از آنجایی که مولفه عمودی مومنتوم به مومنتوم در جهت باد و متقاطع با باد تبدیل شده است، سطح ابر کاهش می یابد. قطرات آئروسول می توانند بعد از حرکت به سمت پایین، به بارش تبدیل شوند. بارش باعث تولید یک حوضچه می شود که منتشر و تبخیر می گردد. اگر درون آب ریزش کنند، بخشی از مواد می توانند حل شوند. بخار حاصل از حوضچه، به صورت تابعی از زمان به پف بر می گردد. بعد از تبخیر تمامی قطرات آئروسول، پف می تواند شناور شود و حرارت را توسط رسانایی زمین یا توسط چگالیدن آب به دست آمده در طول یک سطح مرطوب، جذب کند. یک پف شناور، بلند می شود و بالا می رود تا زمانی که توسط یک لایه اختلاط، محدود گردد.

۳-۲- معادلات مربوطه

UDM -۱-۲-۳

پروفایل غلظت توسط معادله زیر داده شده است:

$$c(x, y, \zeta) = c_0(x)F_v(\zeta)F_h(y) \quad (1)$$

$$F_v(\zeta) = \exp\left\{-\left|\frac{\zeta}{R_z(x)}\right|^{m(x)}\right\} \quad (2)$$

$$F_h(y) = \exp\left\{-\left|\frac{y}{R_y(x)}\right|^{m(x)}\right\} \quad (3)$$

ضرایب مقیاس گذاری در معادلات بالا عبارتند از:

$$R_y = \sqrt{2}\sigma_y \quad (4)$$

$$R_z = \sqrt{2}\sigma_z \quad (5)$$

هنگامی که $m=m=2$ ، معادلات (۲) و (۳) به فرم گوسین و σ_y و σ_z به انحراف های استاندارد (ضرایب انتشار عمودی و متقاطع با باد گوسین) کاهش می یابند. به هر حال توان m ، به عنوان تابعی از اختلاف چگالی نرمال

بر طبق آزمایش هایی که هانا و همکاران [۲۱] بر روی رهایش مداوم آمونیاک و فلورید هیدروژن انجام داده اند مشخص شده که PHAST یکی از بهترین مدل ها برای تخمین غلظت پخش شده مواد در محیط است و دارای کمترین خطا می باشد.

۳- تئوری و محاسبات

۳-۱- خلاصه ای از مدل PHAST

مدل PHAST بر اساس مدل یکپارچه ی انتشار^۱ UDM کار می کند. مدل UDM، برای استفاده در مطالعات پیامد و ریسک، طراحی شده است. با دنبال کردن یک آزادسازی دوفازی با فشار تنظیم شده، این مدل می تواند انتشار در جهت مسیر باد (تمامی فازهای بین انتشار نزدیک به میدان و دور از میدان)، شامل فرود احتمالی، بارش (و در نتیجه تشکیل حوضچه و بازتبخیر) را محاسبه کند. این مدل برای آزادسازی های سمی و اشتعال پذیر نیز قابل کاربرد است. با ادامه فرود، این مدل، انتشار را در طول زمین مسطح با ناهمواری یکنواخت سطح فرض می-کند. نسخه اصلی UDM، توسط مقالات کوک و وودوارد، توصیف شده است، یعنی، مقالاتی در مورد مدل ترمودینامیکی قطرات [۲۲،۲۳]، مقالات ارائه کننده یک مرور از مدل [۲۴،۲۵،۲۶،۲۷]، و یک مقاله راجع به تنظیم یک مجموعه پیچیده ای از مدل پراکندگی [۲۸]. از آنجایی که رهایش در آزمایش مذکور به صورت پیوسته بوده، تنها معادلات مربوط به رهایش پیوسته در این نوشته گنجانده شده است.

در نمونه انتشار حالت پایا نشان داده شده در شکل (۲)، مختصات ζ ، فاصله عمودی بالای خط مرکز پف و عمود با جهت γ را نشان می دهد. زاویه بین خط مرکز پف و افق، توسط θ ، و ارتفاع پف عمودی بالای زمین با z_{cld} نشان داده شده است. بنابراین، z و ζ ، با معادله $z = z_{cld} + \zeta$

¹ Unified Dispersion Model

یک مقطع عرضی بیضی شکل از مدل کلاه مانند را تعریف می کنند که شامل تمامی جرم موجود در ابر دارای پروفایل غلظت نفوذ داده شده توسط معادلات (۱)، (۲)، (۳) است. این مدل تشابه کلی، در نتیجه، تمامی ساده سازی ها و تسهیلات یک مدل کلاه مانند را حفظ می کند، اما در زمان مشابه، باعث پروفایل های غلظت کاملاً کلی می شود.

مساحت ابر تشکیل شده نیز توسط رابطه ی زیر تعریف می گردد.

$$A_{cld} = 2W_{eff} H_{eff} (1 + h_d) \quad (11)$$

که در آن W_{eff} ، H_{eff} توسط معادلات (۸) و (۹) داده شده اند و h_d به این صورت تعریف می گردد:

$$h_d = P \left[\frac{1}{n}, \left(\frac{z_{cld} / \cos \theta}{R_z} \right)^n \right] \quad (12)$$

در اینجا، تابع گاما جزئی، $P(a,b)$ ، به صورت زیر تعریف شده است:

$$P(a,b) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^b t^{a-1} e^{-t} dt \quad (13)$$

با مقادیر محدود کننده: $P(a,0)=0$ ، $P(a,\infty)=1$ به یاد داشته باشید که برای یک پف بالای زمین، $z_{cld}/R_z \gg 1$ به کار می رود. در نتیجه $h_d=1$ و مقطع عرضی پف، یک بیضی کامل است. برای یک پف زمینی، $z_{cld}=0$ به کار می رود؛ در نتیجه $h_d=0$ و مقطع عرضی پف، یک نیمه بیضی است. برای یک پف با حرکت جزئی به سمت زمین، H_{eff} ، ارتفاع موثر ابر در بالای خط مرکزی زمین (مرکز نسبت به قسمت های واقعی و مجازی) است.

مساحت مقطع عرضی مستطیلی A_{cld} ، توسط معادله (۱۱) [پهنای برابر با $2W_{eff}$ ، عمق $H_{eff}(1+h_d)$] تعریف شده است، می تواند تمامی جرم ابر m_{cld} به صورت یک نقطه متمرکز کلاه مانند، تراکم یافته تصور شود ($c=0$) غلظت کلاه استوانه ای هم ارز).

شده $(\rho_{cld} - \rho_a)/\rho_a$ بیان می شود که توسط فرمول (۶) بیان می گردد.

$$m = 2.0 + \left[\frac{12.0r}{\frac{2}{r} + 0.25r - 0.5} \right], r = \frac{(\rho_{cld} - \rho_a)}{\rho_a} \quad (6)$$

رابطه برای n شبیه به روابط گرادیان های شار اتمسفری است که قبلاً توسط بسیاری از کارشناسان بحث گردیده است [۲۹،۳۰،۳۱]. معادله ی (۷)، رابطه دسته های پایداری مختلف را به عنوان تابعی از $Z_f = H_{eff}/|L|$ نشان می دهد که H_{eff} ارتفاع موثر ابر، و L طول Monin-Obukhov (<0) برای اتمسفرهای ناپایدار) می باشد. که بر طبق تعریف، n_{base} برای پایداری های مختلف متفاوت است و مقدار ۲ برای پایداری A-D، ۲/۵ برای E و ۲/۵ را برای F و G به خود اختصاص می دهد.

$$n = \text{Max} \left[n_{base} - \frac{4.5 \frac{H_{eff}}{L}}{1.0 + 9.0 \frac{H_{eff}}{L}}, 1.0 \right] \quad (7)$$

در هر موقعیت در جهت باد x ، ابر UDM می تواند توسط یک ابر هم ارز با ارتفاع موثر $H_{eff}(x)$ ، یک نیم پهنای موثر ابر W_{eff} و سرعت ابر u_{cld} ، و غلظت کلاه مانند هم ارز برابر با غلظت خط مرکزی c_0 توصیف گردد. با استفاده کردن از معادلات (۱)، (۲)، (۳)، داده های موثر ابر می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$H_{eff} = \frac{1}{c(x,y,0)} \int_0^\infty c(x,y,\zeta) d\zeta = \int_0^\infty F_v(\zeta) d\zeta \quad (8)$$

$$= \Gamma(1 + \frac{1}{n}) R_z(x)$$

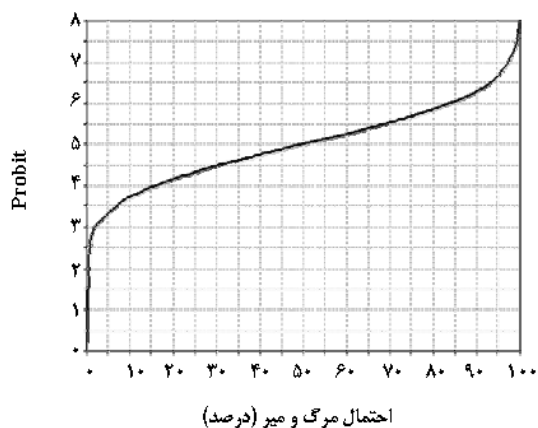
$$W_{eff} = \frac{1}{c(x,0,\zeta)} \int_0^\infty c(x,y,\zeta) dy = \int_0^\infty F_h(y) dy \quad (9)$$

$$= \Gamma(1 + \frac{1}{m}) R_y(x)$$

که تابع گاما $\Gamma(z)$ توسط رابطه زیر تعریف شده است:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (10)$$

تفسیر فیزیکی پهنای و طول موثر این است که پروفایل های غلظت، شکل یافته هستند، به طوری که ابعاد H_{eff} و W_{eff}



شکل ۲- نمودار پرابیت بر حسب احتمال مرگ و میر [۳۳].

۳-۳- اعتبار سنجی بر مبنای تحقیقات پیشین

از پیدایش مدل PHAST و تبدیل آن به نرم افزاری به همین عنوان توسط شرکت DNV و با عنایت به برتری-های این مدل در مقایسه با مدل های مشابهی چون ALOHA، گاوسین، SLAB، HG-SYSTEM و ... در پیش بینی خواص انتشار دامنه وسیعی از مواد چه با دانسیته کمتر یا مساوی با هوا و چه با دانسیته بیشتر از دانسیته هوا، کارهای تحقیقاتی مختلفی با استفاده از آن انجام شده است. مراجع [۱۵ تا ۱۸] و مرجع [۳۴] از جمله این مطالعات است. برای اطلاع دقیق تر از عملکرد مدل PHAST در مقایسه با سایر مدل ها می توان به جدول (۳) که از نتایج بدست آمده از مرجع [۳۴] می باشد مراجعه کرد. در این جدول غلظت بدست آمده از مدل-های مختلف در کنار هم با غلظت واقعی اندازه گیری شده مقایسه شده است.

مدل HG-SYSTEM در جوهای پایدار با سرعت وزش باد کم و در مواردی که سرعت اولیه رهایش مواد کم است دقت کمتری دارد. مدل SLAB علی رغم انجام محاسبات مربوط به تبخیر از سطح حوضچه های مایع، در محاسبه نرخ رهایش مواد از منبع نشستی توانایی لازم را ندارد. مدل ALOHA از دو مدل قبلی دقیق تر است اما همچنان در مواردی که پایداری جو زیاد یا سرعت باد خیلی کم است ضعف هایی در نتایج دارد. در این میان مدل PHAST وضعیت بهتری نسبت به سایر مدل ها دارد

۳-۲-۲- تابع پرابیت

یکی از روش های بررسی پیامد های انتشار مواد و تخمین میزان مرگ و میر ناشی از آن پرابیت می باشد که با معادله ی (۱۴) بیان می گردد.

$$Y = K_1 + K_2 \cdot \ln(C^n \cdot t) \quad (14)$$

Y: مقدار Probit

C: غلظت ماده ی سمی (ppm)

t: زمان مواجهه با ماده ی سمی (min)

K1، K2 و n: مقدارهای ثابت که تابع نوع ماده هستند.

در جدول (۲) این مقادیر ثابت برای تعدادی از ماده های شیمیایی آورده شده است [۳۲].

جدول ۲- مقدار های ثابت Probit برای چند ماده [۳۲].

ماده	K ₁	K ₂	n
آمونیاک	-۹/۸۲	۰/۷۱	۲
کلر	-۱۰/۱	۱/۱۱	۱/۶۵
مونو اکسید کربن	-۳۷/۹۸	۳/۷	۱
سولفید هیدروژن	-۳۱/۴۲	۳	۱/۴۳

مقدار Probit ما بین ۰ و ۸ می باشد و هر چه این عدد بیشتر باشد احتمال مرگ و میر بیشتر است. رابطه ی Probit و احتمال مرگ و میر در شکل (۲) آورده شده است.

در مواردی که پروفایل غلظت مواد سمی در یک مکان با زمان تغییر می کند، به جای جمله ی $C^n \cdot t$ در معادله ی (۱۴) از $(C^n \cdot t)_{eq}$ استفاده می شود که توسط معادله ی (۱۵) محاسبه می گردد:

$$(C^n \cdot t)_{eq} = \int_0^t C^n \cdot t \cdot dt \quad (15)$$

در این معادله ی t زمان مواجهه ی افراد با ابر سمی مواد می باشد.

جدول ۳- مقایسه غلظت های مشاهده شده مدل شده در

فاصله از مرکز (km)	غلظت مشاهده شده (ppm)	غلظت حاصله از مدل (ppm)			
		HG-SYSTEM	ALOH A	SLA B	PHAS T
۰.۱	۵	۷۷۰	۱۲۵۰	۸۳۶	۱۱۳۷
۰.۲	۴۶۸	۴۸۱	۴۳۳	۲۸۰	۲۹۳
۰.۵	۸۴	۸۰	۹۵	۵۸	۵۰
۱	۲۳	۱۵.۹	۱۷	۱۷.۷	۱۴
۲	۶	۳.۶۴	۷.۲	۵.۲	۴.۱
۵		۰.۶۱	۱.۳	۱.۱	۰.۸۴
۱۰		۰.۱۷	۰.۳۴	۰.۳۸	۰.۲۷
۲۵		۰.۰۴۵		۰.۱	

جدول ۴- داده های ورودی مدل

۱	جرم انتشار یافته (تن)
۰/۶	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۸۴	جهت وزش باد (درجه)
-۰/۳	دما (سانتی گراد)
۲	ارتفاع انتشار در بالای سطح زمین (متر)
F	کلاس پایداری

شایان ذکر است که قبلا داده های این آزمایش با نرم افزار SLAB مدل شده است و داده های مربوطه در جدول (۵) در کنار نتایج مدل حاضر - PHAST - آمده است. با مقایسه نتایج می توان دریافت که مدل PHAST نرخ کاهش غلظت در راستای مختصات مکانی در مدل حاضر از روند منطقی تری و در انطباق بیشتری با نتایج تجربی است. جهت مشاهده کامل تابعیت غلظت بر حسب فاصله در این مورد به شکل (۴) توجه شود.

۳-۴- تعریف سناریوی و اعتبارسنجی نتایج با

استفاده از مدل PHAST

سناریو شامل توصیف واقعه ای است که احتمال وقوع آن در آینده می رود. البته احتمال به معنای قطعیت رخ داد نیست بلکه به معنی آن است که با توجه به شرایط موجود، منطقی است که انتظار وقوع آن حادثه را داشته باشیم. به عنوان مثال اگر در یک واحد فرایندی، مخازن بزرگی از مواد سمی یا قابل اشتعال تحت فشار بالا موجود است طبیعی است که احتمال نشستی از این مخزن به عنوان یک سناریو در نظر گرفته شود. تعریف سناریو از مقدماتی ترین اقدامات برای ارزیابی ریسک بوده و مشخص می کند که باید انتظار وقوع چه رخداد هایی را داشته باشیم.

سناریوی اول مورد بررسی در این مطالعه رهایش کلر از مخزن نگهداری آن، مطابق شکل (۱) می باشد شرایط رهایش از نظر زاویه خروجی در شکل مذکور و مشخصات جوی و جغرافیایی مربوطه در جدول (۴) نشان داده شده است. هدف از بررسی و مدل سازی این سناریو این است که نحوه انتشار گاز کلر - ماده سمی - رها شده در اتمسفر بررسی گردد.

جدول ۵- غلظت های مشاهده شده توسط نمونه گیرنده ها و غلظت های مدل شده در این آزمایش [۱۹].

فاصله از مرکز محل آزمایش (m)	غلظت مشاهده شده (ppm)	غلظت مدل شده SLAB	غلظت مدل شده PHAST
۲۵		۳۸۰۰	۱۷۸۹
۵۰	۲۰۳۰	۲۶۴۰	۱۹۹۲
۱۰۰	۲۲۴۰	۱۳۶۰	۲۲۰۰
۲۰۰		۵۸۰	۱۶۸۰
۳۰۰			۶۶۰

در ادامه برای اطمینان از اعتبار مدل، بخشی دیگر از کارهای میدانی و تجربی مرجع [۱۹] انتخاب و تطابق نتایج مدل مقاله حاضر با مدل SLAB و داده های تجربی بررسی شد. شرایط آزمایش - سناریو دوم - به این صورت است که ۲ تن کلر در مخزنی که در دمای ۶ درجه سانتی گراد به حالت دوفازی است در شرایط آب و هوایی پایدار D، با سرعت باد ۶.۲ متر بر ثانیه به مدت ۳۰ ثانیه در محیط تخلیه شده است. شکل (۵) از تطابق بسیار مناسب نتایج مدل مقاله حاضر با مدل SLAB و داده های تجربی حکایت می کند.

۴- بحث و نتایج

در ادامه نتایج حاصل از مدل سازی سناریوی انتشار ارائه می گردد در این راستا نرم افزار PHAST معادلات ذکر شده در مدل UDM را توسط سلسله ای از محاسبات عددی پیشرفته حل کرده و نتیجه ی آن را در قالب نمودارهایی نشان می دهد. این نمودارها شامل نمودارهایی است که دربردارنده ی غلظت بر حسب فاصله، غلظت بر حسب زمان، مساحت و پهنای ابر، ارتفاع ابر و احتمال مرگ و میر ناشی از ماده می باشد. در ادامه به بررسی نمودارهای ذکر شده پرداخته می شود.

در شکل (۶) تغییرات غلظت را در طول زمان در نقطه ای به فاصله ۲۰۰ متر از محل رهائش در سطح زمین نشان داده شده است. آنچه از این شکل پیداست این است که بعد از گذشت تقریباً ۳۱۸ ثانیه غلظت به بیشترین حد خود یعنی حدود ۱۶۸۹ ppm می رسد که مقدار بسیار قابل توجهی است. به علاوه می توان گفت، بعد از گذشت ۲۰۰ ثانیه غلظت می تواند به ۱۰۰۰ ppm برسد که همین غلظت به اندازه ی کافی خفه کننده و کشنده می باشد. با توجه به نمودار می توان به این نتیجه رسید که زمان لازم برای فرار از نقطه مذکور چیزی در حدود ۳ الی ۴ دقیقه می باشد. نکته ی دیگری که حائز اهمیت است این است که در این انتشار، در مدت ۱۶۰۰ ثانیه معادل ۲۶ دقیقه، غلظت در سطح خطرناکی باقی می ماند که این خود مساله ی بسیار هشدار دهنده ای می باشد. از این رو بعد از این مدت زمان دیگر خطری وجود نخواهد داشت. پس مردم و یا پرسنل نباید قبل از این زمان به محل حادثه برگردند.

شکل (۷) نشان دهنده ی مساحت ابر تشکیل شده در مسیر باد است. این شکل بیشینه غلظت موجود در ابر را به تفکیک نشان می دهد. مطابق با این شکل مساحتی در حدود ۷۹۰۴۲، ۳۸۴۶۹ و ۹۶۲۰ متر مربع به ترتیب دارای بیشینه غلظت ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ ppm کلر می باشد. بیشترین سطح مربوط به غلظت ۱۰۰۰ ppm

می باشد که این خود سبب ساز کشتار فوری جمعیت است. لذا این ابر در ناحیه ای به شعاع ۳۰۰ متر منجر به مرگ افراد در کمتر از چند دقیقه می شود. بعنوان یک تصمیم اورژانسی مناسب و ایمن، مردم باید به سرعت مکان حادثه را ترک کرده و در مسیری حرکت کنند که عمود بر مسیر وزش باد باشد.

شکل (۸) نشان دهنده ی ارتفاع ابر تشکیل شده به تفکیک غلظت های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm می باشد که بیشترین ارتفاع برای هر کدام از این غلظت ها به ترتیب ۱/۳ و ۰/۷ متر می باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد ابر کلر شناوری منفی دارد و به همین دلیل به سطح زمین می رسد، بنابراین با توجه ارتفاع های ذکر شده همه ی افراد با قد و سنین مختلف می توانند در معرض این ابر سمی قرار بگیرند. بعنوان یک اقدام ایمنی مناسب، افراد حاضر در محل حادثه، باید در محل های مرتفعی با ارتفاع بیش از ۲ متر (مثل ساختمان بلند) قرار بگیرند.

شکل (۹) بیانگر نمودار پرابیت برحسب فاصله ی در مسیر باد می باشد. این شکل بیشترین عدد پرابیت را در فاصله- ی ۲۵ متری نشان می دهد که با مراجعه به شکل (۳) می توان فهمید که احتمال مرگ بالای ۹۵٪ است. این مساله همچنین در شکل (۱۰) که نشان دهنده ی احتمال مرگ برحسب فاصله ی در مسیر باد است، بیان گردیده است. این شکل نشان می دهد که تا فاصله ی ۳۱۰ متری حادثه احتمال مرگ بالای ۵۰٪ است که بسیار نگران کننده است.

۵- نتیجه گیری

کلر عنصر شیمیایی مهمی در تصفیه آب، مواد گندزدا در سفید کننده و نیز در گاز خردل به شمار می رود. همچنین کلر در ساخت طیف وسیعی از اقلام روزمره کاربرد دارد. ضمن آنکه واحدهای صنعتی بزرگی اعم از پتروشیمی های کلرآلکالی و تولید کنندگان کلر با آن سر و کار دارند.

- کلر موجب تحریک دستگاه تنفسی می شود. تماس دائم با مقادیر کم آن ریه‌ها را ضعیف کرده و آسیب پذیری ریه‌ها را در برابر بیماری‌های دیگر افزایش می دهد. با توجه به مصرف بالای آن و همچنین آثار مخرب آن بر محیط زیست و جامعه، مجموعه آزمایش جک راییت جهت تامین داده های ضروری و پایه و بهبود مدل سازی انجام گردید. مقاله ی حاضر تنها بر یکی از این آزمایش ها که حاوی انتشار یک تن کلر بوده، تمرکز داشته و آن را مدل سازی کرده است. در طی این مدل سازی نواحی پر خطر، مدت زمان انتشار، پهنای ابر و احتمال مرگ محاسبه گردیده است. خلاصه ی نتایج حاصله به صورت زیر می باشد:
- برای فردی در فاصله ۲۰۰ متری از نقطه رهایش تنها بعد از گذشت تقریبا ۳۱۸ ثانیه غلظت به بیشترین حد خود یعنی حدود ppm ۱۶۸۹ می رسد که مقدار بسیار قابل توجهی است. به علاوه می توان گفت، بعد از گذشت ۲۰۰ ثانیه غلظت می تواند به ppm ۱۰۰۰ برسد که همین غلظت به اندازه ی کافی خفه کننده و کشنده می باشد. بنابراین افراد متناسب با فاصله از محل حادثه چند دقیقه فرصت فرار دارند.
- در صورت نشت کلر حتی در مناطقی که سرعت وزش باد قابل توجه نمی باشد کلر به سرعت در محیط پخش می شود و در شعاع قابل توجهی سلامت افراد را دچار مخاطره می کند در صورت نشت کلر تخلیه افراد و هشدار در مورد عدم مراجعه تا اطلاع ثانوی یک امر حیاتی است.
- به عنوان یک اقدام ایمنی، مردم باید به مکان هایی با ارتفاع بیش از ۲ متر (مثل ساختمان بلند) قرار بگیرند تا در معرض غلظت کشنده این ابر نباشند.
- در شرایط مساله مورد بررسی در این مقاله، بیشترین احتمال مرگ در فاصله ی ۲۵ متری مقداری در حدود ۹۵٪ به دست آمد.
- یکی از مهمترین نتایجی که از این مطالعه می توان گرفت این است که می توان به مدل PHAST در پیش بینی نحوه انتشار گازهای سمی و نیز قابل اشتعال به خوبی اعتماد کرد. بهتر است واحدهای صنعتی با استفاده از این مدل و با در نظر گرفتن شرایط جوی و جغرافیایی محل واحد خود و نیز لیستی از مواد خطرناک و موجودی آنها به سناریوسازی انتشار، آتش سوزی و انفجار بپردازند تا از این طریق ضمن اشراف بر مخاطرات و ریسک های واحد خود بتوانند نقشه شرایط اضطرار را نیز تدوین کنند. مدل مذکور می تواند در مباحث پدافند غیرعامل نقش بسیار مهمی ایفا نماید.
- حال با این تفاسیر، باید دید چه تمهیداتی را می توان جهت کاهش این مخاطرات انجام داد که از آن ها می-توان موارد زیر را نام برد:
 - آمادگی کامل در تاسیسات مرتبط با گاز کلر برای پایش نشتی های احتمالی با به کارگیری سامانه های کنترلی و بازرسی های مداوم و کوتاه مدت از تاسیسات و مخازن نگهداری
 - تدوین ضوابط تعیین حریم ایمن برای کارخانه-های تولید کلر و مقررات مربوط به جانمایی احداث آن ها
 - حمل و نقل این ماده در مسیر های امن و کم تردد
 - گذاشتن علائم و برچسب های آگاهی دهنده بر روی مخازن حاوی این مواد
 - آموزش های لازم برای گروه آتش نشانی برای مقابله با این ماده و در صورت امکان هماهنگی با این مراکز در زمان جابجایی مقادیر زیادی از این ماده

- وجود سیستم های اعلام خطر و مکان هایی امن جهت تخلیه به موقع مکان حادثه و پناه بردن به مکانی مشخص که در مسیر وزش باد نباشد.

مراجع

- [1] Eurochlor. (2001). Chlorine Industry Review. Euro Chlor ed. Brussels. 20pp.
- [2] SHD (Syndicat des Halogènes et Dérivés). (2002). Le chlore. 5^eme éd. Syndicat des Halogènes et Dérivés ed. Paris: 249pp. The chlorine institute. In Chlorine: Effects on health and the environment (3rd ed.). Washington. DC: The Chlorine Institute. Inc 8pp.
- [3] International Programme on Chemical Safety (IPCS). (1996). Chlorine. Poisons Information Monograph. PIM 947.
- [4] Tanaka, P.L., Allen, D.A., McDonald-Buller, E.C., Chang, S., Kimura, Y., Mullins, C.B., Yarwood, G., Neece, J.D. (2003). Development of a chlorine mechanism for use in the carbon bond IV chemistry model. J. Geophys. Res. 108. doi:10.1029/2002JD002432. 13 pages.
- [5] Dandrieux-Bony, A., Dimbour, J.-P., Dusserre, G. (2005). A simple model for calculating chlorine concentrations behind a water spray in case of small releases. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 18. 245–253.
- [6] Hearn, J.D., Weber, R., Nichols, R., Henley, M.V., Fox, S. (2013). Deposition of Cl₂ on soils during outdoor releases. Journal of Hazardous Materials. 252–253. 107–114.
- [7] Dillon, M.B. (2009). The role of deposition in limiting the hazard extent of dense gas plumes, J. Hazard. Mater. 164 1293–1303.
- [8] Hanna, S.R., Hansen, O.R., Ichard, M., Strimaitis, D.G. (2009). CFD model simulations of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas. Atmos. Environ. 43. 262–270.
- [9] Dimbour, J.P., Dandrieux, A., Dusserre, G. (2002). Reduction of chlorine concentrations by using a greenbelt. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 15. 329–334.
- [10] Dimbour, J.P., Dandrieux, A., Dusserre, G. (2006). Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases?. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 19. 683–689.
- [11] عدل، ج.، محمد فام، الف.، نظام الدینی، ز. (۱۳۸۶). ارزیابی خطر نشت گاز کلر در ایستگاه های کلر زنی سیستم آب آشامیدنی شهر [۱۱] تهران با روش تجزیه تحلیل درخت خطا، مجله ی علمی پزشکی. دوره ۶، شماره ۴.
- [12] مرتضوی، ب.، پارسا راد، م.، اصیلیمان مهابادی، ح.، خوانین، علی. (۱۳۹۰). بررسی انتشار گاز کلر از مخازن ذخیره به منظور تدوین [۱۲] برنامه ی واکنش در شرایط اضطراری در یک صنعت پتروشیمی، مجله ی سلامت کار ایران. دوره ۸، شماره ۳.
- [13] Ruj, B., Chatterjee, P. K. (2012). Toxic release of chlorine and off-site emergency scenario - A case study. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 25. 650-653.
- [14] Sanchez, E.Y., Colman Lerner, J.E., Porta, A., Jacovkis P.M. (2013). Accidental release of chlorine in Chicago: Coupling of an exposure model with a Computational Fluid Dynamics model. Atmospheric Environment. 64. 47-55.
- [15] Ganci, F., Carpignano, A., Mattei, N., Carcassi, M.N. (2011). Hydrogen release and atmospheric dispersion: Experimental studies and comparison with parametric simulations. international journal of hydrogen energy. 36. 2445-2454.
- [16] Jafari, M.J., Zarei, E., Badri, N. (2012). The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. international journal of hydrogen energy. 37. 19241-19249.

- [17] Witlox, H.W.M., Stene, J., Harper, M., Nilsen, S.H. (2011). Modelling of discharge and atmospheric dispersion for carbon dioxide releases including sensitivity analysis for wide range of scenarios. *Energy Procedia*. 4. 2253–2260.
- [18] Gant, S.E., Kelsey, A., McNally, K., Witlox, H.W.M., Bilio, M. (2013). Methodology for global sensitivity analysis of consequence models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 26. 792-802.
- [19] Hanna, S., Britter, R., Argenta, E., Chang, J. (2012). The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations. *Journal of Hazardous Materials*. 213-214. 406-412.
- [20] Bauer, T.J. (2013). Comparison of chlorine and ammonia concentration field trial data with calculated results from a Gaussian atmospheric transport and dispersion model. *Journal of Hazardous Materials* 254– 255. 325– 335.
- [21] Hanna, S., Strimaitis, D.G., Chang, J.C.. (1991). Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data. *Journal of Hazardous Materials*. 26 .127-158.
- [22] Woodward, J.L., Papadourakis, A. (1995). Reassessment and reevaluation of rainout and drop size correlation for an aerosol jet. *Journal of hazardous material* 44. pp. 209-230.
- [23] Woodward, J.L. (1995). Aerosol drop size correlation and corrected rainout data using models of drop evaporation. International Conference and workshop on modeling and mitigating the accidental releases of hazardous material. CCPS Conference. New Orleans. LA. September. 26-29. pp. 117-148.
- [24] Woodward, J.L., Cook, J., Papadourakis, A. (1995). Modeling and validation of a dispersion aerosol jet. *Journal of hazardeous materials* 44. pp. 185-207.
- [25] Cook, J., Woodward, J.L. (1995). Further development of the Unified Dispersion Model. Symposium on Loss prevention in the Process Industry. Brussels. Belgium.
- [26] Woodward, J.L, Cook, J. (1993). Modelling of dispersion with seamless transition in entrainment mechanism. edge profile and touchdown with the Unified Dispersion Model. AIChE meeting. seattle. WA. august 14-19.
- [27] Cook, J., Woodward, J.L. (1993). A new unified model for jet, dense, passive and buoyant dispersion including droplet evaporation and pool modeling. International Conference and Exhibition on safety. Health and loss perevention in the Oil. Chemical and Process Industries. Singapore. February 15- 19.
- [28] Woodward, J.L., Cook, J. (1995). Turning a complex suite of dispersion models. International Conference and workshop on modeling and mitigating the accidental releases of hazardous material. CCPS Conference. New Orleans. LA. September 26-29. pp. 787-824.
- [29] Businger, J.A., Wyngaard J.C., Izumi, Y., Bradey, E.F.. (1971). Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J Atmos. Sci*. 28.pp. 181-189.
- [30] Dryer, A.J., Hicks, B.B. (1970). Flux gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*. 96. pp. 715-721.
- [31] Lo, A.K., Mcbean, G.A. (1978). On the relative errors in methods of flux calculation. *J Applied Meteorology*. 17. pp. 1704-1711.
- [32] DNV Software PHAST. (2000). Version 6.0. DNV.
- [33] CCPS. (2000). “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”. 2nd Edition. New York. Center for Chemical Process Safety.
- [34] Hanna, S., Dharmavaram, S., Zhang, J., Sykeo, I., Witlox, H., Khajenajafi, Sh., Koslan, K. (2008). Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. *Process Safety Progress*. 3. pp. 248-259.