



بررسی حریم ایمنی ۵ ماده سمی متداول در حوادث حمل و نقل جاده‌ای مواد شیمیایی با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA، PHAST و شاخص CEI: مطالعه موردی اتوبان تهران - قزوین

فریده عتابی^۱، رقیه قربانی^۲، موسی جباری^{۳*}

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۱۲

تاریخ ویرایش: ۹۶/۰۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۳۱

چکیده

زمینه و هدف: حمل و نقل جاده‌ای مواد شیمیایی به علت وقوع حوادث متعدد و پیامدهای حاصله، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مطالعه با هدف تعیین حریم ایمن در حوادث حمل و نقل جاده‌ای مواد شیمیایی سمی به منظور بکارگیری در برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری انجام پذیرفت. **روش بررسی:** در این مطالعه، ابتدا مواد شیمیایی قابل حمل جاده‌ای مورد بررسی قرار گرفته سپس آمونیاک، کلر، ۱-۳ بوتادین، بنزن و تولوئن جهت مطالعات بیشتر و مدل‌سازی انتشار مواد سمی انتخاب شدند. سپس شاخص مواجهه شیمیایی (CEI) تعیین گردیده و رتبه‌بندی خطر انجام شد. در نهایت، مدل‌سازی نحوه انتشار مواد سمی مذکور با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST انجام گردید. **یافته‌ها:** نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از شاخص CEI، آمونیاک، کلر و ۱-۳ بوتادین به ترتیب با شاخص مواجهه ۵۹۷، ۵۴۸ و ۲۸۴ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و نیاز به بررسی بیشتری دارند. در بررسی نهایی که براساس غلظت ERPG-3 انجام گردید، با استفاده از نرم‌افزار ALOHA، آمونیاک با ۲۸۰۰ متر و با استفاده از نرم‌افزار PHAST، کلر با ۳۰۰۴ متر، بیشترین فواصل خطر را دارا بودند. **نتیجه‌گیری:** بررسی نتایج حاصله نشان داد که نرم‌افزارهای مورد استفاده و شاخص CEI، قابلیت لازم در ارائه نتایج صحیح در غلظت‌های پایین (ERPG-1&2) را ندارند. بعلاوه متفاوت بودن نتایج حاصل از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و شاخص CEI، پیشنهاد می‌شود بالاترین فاصله خطر بدست آمده بر اساس ERPG-3 بدون توجه به نوع ماده و نوع نرم‌افزار مورد استفاده، در برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری مدنظر قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: حریم ایمنی، حمل و نقل جاده‌ای، شاخص مواجهه شیمیایی، ALOHA، PHAST، CEI.

مقدمه

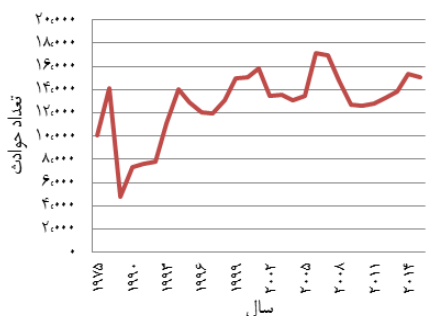
حدود ۳۰۰ میلیون تن در سال است [۳]. بررسی‌های بعمل آمده نشان می‌دهد که روزانه حدود ۸۰۰۰۰۰ محموله مواد خطرناک در این کشور جابجا می‌شود و از هر ۵ کامیون در حال حرکت در بزرگراه‌های آمریکا، یک کامیون حاوی مواد خطرناک است [۴]. در کشور ما نیز رایج‌ترین و آسان‌ترین روش برای جابجایی کالا حمل و نقل جاده‌ای بوده و بیش از ۹۰ درصد جابجایی کالا را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. آمارهای موجود نشان می‌دهد که در داخل کشور سالانه بیش از ۵۰ میلیون تن مواد خطرناک از طریق حمل و نقل جاده‌ای جابجا می‌شوند [۲]. بر طبق گزارش سازمان بررسی انتقال کالای آمریکا

حمل و نقل جاده‌ای متداول‌ترین شیوه حمل و نقل در کشورهای مختلف جهان است. در سراسر جهان خصوصاً در کشورهای صنعتی حمل و نقل مواد خطرناک یک روند افزایشی را نشان می‌دهد [۱]. براساس آمار منتشره توسط سازمان ملل، در حدود نیمی از بارهایی که حمل می‌شوند، متعلق به گروه مواد خطرناک می‌باشند. فراورده‌های نفتی که توسط تانکرهای مخصوص مواد نفتی حمل می‌شوند، سهم عمده‌ای از بارهای حمل شده را تشکیل می‌دهند [۲]. برآوردهای بعمل آمده نشان می‌دهد که در نیمه اول قرن حاضر سالانه بیش از ۴ میلیارد تن مواد خطرناک در سراسر جهان جابجا شده‌اند. این آمار در آمریکا رقمی

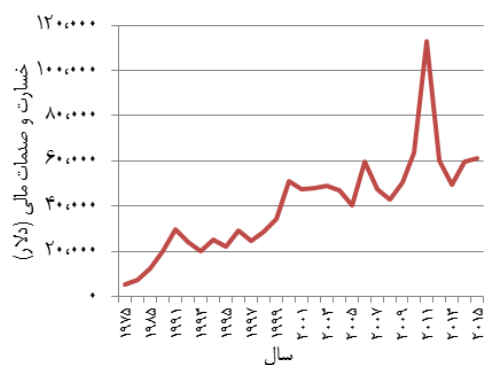
۱- دانشیار، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- (نویسنده مسئول) دانشیار، گروه ایمنی صنعتی، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. jabbarim@sbmu.ac.ir



نمودار ۱- تعداد حوادث مواد خطرناک در آمریکا براساس آمار PHMSA



نمودار ۲- میزان خسارات و صدمات مالی حوادث مواد خطرناک در آمریکا براساس آمار PHMSA

به افراد و اموال در طول مسیر حمل‌ونقل جاده‌ای مطرح باشند و پیامدهای شدیدی از جمله مرگ‌ومیر، صدمات، تخلیه، صدمه به اموال و تخریب محیط‌زیست را به همراه داشته باشند [۱۰]. شایع‌ترین نوع حوادث جاده‌ای طبق بررسی‌های انجام شده توسط یانگ و همکاران، انتشار این مواد به محیط‌زیست می‌باشد که ۸۴/۵ درصد حوادث را به خود اختصاص می‌دهد [۱۱]. همزمان با افزایش حمل‌ونقل مواد خطرناک، نگرانی عمومی در ارتباط با حوادث حمل‌ونقل جاده‌ای به علت عبور از مکان‌های پرجمعیت و محصور افزایش یافته است. نشتی‌های اتفاقی مواد سمی و قابل اشتعال از تانکرهای جاده‌ای به عنوان وقایع آغازگر این‌گونه حوادث قلمداد می‌شوند [۱۲].

یکی از روش‌های موثر در راستای پیشگیری از حوادث، مطالعه پیامد و مدل‌سازی آن‌ها با استفاده از

در سال ۲۰۰۷، حمل‌ونقل مواد خطرناک از ۱۸/۷ بیلیون تن در سال ۲۰۰۲ به ۱۱۱ بیلیون تن در سال ۲۰۰۷ رسیده است که یک افزایش ۹۲/۷ بیلیون تنی را در طول ۵ سال نشان می‌دهد [۶].

با افزایش حمل‌ونقل مواد خطرناک، آمار حوادث و خسارات مالی نیز روزبه‌روز در حال افزایش می‌باشد که در این زمینه می‌توان به آمار آرایه‌شده توسط بخش حمل‌ونقل اداره ایمنی مواد خطرناک و خطوط لوله ایالات متحده آمریکا (PHMSA) اشاره نمود که به وضوح روند افزایشی خود را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، آمار حوادث حمل‌ونقل از ۴۷۵۲ حادثه در سال ۱۹۸۵، به ۱۵۱۱۱ حادثه در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته است (نمودار ۱) و آمار خسارات مالی نیز از ۷۳۳۴ دلار در سال ۱۹۷۵ به ۱۱۳۱۰۳ دلار در سال ۲۰۱۱ و ۶۱۲۵۲ دلار در سال ۲۰۱۵ (نمودار ۲) افزایش را نشان می‌دهد [۷].

در ایران نیز بر اساس آمار و ارقام مندرج در سالنامه آماری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، میزان کالای حمل‌شده توسط شیوه حمل‌ونقل جاده‌ای از ۱/۱۶۶ میلیون تن در سال ۱۳۷۵ به ۶/۴۳۰ میلیون تن در سال ۱۳۸۵ رسیده است که یک افزایش ۵/۳ میلیون تنی را در طول ۱۰ سال نشان می‌دهد [۸].

بررسی آمار حوادث در داخل کشور نیز نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۱، ۱۳۹ حادثه جاده‌ای به‌وسیله خودروهای حامل فرآورده‌های سوختی رخ داده و حدود ۲ میلیون لیتر انواع فرآورده‌ها به دلیل تصادفات نفت-کش‌ها هدر رفته است و ۱۹۲ نفر بر اثر این حوادث فوت کرده و یا مصدوم شدند [۹].

حوادث حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک (HAZMAT)^۱، از جمله مهم‌ترین خطرات جاده‌ای به شمار می‌آیند. گازها و مواد شیمیایی خطرناک اغلب به دلیل ذخیره‌سازی در مخازن تحت فشار و با توجه به شرایط خاص‌شان، می‌توانند به عنوان بزرگ‌ترین خطر

1. Pipeline and Hazardous Material Safety Administration
2. Hazardous Material

یک تحقیق کاربردی می باشد، در نظر است ضمن بررسی تانکرهای حامل مواد خطرناک، مشخص شود که مواد شیمیایی سمی متداول در حمل و نقل جاده‌ای کشور چه موادی هستند و حریم ایمنی آنها با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA، PHAST و شاخص CEI چقدر می باشد. از طرف دیگر نتایج بدست آمده توسط نرم‌افزارها و شاخص فوق چه رابطه‌ای با یکدیگر دارند تا در نهایت، براساس آنها، انجام برنامه‌ریزی‌های لازم به منظور مقابله با شرایط اضطراری برای جمعیت ساکن در اطراف جاده‌ها جهت کاهش خطرات احتمالی امکان پذیر گردد.

روش بررسی

در این تحقیق که در ناوگان حمل و نقل جاده‌ای کشور انجام شد، پس از بررسی مواد شیمیایی متداول در حمل و نقل جاده‌ای مواد خطرناک، از بین مواد مذکور، کلر، آمونیاک، بنزن، تولوئن و ۱-۳ بوتادین به دلیل سمیت بالا، انتخاب شده و سناریوی شکافت کامل تانکر (بدترین وضعیت)، مورد مطالعه قرار گرفت. سپس رتبه‌بندی خطر با استفاده از شاخص مواجهه شیمیایی (CEI) انجام شد و نهایتاً مدل‌سازی نحوه انتشار مواد مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST انجام گردیده و حریم ایمن برای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری تعیین شد. این تحقیق در ناوگان حمل و نقل زمینی کشور انجام شد، شرکت‌های حمل و نقل مواد شیمیایی خطرناک موجود در ناوگان جاده‌ای کشور، مواد مذکور را براساس استاندارد ADR^۶ و با استفاده از سیلندرهای تانکرهای حمل و نقل جاده‌ای ویژه‌ای در ۶ گروه به شرح ذیل جابجا می‌کنند:

۱. تانکرهای گاز (تانکرهای تحت فشار): برای حمل مایعات تحت فشار (گاز) شامل گاز LPG، بوتان، پروپان، پروپیلن، ۱-۳ بوتادین و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمول‌ترین نوع این مخازن دارای ظرفیت

نرم‌افزارها می‌باشد. امروزه مدل‌های مختلفی به منظور مدل‌سازی انتشار گازهای سمی وجود دارند. به منظور تسهیل استفاده از مدل‌های مذکور، نرم‌افزارهای مختلفی مانند^۳PHAST،^۴ALOHA و ... تهیه شده است. با استفاده از نرم‌افزارهای معتبر، می‌توان محدوده متاثر از نشت مواد سمی و خطرناک را مشخص کرده و در ضمن می‌توان با تعیین حریم ایمن (Safe Distance)، اقدامات لازم برای مقابله با شرایط اضطراری را فراهم نمود. یکی دیگر از روش‌های ساده و سریع برای رتبه‌بندی خطر و تعیین فاصله خطر (Hazard Distance)، استفاده از شاخص مواجهه شیمیایی (CEI)^۵، می‌باشد.

بررسی مطالعات انجام شده در خارج از کشور نشان می‌دهد که به منظور مدل‌سازی انتشار مواد خطرناک، مطالعات متعددی با استفاده از نرم‌افزارهای PHAST یا ALOHA برای بررسی حوادث در واحدهای فرایندی [۱۳]، خطوط لوله [۱۴]، حمل و نقل دریایی [۱۵] و حمل و نقل جاده‌ای [۱۰ و ۱۶] انجام شده است. در داخل کشور نیز، تعیین حریم ایمن برای بررسی حوادث خطوط لوله [۱۷ و ۱۸] و واحدهای فرایندی [۱۹ و ۲۰] انجام شده است. تعیین حریم خطر با استفاده از شاخص CEI نیز در بعضی از مطالعات انجام شده است [۲۱]. برخی از محققین نیز به مدل‌سازی حوادث مربوط به یک ماده توسط نرم‌افزارهای مختلف پرداخته‌اند [۲۲].

بررسی تحقیقات مذکور نشان می‌دهد که مطالعات بسیاری در خصوص مدل‌سازی پیامد حوادث در خطوط لوله و واحدهای فرایندی انجام شده است، در حالی که مدل‌سازی پیامد حوادث تانکرهای حمل و نقل جاده‌ای با نرم‌افزارهای فوق‌الذکر و شاخص مواجهه شیمیایی کمتر دیده می‌شود. از طرف دیگر، اغلب مطالعات انجام یافته در واحدهای فرایندی نیز بر روی یک یا دو ماده شیمیایی متمرکز شده‌اند. علی‌هذا، در مقاله حاضر که

³. Process Hazard Analysis Software Tool

⁴. Area Location of Hazardous Atmospheres

⁵. Chemical Exposure Index

⁶. ADR: European Agreement for Carriage Dangerous Goods and Substance by Road

بودن درجه سمیت ($NH=4$) و مرگ‌ومیر ناشی از استنشاق احتمالی آن، معمولاً توسط سیلندر جابجا شده و بندرت توسط تانکر حمل می‌گردد. سیلندره‌های حامل کلر دارای ظرفیت‌های ۴۵، ۶۸ و ۹۰۷ کیلوگرمی یا یک تنی می‌باشند. در این تحقیق، سیلندره‌های ۱ تنی گاز کلر که بیشترین نوع حمل جاده‌ای را شامل می‌شوند انتخاب شده و جهت مدل‌سازی پیامد مورد استفاده قرار گرفتند.

سناریوهای مورد بررسی در حوادث حمل و نقل جاده‌ای: بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که حالت‌های شکست^۷ مختلفی در حوادث حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک وجود دارد. برخی از منابع، سناریوهایی با ابعاد نشستی 10^{mm} ، 35^{mm} ، 50^{mm} و شکافت کامل را به عنوان سناریوهای نشستی تعیین نموده‌اند [۲۳]. برخی از منابع، سناریوها را به سناریوی نشستی کوچک و نشستی بزرگ تقسیم‌بندی نموده و انتشارهایی با حجم ۱۰۰۰-۱ گالن را تحت عنوان نشستی‌های کوچک و انتشارهای بیشتر از ۱۰۰۰ گالن را تحت عنوان نشستی‌های بزرگ در نظر گرفته‌اند. براساس آمار حوادث جاده‌ای، حدود ۶۵ درصد حوادث مربوط به نشستی‌های بزرگ و ۳۵ درصد مربوط به نشستی‌های کوچک می‌باشد [۲۴].

از آنجا که محدوده خطر سناریوهای حوادث با نشستی بزرگ، سناریوهای با نشستی کوچک را نیز پوشش می‌دهند، لذا در تحقیق حاضر، حوادث با نشستی بزرگ یا شکافت کامل مخزن، به عنوان سناریوی اندازه نشستی جهت مدل‌سازی انتشار مواد سمی انتخاب گردید.

غلظت‌های راهنمای برنامه ریزی مقابله با شرایط اضطراری (ERPG):^۸ میزان تلفات و عوارض ناشی از انتشار مواد شیمیایی به غلظت ماده سمی و زمان تماس با آن بستگی دارد. جهت ارزیابی اثرات سمیت مواد شیمیایی، معیارها و پارامترهای گوناگونی وجود دارد. یکی از معیارهای مورد استفاده در این خصوص، ERPG می‌باشد. مقادیر ذکر شده در

۹۸۰۰ گالن می‌باشند. از بین مواد موجود در این گروه، ۳،۱- بوتادین به علت بالا بودن خطر سمیت، جهت مدل‌سازی پیامد مورد استفاده قرار گرفت.

۲. تانکرهای ویژه حمل گاز آمونیاک: با توجه به حساسیت و خطرات زیاد ناشی از حمل گاز آمونیاک، رعایت نکات ایمنی در سطح بالا برای این ماده شیمیایی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. مخازن حامل این دسته از مواد، دارای ظرفیت ۳۲۰۰۰ لیتر بوده و در تحقیق حاضر، به دلیل تردد زیاد در سطح جاده‌های کشور، مورد بررسی و آنالیز پیامد قرار گرفتند.

۳. تانکرهای چهار مواد: به منظور حمل محصولات مایع پتروشیمی، نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمده محمولاتی که توسط این گروه از تجهیزات حمل می‌شوند عبارتند از: نفت، نفت‌گاز، بنزن، تولوئن، بنزین، هگزانول، استایرین منومر، وینیل استات و... . ظرفیت این تانکرها اغلب ۶۰۰۰، ۹۰۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۳۲۰۰۰ لیتر بوده و با توجه به این که در این مطالعه، سمیت مواد مدنظر می‌باشد لذا بنزن و تولوئن که از سمیت بیشتری نسبت به سایر مواد موجود در این گروه برخوردار هستند، انتخاب شده و مدل‌سازی پیامد توسط نرم‌افزارهای PHAST و ALOHA و شاخص مواجهه شیمیایی (CEI) برای این دو ماده شیمیایی انجام گرفت.

۴. تانکرهای سود و اسید: این گروه از تانکرها به دلیل خواص ویژه، به منظور حمل انواع اسید و سود مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر، مواد شیمیایی موجود در این گروه به علت پایین بودن میزان هواپردشان مورد بررسی قرار نگرفتند.

۵. تانکرهای استیل: حساسیت، اهمیت و ماندگاری خواص بعضی از محمولات در مسیر حمل، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور حمل منواتیلن-گلایکول و دی‌اتیلن‌گلایکول، این نوع تانکرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیبات شیمیایی موجود در این گروه به علت دارا بودن درجه خطر بسیار پایین ($NH^7=1$) در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفتند.

۶. سیلندره‌های حمل گاز کلر: گاز کلر به علت بالا

7. Failure

8. Emergency Response Planning Guideline

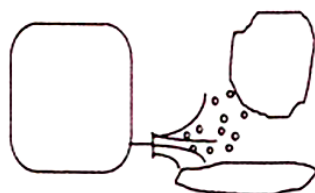
- بخشی از مایعات خروجی به صورت استخر در آمده و بخشی از آن تشکیل ابربخار می‌دهند (شکل ۱-ب).

- همزمان با نشستی یا شکافت، مایعات خروجی به طور سریع و ناگهانی در هوا منتشر شده طوری که مایعات موجود در آن به صورت قطرات کوچک همراه بخار حمل می‌شوند (شکل ۱-ج).

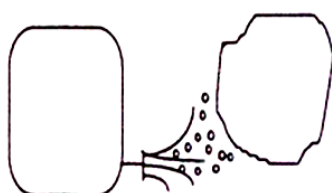
- بعد از تشکیل استخر، مایعات شروع به تبخیر شدن از سطح استخر می‌کنند و پس از تبخیر، با مایعاتی که به طور مستقیم از مخزن وارد هوا شده بودند ترکیب شده و به طرف پایین دست جریان باد



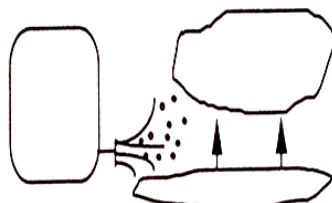
الف) تشکیل استخر



ب) تشکیل استخر و ابربخار



ج) تشکیل ابربخار



د) انتشار مایعات تبخیر شده و ابربخار

شکل ۱- رفتار مایعات خروجی از محل نشستی شکافت مخازن

جدول ۱- مقادیر ERPG مواد شیمیایی مورد مطالعه

| ماده شیمیایی | ERPG - 1 (ppm) | ERPG - 2 (ppm) | ERPG - 3 (ppm) |
|--------------|----------------|----------------|----------------|
| کلر | ۱ | ۳ | ۲۰ |
| بنزن | ۵۰ | ۱۵۰ | ۱۰۰۰ |
| آمونیاک | ۲۵ | ۱۵۰ | ۷۵۰ |
| تولوئن | ۵۰ | ۳۰۰ | ۱۰۰۰ |
| ۳،۱- بوتادین | ۱۰ | ۲۰۰ | ۵۰۰۰ |

راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری (ERPG-1,2,3)، توسط انجمن بهداشت صنعتی آمریکا (AIHA)^۹، تعیین شده است. مقادیر ERPG مواد شیمیایی مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است [۲۵].

شاخص مواجهه شیمیایی (CEI): شاخص

مواجهه شیمیایی یکی از شاخص‌های معتبر به منظور رتبه‌بندی خطرات مواد شیمیایی می‌باشد که در سال ۱۹۹۴ میلادی توسط انستیتوی مهندسی شیمی آمریکا AICHE^{۱۰} منتشر گردیده است. برای محاسبه میزان مواجهه افراد با مواد شیمیایی و تعیین فواصل خطر از این شاخص استفاده شد. بدین منظور پس از تعیین مشخصات مخازن و مواد شیمیایی درون آنها (نقطه جوش، فشاربخار، دما و فشار عملیاتی، حجم ماده درون تانکر و ابعاد مخازن) و مقادیر ERPG-1، ERPG-2 و ERPG-3، میزان انتشار هوا برد محاسبه گردید.

انتشار مواد سمی به صورت بخار یا مایع اتفاق می‌افتد و آلاینده‌های زیست‌محیطی روی هوا، آب و خاک تاثیر می‌گذارند. تخمین میزان مایعاتی که پس از انتشار به صورت هوا برد درمی‌آیند بسیار پیچیده می‌باشد. رفتار مایعات خروجی پس از انتشار از محل نشستی یا شکافت مخازن را می‌توان به اشکال زیر متصور شد [۲۶]:

- مایعات خروجی بر روی زمین پخش شده و تشکیل استخر می‌دهند (شکل ۱-الف).

⁹. American Industrial Hygiene Association

¹⁰. American Institute of Chemical Engineering

استخر W_T ؛ (kg)، کل مایع منتشر شده A_p ؛ (kg)، مساحت استخر (m^2) و ρ_1 ، دانسیته مایع در درجه حرارت عملیاتی (kg/m^3) می‌باشد.

پس از تعیین اندازه استخر، میزان هوابرد تبخیر شده از سطح استخر براساس معادله ۵ محاسبه شد:

$$AQ_p = 9 \times 10^{-4} (A_p^{0.95}) \frac{(MW)P_v}{T+273} \quad (5)$$

که در آن P_v ، فشار بخار مایع در درجه حرارت استخر T ؛ (kPa)، درجه حرارت استخر $(^\circ C)$ و AQ_p ، میزان هوابرد تبخیر شده از سطح استخر (kg/s) می‌باشد.

سپس کل میزان هوابرد از معادله ۶ محاسبه شد:

$$AQ = AQ_f + AQ_p \quad (6)$$

که در آن AQ ، کل میزان هوابرد (kg/s) و AQ_f ، میزان هوابرد حاصل از پاشش (kg/s) می‌باشد. در نهایت، شاخص مواجهه شیمیایی و فاصله خطر از محل حادثه با استفاده از معادلات ۷ و ۸ محاسبه گردید:

$$CEI = 655.1 \sqrt{\frac{AQ}{ERPG-2}} \quad (7)$$

$$HD = 6551 \sqrt{\frac{AQ}{ERPG}} \quad (8)$$

که در آن $ERPGs$ ، مقدار غلظت راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری (mg/m^3) می‌باشد.

بر اساس شاخص مواجهه شیمیایی، مواد شیمیایی دارای CEI بالاتر از ۲۰۰ به بررسی بیشتری نیاز دارند؛ بنابراین در تحقیق حاضر به منظور اطمینان بیشتر، مواد شیمیایی دارای CEI بالاتر از ۲۰۰، جهت ارزیابی‌های بیشتر انتخاب شدند.

مدل‌سازی نحوه انتشار مواد سمی با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST

PHAST: مدل‌سازی انتشار مواد سمی در وضعیت پایداری F و با استفاده از مدل گاز سنگین انجام شد. چهار عامل مورد نیاز برای مدل‌سازی در این روش شامل موقعیت جغرافیایی منطقه، داده‌های اتمسفری، اطلاعات ماده شیمیایی و مشخصات منبع انتشار

منتشر می‌شوند (شکل ۱-د).

در تحقیق حاضر برای محاسبه شاخص مواجهه شیمیایی، مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

میزان هوابرد انتشار گازها با استفاده از معادله ۱ تعیین گردید [۲۶]:

$$AQ = 4.751 \times 10^{-6} D^2 P_a \sqrt{\frac{MW}{T + 273}} \quad (1)$$

که در آن AQ ، میزان هوابرد (kg/s) ؛ P_a ، فشار مطلق (kPa) ؛ MW ، وزن ملکولی ماده (gr) ؛ T ، درجه حرارت $(^\circ C)$ و D ، قطر سوراخ محل نشستی (mm) می‌باشد. میزان هوابرد انتشار مایعات نیز به علت احتمال تشکیل دوفاز، از مجموع میزان هوابرد حاصل از پاشش و میزان هوابرد تبخیر شده از سطح استخر تشکیل شده در اثر انتشار مایعات، تعیین گردید. بدین ترتیب که در ابتدا دبی انتشار مایعات محاسبه شد، سپس کل مایعات منتشر شده تعیین گردید و مقدار پاشیده شده مطابق معادله ۲ محاسبه گردید.

$$F_v = \frac{C_p}{H_v} (T_s - T_b) \quad (2)$$

که در آن T_b ، نقطه جوش طبیعی مایع $(^\circ C)$ ؛ T_s ، درجه حرارت عملیاتی مایع $(^\circ C)$ ؛ H_v ، گرمای نهان تبخیر مایع (J/kg) و C_p ، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت مایع $(J/kg/^\circ C)$ می‌باشد.

میزان هوابرد حاصل از پاشش (AQ_f) برابر خواهد بود با:

$$AQ_f = 5(F_v)(L) \quad (3)$$

که در آن L ، میزان انتشار مایع (kg/s) می‌باشد. پس از تعیین میزان هوابرد حاصل از پاشش، اندازه استخر تشکیل شده با استفاده از معادله ۴ تعیین گردید.

$$W_p = W_T(1 - 5F_v) \quad (4)$$

$$A_p = 100 \frac{W_p}{\rho_1}$$

که در آن W_p ، جرم کلی مایعات وارد شده به

می‌باشند:

الف) موقعیت جغرافیایی منطقه: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق اتوبان کرج می‌باشد که در طول جغرافیایی $59^{\circ} 50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 50'$ شمالی و ارتفاع ۱۳۶۹ متری از سطح دریا قرار دارد.

ب) داده‌های اتمسفری: داده‌های هواشناسی کرج از سال ۲۰۱۵-۱۹۸۵ میلادی مورد مطالعه قرار گرفت. براساس داده‌های مذکور، دمای متوسط هوا در این منطقه، $15/61$ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۴۸ درصد، سرعت متوسط باد $4/8$ مایل بر ساعت ($2/15$ متر بر ثانیه) و جهت باد غالب 315 درجه (NW) می‌باشد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی بدترین شرایط آب‌وهوایی از نظر انتشار مواد سمی جهت برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری مدل‌سازی پیامد براساس وضعیت پایداری F (کاملاً پایدار) انجام شد.

ج) اطلاعات ماده شیمیایی: در این تحقیق، به منظور بررسی چگونگی انتشار مواد سمی و مدل‌سازی آنها، اطلاعات مواد شیمیایی مورد بررسی از قبیل آمونیاک، بنزن، $3-1$ بوتادین، تولوئن و کلر، شامل غلظت‌های ERPG، نقطه جوش، فشاربخار، دما و فشار عملیاتی و حجم ماده درون تانکر در بخش‌های مربوطه وارد گردید.

د) مشخصات منبع انتشار: مشخصات منبع انتشار از قبیل حجم تانکرهای حامل مواد شیمیایی و طول و قطر آنها با توجه به سناریوی تعریف شده که در تحقیق حاضر، شکافت کامل مخزن می‌باشد تعیین شد و نحوه انتشار آنها (آنی-دائم) و همچنین مشخصات محل مورد بررسی از قبیل فاصله از محل نشستی، غلظت ماده در فواصل تعیین شده و همچنین معیار ارزیابی از قبیل ERPG، IDLH و STEL وارد گردید.

پس از ورود اطلاعات مربوطه به نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و نیز محاسبه شاخص CEI، مقایسه نتایج انجام گردیده و فواصل خطر احتمالی

تعیین شد و نهایتاً پیشنهادهای لازم برای مقابله با شرایط اضطراری ارائه گردید.

یافته‌ها

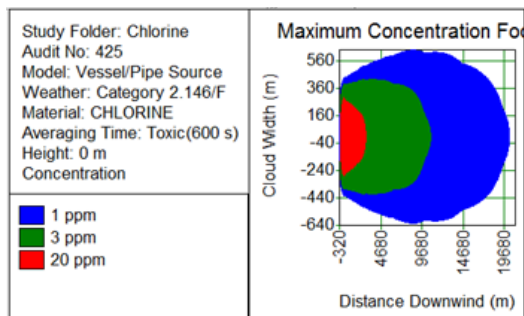
در این بخش، نتایج بررسی حوادث احتمالی حمل و نقل جاده‌ای مواد خطرناک و رتبه‌بندی آنها با استفاده از شاخص CEI و مدل‌سازی نحوه انتشار این مواد با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST ارائه خواهد شد.

نتایج حاصل از محاسبه شاخص مواجهه شیمیایی و تعیین فاصله خطر: محاسبه شاخص CEI نشان داد که از بین ۵ ماده شیمیایی مورد مطالعه، آمونیاک، کلر و $3-1$ بوتادین، CEI بالای ۲۰۰ داشتند. نتایج حاصله در نمودار ۳ ارائه شده است: محاسبات انجام شده و بررسی نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که تانکر حاوی آمونیاک با دارا بودن شاخص مواجهه 597 ، بالاترین میزان مواجهه را دارا می‌باشد. پس از آمونیاک، سیلندر گاز کلر با میزان مواجهه 548 و تانکر حاوی $3-1$ بوتادین با میزان مواجهه 284 در رده‌های بعدی قرار داشته و به بررسی بیشتری نیاز دارند.

فاصله خطر سمیت مواد مورد مطالعه از محل شکافت تانکرهای حامل مواد سمی بر اساس معیارهای ERPG-1، ERPG-2 و ERPG-3 در جدول ۲ ارائه شده است.

تعیین فاصله خطر براساس ERPG-3، نشان داد که آمونیاک با داشتن فاصله خطر 2672 متر، دارای بالاترین فاصله خطر می‌باشد. فاصله خطر براساس ERPG-1 و ERPG-2 با توجه به محاسبات به عمل آمده برای آمونیاک به ترتیب 10000 و 5974 متر می‌باشد.

بررسی معیارهای ERPG-1، ERPG-2 و ERPG-3 نشان می‌دهد که تعیین فاصله خطر با استفاده از معیار ERPG-1، براساس عدم ایجاد مزاحمت یا احساس بوی ناخوشایند تعیین می‌گردد. در معیار ERPG-2، تعیین فاصله خطر براساس عدم



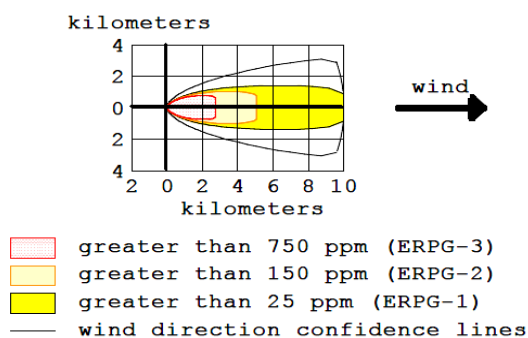
شکل ۳- فاصله خطر سمیت برای تانکر حامل گاز کلر در شرایط اتمسفری کلاس پایداری F در سطوح مختلف ERPG توسط نرم‌افزار PHAST

نرم‌افزار ALOHA

شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، براساس نرم‌افزار ALOHA، از بین مواد مورد مطالعه، آمونیاک دارای بالاترین فاصله خطر سمیت می‌باشد. از طرفی دیگر، فواصل خطر مواد شیمیایی مورد مطالعه در غلظت‌های پایین (ERPG-1&2)، از پراکندگی بیشتری نسبت به یکدیگر برخوردار بوده در حالی که در غلظت‌های بالا (ERPG-3)، فواصل خطر به هم نزدیک‌تر می‌باشند.

نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار ALOHA، برای تانکر حامل آمونیاک و میزان انتشار آن در غلظت‌های ERPG-1، ERPG-2، ERPG-3 و ERPG-3، در کلاس پایداری F در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج ارایه شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که ناحیه



شکل ۲- فاصله خطر سمیت در شرایط اتمسفری کلاس پایداری F برای تانکر حامل آمونیاک در سطوح مختلف ERPG توسط نرم‌افزار ALOHA



نمودار ۳- مقادیر شاخص CEI برای مواد سمی مورد مطالعه در ناوگان حمل‌ونقل جاده‌ای مواد خطرناک

جدول ۲- فاصله خطر سمیت از محل شکافت تانکرهای حامل مواد شیمیایی خطرناک موجود در ناوگان حمل‌ونقل جاده‌ای براساس شاخص CEI

| ردیف | مواد شیمیایی | فاصله خطر (متر) |
|------|--------------|--------------------------------|
| ۱ | آمونیاک | ۱۰۰۰۰ (HD ₁ ERPG-1) |
| ۲ | کلر | ۹۴۸۵ (HD ₂ ERPG-2) |
| ۳ | ۳،۱- بوتادین | ۲۸۴۲ (HD ₃ ERPG-3) |
| ۴ | بنزن | ۶۸۹ |
| ۵ | تولوئن | ۲۶۷ |

ایجاد آسیب جدی یا غیر قابل جبران یا عدم توانایی انجام اقدامات ایمنی می‌باشد. در حالی که در معیار ERPG-3، تعیین فاصله خطر براساس عدم ایجاد اثرات تهدیدکننده زندگی می‌باشد که در خارج از این محدوده نباید چنین اثراتی دیده شود. از آنجا که در محل بروز حوادث حمل‌ونقل جاده‌ای، امکان بروز خطرات تهدیدکننده زندگی خصوصاً در لحظات اولیه مواجهه وجود دارد، لیکن به منظور جلوگیری از بروز خطرات احتمالی، در تحقیق حاضر، ERPG-3 به عنوان معیار اصلی در ارزیابی‌ها و مقایسه فواصل خطر، مدنظر قرار گرفت.

نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار ALOHA برای مدل‌سازی نحوه انتشار مواد سمی:
 نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار ALOHA، برای تعیین فاصله خطر سمیت از محل حادثه، با توجه به غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری برای ۵ ماده مورد مطالعه، در نمودار ۴ ارایه

کلاس پایداری F، فاصله خطر سمیت گاز کلر در سطح ERPG-3 (غلظت ۲۰ پی پی ام)، برابر با ۳۰۰۴ متر، در سطح ERPG-2 (غلظت ۳ پی پی ام)، برابر با ۱۰۹۸۳ متر و در سطح ERPG-1 (غلظت ۱ پی پی ام)، برابر با ۲۰۰۲۷ متر می باشد.

مقایسه نتایج بدست آمده با شاخص CEI و نرم افزارهای ALOHA و PHAST: بررسی فواصل خطر تعیین شده برای مواد مورد بررسی توسط شاخص CEI و نرم افزارهای ALOHA و PHAST، اختلافات گسترده ای را نشان می دهد. نتایج مقایسه ای فواصل خطر تعیین شده توسط شاخص CEI و نرم افزارهای مذکور برای تک تک مواد مورد بررسی از محل حادثه، با توجه به غلظت های ERPG، در نمودارهای ۶ تا ۱۰ ارائه شده است.

نمودار ۶ نشان می دهد که در غلظت بالا (براساس ERPG-3)، نرم افزارهای ALOHA و PHAST و نیز شاخص CEI، برای آمونیاک نتایج نسبتاً نزدیکی ارائه نموده اند درحالی که در غلظت پایین (ERPG-1)، فواصل خطر حاصله، از پراکندگی زیادی نسبت به هم برخوردارند؛ به عبارت دیگر، نرم افزارها قابلیت لازم در ارائه نتایج صحیح در غلظت های کم برای آمونیاک را ندارند. از طرفی، براساس ERPG-3، نرم افزار ALOHA بالاترین فاصله خطر را برای آمونیاک، نسبت به PHAST و CEI نشان می دهد.

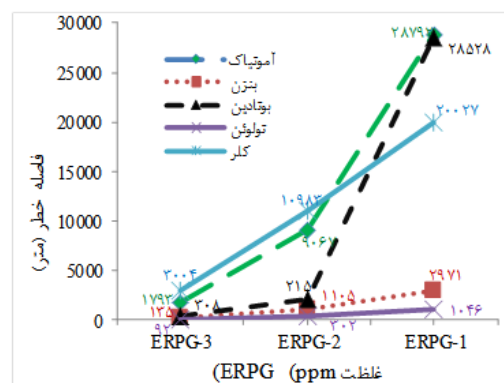
تهدید قرمز، فاصله خطر سمیت آمونیاک در سطح ERPG-3 (۷۵۰ پی پی ام) تا فاصله ۲۸۰۰ متری در جهت پایین دست جریان باد، ناحیه تهدید نارنجی، فاصله خطر سمیت آمونیاک در سطح ERPG-2 (۱۵۰ پی پی ام) تا فاصله ۵۱۰۰ متری در جهت پایین دست جریان باد و ناحیه تهدید زرد، فاصله خطر سمیت آمونیاک در سطح ERPG-1 (۲۵ پی پی ام) تا فاصله حداقل ۱۰۰۰۰ متری در جهت پایین دست جریان باد در شرایط اتمسفری پایدار کلاس F، گسترش می یابد.

نتایج حاصل از اجرای نرم افزار PHAST برای مدل سازی نحوه انتشار مواد سمی: نتایج حاصل از اجرای نرم افزار PHAST، برای تعیین فاصله خطر سمیت مواد مذکور از محل حادثه، در غلظت های ERPG-1,2,3 در نمودار ۵ ارائه شده است.

بررسی نتایج ارائه شده در این نمودار نشان می دهد که بر اساس معیارهای ERPG-2 و ERPG-3، کلر دارای بالاترین و تولوئن دارای پایین ترین فاصله خطر سمیت بین کلیه مواد مورد بررسی می باشد.

نتایج مدل سازی انتشار سمیت سیلندر حامل گاز کلر، با استفاده از نرم افزار PHAST، در شکل ۳ ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در این شکل نشان می دهد که در



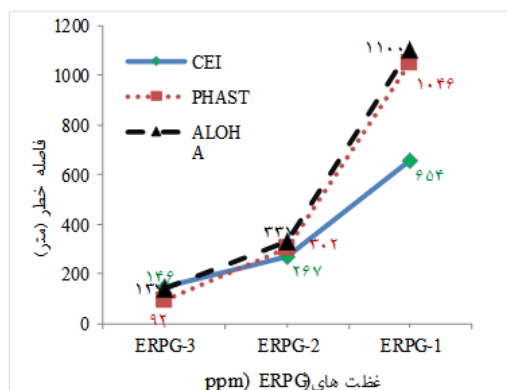
نمودار ۵- پیش بینی فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکرهای حامل مواد سمی براساس غلظت های ERPG توسط نرم افزار PHAST

پراکندگی زیادی نسبت به هم برخوردارند. از طرفی، براساس ERPG-3، نرم افزار ALOHA، بالاترین فاصله خطر را برای بنزن، نسبت به نرم‌افزار PHAST و شاخص CEI نشان می‌دهد.

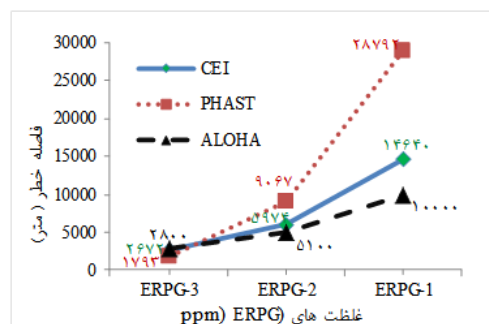
نتایج ارایه شده در نمودار ۸ نشان می‌دهد که فواصل خطر بدست آمده برای ۳،۱- بوتادین، در غلظت ERPG-3، توسط نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و نیز شاخص CEI، نسبتاً به هم نزدیک بوده در حالی که در غلظت پایین (ERPG-1)، فواصل خطر حاصله، از پراکندگی زیادی نسبت به هم برخوردارند؛ به عبارت دیگر، نرم‌افزارها قابلیت لازم در ارایه نتایج صحیح در غلظت‌های کم برای ماده مذکور را دارا نمی‌باشند. از سوی دیگر، بر اساس ERPG-3، ALOHA بالاترین فاصله خطر را نسبت به PHAST و شاخص CEI برای این ماده تعیین نموده است.

نتایج ارایه شده در نمودار فوق نشان می‌دهد که در ERPG-3، نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و شاخص CEI، نسبت به هم نتایج نزدیکی ارایه نموده‌اند. در ضمن، براساس ERPG-3، شاخص CEI بالاترین فاصله خطر را برای تولوئن، نسبت به PHAST و ALOHA تعیین نموده است.

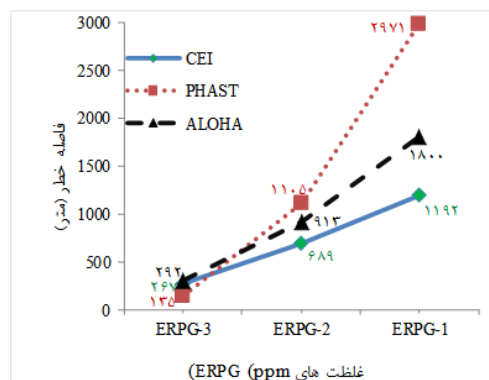
نتایج ارایه شده در نمودار ۱۰ نشان می‌دهد که در ERPG-3، نرم‌افزار ALOHA و نیز شاخص CEI،



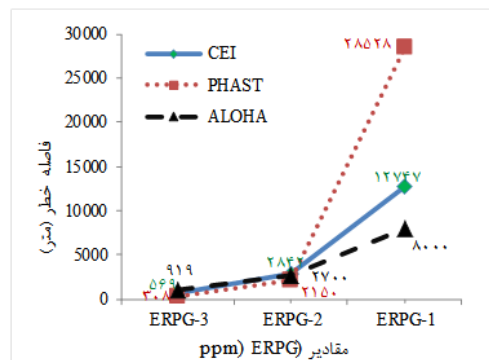
نمودار ۹- فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکر حامل تولوئن براساس غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری



نمودار ۶- فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکر حامل گاز آمونیاک براساس غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری



نمودار ۷- فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکر حامل بنزن براساس غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری



نمودار ۸- فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکر حامل ۳،۱- بوتادین براساس غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری

نتایج ارایه شده در نمودار ۷ نیز نشان می‌دهد که در غلظت بالا (براساس ERPG-3)، برای بنزن، نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و نیز شاخص CEI، نتایج نسبتاً نزدیکی ارایه نموده‌اند در حالی که در غلظت پایین (ERPG-1)، فواصل خطر حاصله، از

بنزن)، PHAST در یک مورد (کلر) و CEI در یک مورد (تولوئن) بالاترین فاصله خطر را نشان می‌دهند.

بحث و نتیجه‌گیری

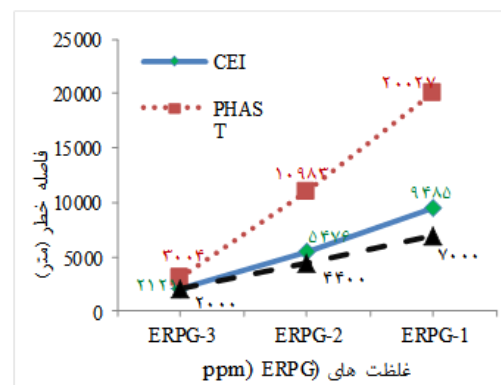
در تحقیق حاضر مواد شیمیایی مختلف از قبیل آمونیاک، کلر، ۳،۱- بوتادین، بنزن و تولوئن از بین مواد شیمیایی مختلف در ناوگان حمل‌ونقل جاده‌ای کشور انتخاب گردیدند و مدل‌سازی انتشار براساس میانگین درجه حرارت و سرعت باد در شرایط اتمسفری پایدار کلاس F انجام گردید.

بررسی نتایج حاصله با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و همچنین شاخص CEI، نشان داد که تطابق یکسانی بین نتایج حاصله وجود ندارد. هر چند در بسیاری از موارد نتایج ALOHA به CEI نزدیک‌تر می‌باشد. از طرف دیگر، براساس معیار ERPG-3، در بین مواد شیمیایی مورد مطالعه، آمونیاک بالاترین فاصله خطر را با استفاده از شاخص CEI (با فاصله خطر ۲۶۷۲ متر) و با استفاده از نرم‌افزار ALOHA (با فاصله خطر ۲۸۰۰ متر) به خود اختصاص می‌دهد، در حالیکه با استفاده از نرم‌افزار PHAST، کلر (با فاصله خطر ۳۰۰۴ متر) دارای بیشترین فاصله خطر می‌باشد.

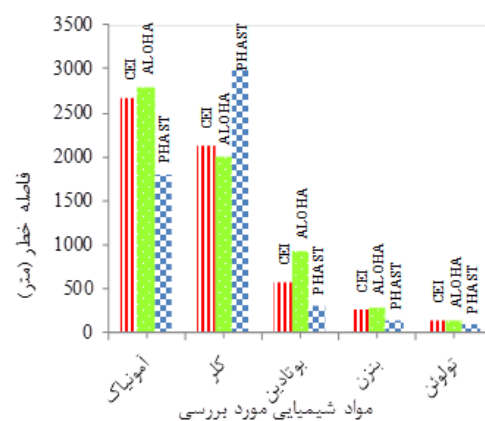
مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیقات چاکرابارتی و همکاران (۲۰۱۱) که با استفاده از نرم‌افزار ALOHA انجام شده بود، نشان می‌دهد که تطابق نسبتاً یکسانی بین نتایج حاصله در دو تحقیق وجود دارد. در هر دو تحقیق، حجم سیلندر گاز کلر مورد مطالعه برابر یک تن بوده و سناریوی انتخابی، شکافت کامل در نظر گرفته شده است. فاصله خطر برای شکافت کامل سیلندر گاز کلر با استفاده از نرم‌افزار ALOHA، در تحقیق چاکرابارتی ۱/۹ کیلومتر و در تحقیق حاضر، ۲ کیلومتر تخمین زده شده است. علت اختلاف جزئی در فواصل خطر را می‌توان به عواملی از قبیل شرایط جوی حاکم در منطقه مورد مطالعه در دو تحقیق نسبت داد. به عنوان نمونه، در تحقیق چاکرابارتی، سرعت باد ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است،

نتایج نزدیکی نسبت به هم برای گاز کلر، ارزیابی داده‌اند. افزون‌براین، براساس ERPG-3، نرم‌افزار PHAST بیشترین فاصله خطر را برای کلر، نسبت به ALOHA و CEI نشان می‌دهد.

بررسی مقایسه‌ای فواصل خطر تعیین شده توسط نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و شاخص CEI براساس غلظت‌های ERPG-3 برای مواد شیمیایی مورد بررسی در نمودار ۱۱ ارزیابی شده است. همانطور که در نمودار مقایسه‌ای فوق مشاهده می‌شود، ALOHA در سه مورد (آمونیاک، بوتادین و



نمودار ۱۰- فاصله خطر حادثه شکافت کامل تانکر حامل گاز کلر براساس غلظت‌های راهنمای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری



نمودار ۱۱- مقایسه فواصل خطر تعیین شده توسط نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و شاخص CEI براساس معیار ERPG-3 برای مواد شیمیایی مورد بررسی

نرم‌افزار ALOHA پرداخته اند با نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در هر دو مطالعه حریم ایمن برای غلظت‌های مقابله با شرایط اضطراری ERPG-1 و ERPG-2 گاز کلر تعیین شده است. حجم گاز کلر مورد بررسی در مطالعه تی‌سنگ ۲ تن بود ولی در مطالعه حاضر یک تن می‌باشد. فواصل خطر بدست‌آمده برای ERPG-1 و ERPG-2 در مطالعه تی‌سنگ به ترتیب ۸/۱ و ۵/۲ کیلومتر و در مطالعه حاضر ۷ و ۴/۴ کیلومتر بود که با توجه به اختلاف موجود در حجم کلر مورد بررسی، منطقی به نظر می‌رسد [۲۳].

مقایسه نتایج ارزیابی شده در این تحقیق، با نتایج تحقیقات هانا، استیون (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که فواصل خطر ارزیابی شده توسط نرم‌افزارهای مختلف، در بعضی مواقع اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. هانا در تحقیق خود، حوادث تانکرهای ریلی حاوی کلر را توسط نرم‌افزارهای مختلف مورد مقایسه قرار داده است. از لحاظ اختلاف نتایج، در غلظت ۲۰ppm (ERPG-3)، مطالعات هانا بین نتایج ALOHA و PHAST اختلاف ۴۶۳ تا ۵۴۰۰ متری را نشان می‌دهد و نسبت بین آنها (PHAST/ ALOHA) حدود ۰/۶ تا ۱/۵ می‌باشد. در حالیکه در مطالعه حاضر اختلاف بین نتایج ALOHA و PHAST برابر ۱۰۰۴ متر با نسبت ۱/۵ است. همانطور که دیده می‌شود در غلظت ۲۰ppm، نسبت فواصل خطر محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزارهای PHAST و ALOHA کاملاً با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد [۲۴].

بنابراین بعلاوه متفاوت بودن نتایج حاصل از نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST و شاخص CEI و عدم امکان مقایسه آنها با مقادیر واقعی یا اندازه‌گیری غلظت انتشار این مواد در محیط واقعی، از سوی دیگر، عدم قابلیت نرم‌افزارهای مورد استفاده و شاخص CEI، در ارزیابی نتایج صحیح در غلظت‌های پایین (ERPG-1&2)، پیشنهاد می‌شود بالاترین فاصله خطر بدست‌آمده با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA

در حالیکه در تحقیق حاضر با توجه به شرایط جوی منطقه مورد مطالعه که اتوبان تهران - قزوین می‌باشد، برابر ۲/۱۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۱۰].

مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه کاشی و همکاران (۱۳۸۸) نشان می‌دهد تطابق خوبی بین این دو تحقیق وجود دارد. براساس هر دو تحقیق و با استفاده از نرم‌افزار PHAST، کلر دارای بیشترین فاصله خطر می‌باشد [۲۰].

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات جهانگیری و همکاران (۱۳۸۹) که با استفاده از شاخص CEI جهت تعیین حریم خطر انتشار مواد شیمیایی سمی در یک صنعت پتروشیمی انجام شده بود، نشان می‌دهد که در هر دو تحقیق، سناریوی انتخابی شکافت کامل در نظر گرفته شده است. از بین مواد مورد بررسی در تحقیق جهانگیری، براساس غلظت‌های ERPG-3، بیشترین حریم خطر مربوط به ماده کلر با فاصله خطر ۱۳۳۹ متر بود. در تحقیق حاضر نیز دو ماده شیمیایی آمونیاک و کلر به ترتیب با فواصل خطر ۲۶۷۲ متر و ۲۱۲۱ متر بیشترین حریم خطر را به خود اختصاص داده‌اند که تا حدود زیادی با تحقیق حاضر مطابقت دارد. اختلافات موجود در فواصل خطر نیز مربوط به شرایط عملیاتی مورد بررسی در دو تحقیق می‌باشد [۲۱].

مقایسه نتایج مطالعه جباری و همکاران (۲۰۰۹) که بر روی خطوط لوله منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر انجام شده بود با مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در هر دو مطالعه شاخص CEI و نرم‌افزار ALOHA به منظور تعیین حریم ایمنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بررسی اختلاف موجود بین شرایط و حجم نشستی در دو مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که امکان مقایسه نتایج با یکدیگر وجود ندارد ولی در مجموع، اهمیت استفاده از روش‌های مختلف مدل سازی پیامد را برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر روشن می‌سازد [۲۲].

مقایسه نتایج تحقیقات تی‌سنگ و همکاران (۲۰۱۲) که به مقایسه حریم ایمنی سه ماده سمی با

Transportation Research Part C. 2009;17:175 -196.

4. Linda AR, Ningxiong X, Dean J. Game theory-based identification of facility use restrictions for the movement of hazardous materials under terrorist threat, *Transportation Research Part E*. 2012; 48:115 - 131.

5. Seyedi M.D, Kalhori E, hasanbeighi M. Provided a method risk assessment road transportation of dangerous materials. The first conference hazardous material transport and its environmental impacts. 2010.

6. Xie Y, Lu W, Wang W, Quadrifoglio L. A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation. *Journal of hazardous materials*. 2012;227-228:135-141.

7. United States Department of Transportation. Hazardous Materials Fatalities, Injuries, Accidents, and Property Damage Data. Bureau of Transportation Statistics. Available from: http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/available_02_06.html.

8. Roshandeli M. Statistical yearbook of Road Transport between 1375 to 1385. Available from: <http://vista.ir/article/292353>. February 12, 2017.

9. Necessary schemes to reduce accidents vehicles carrying fuel. Available from: <http://nakhl-news.rozblog.com/post/58>.

10. Chakrabarti UK, Parikh JK. Route risk evaluation on class-2 hazmat transportation. *Process Safety and Environmental Protection*. 2011; 89(4):248-260.

11. Yang J, Li F, Zhou J, Zhang L, Huang L, Bi J. A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008. *Journal of Hazardous materials*. 2010;184(1): 647-653.

12. Jabbari M, Khodaparast E, Sadri K, Kavousi A, Khalou S. A survey on hazardous materials accidents during road transport in Iran. *Iran Occupational Health Journal*. 2011; 11(5): 30-42. [Persian]

13. Sharma RK, Gurjar BR, Wate SR, Ghuge SP, Agrawal R. Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. accident at Jaipur, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26: 82-90.

14. McGillivraya A, Sawa JL, Diego Lisbona D, Wardmana M, Bilio M. A risk assessment methodology for high pressure CO₂ pipelines using integral consequence modelling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92:17-26.

15. Bariha N, Mishra IM, Srivastava VC. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG

و PHAST، براساس ERPG-3 که کاربردی‌تر از سایر غلظت‌ها (ERPGs) برای برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری می‌باشد، بدون توجه به نوع ماده و نوع نرم‌افزار مورد استفاده، در برنامه‌ریزی مقابله با شرایط اضطراری مدنظر قرار گیرد. براساس پیشنهاد اخیر، فاصله خطر حاصله با استفاده از نرم‌افزار PHAST برای گاز کلر که برابر ۳۰۰۴ متر می‌باشد، بهترین فاصله برای جلوگیری از بروز خطرات تهدید-کننده زندگی در مدت زمان حضور یک ساعته در مجاورت مواد شیمیایی است. هر چند حریم ایمنی مناسب، فواصل خطر براساس معیار ERPG-1 می‌باشد که فاصله ۲۸۷۹۲ متری از محل بروز حادثه براساس نرم‌افزار PHAST برای آمونیاک بوده و در فاصله دورتر از آن همه افراد می‌توانند به مدت یک ساعت در معرض آن قرار بگیرند، بدون آن که مزاحمتی برای آنها ایجاد کند یا بوی ناخوشایندی داشته باشد. از طرف دیگر، شاخص CEI نیز به علت برآورد سریع و نیاز به داده‌های محدود، بهترین گزینه برای تعیین سریع فواصل خطر می‌باشد. هرچند از نظر دقت نتایج، از اهمیت کمتری نسبت به نرم‌افزارهای فوق برخوردار است.

در انتها پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، نتایج حاصل از بررسی فواصل خطر با نرم‌افزارها و شاخص مذکور با غلظت‌های واقعی مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد تا ضمن تعیین دقیق دقت هر یک از ابزارهای فوق‌الذکر، امکان مقابله با شرایط اضطراری با دقت بیشتری فراهم گردد.

منابع

1. Nicola P, Gabriele L, Menso M, Sarah B, Gigliola S, Valerio C. Risk reduction in road and rail LPG transportation by passive fire protection, *Journal of Hazardous Materials*. 2009;167:332 -344.
2. Characteristics of transporting hazardous materials and its types. Available from: <http://dangeroussubstances.mihanblog.com>
3. Lucio B, Massimiliano C, Stefano G. A bilevel flow model for hazmat transportation network design,



Three Recent Chlorine Railcar Accidents. Published on behalf of the AIChE. 2008;27:248-259.

23. ARAMIS. Delvosaiie C, Fieves C, Pipart A. Generic frequencies data for the critical events. Appendix 10. July 2004.

24. CCPS. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs, AIChE, New York, 1994.

25. AIHA. American Industrial Hygiene Association, New York, 2008.

26. DOW'S. Chemical Exposure Index Guide (CEI), AIChE, New York, 1994; 11-16.

truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016;40:449-460.

16. Inanloo B, Tansel B. Explosion impacts during transport of hazardous cargo: GIS-based characterization of overpressure impacts and delineation of flammable zones for ammonia. Journal of Environmental Management. 2015;156:1-9.

17. Jabbari M, Kavousi A. Consequence Analysis of Flammable Chemical Releases from a pipeline. The Fourth International Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO 2011). Kunming and Lijiang, Yunnan, China, April 15-19, 2011.

18. Jabbari M, Sajjadi SMH, Gholamnia R. Determination of airborne quantity and consequence analysis of 1,3-butadiene release from a petrochemical plant pipeline. Kuala Lumpur, Malaysia, Asian Pacific Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, November 12-13, 2012.

19. Rashtchian D, Lak A. Risk analysis ammonia tanks. Iran Chemistry and Chemical Engineering Journal. 2007;26(4):19-28. [Persian]

20. Kashi E, Nasehpoor S, Kareshki H, Farmad M. Analysis of accidents in refineries process. The Third National Conference on Safety Engineering and HSE Management. HSE. 2009. [Persian]

21. Jahangiri M, Parsarad M. Determination of hazard distance of chemical release in a petrochemical industry by chemical exposure index (CEI). Iran Occupational Health Journal. 2010;7(3): 49-59 [Persian].

22. Jabbari Gharabagh M, Asilian H, Mortazavi SB, Zaringhalam Moghadam A, Hajizade E, Khavanin A. Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2009;22:533-539.

23. Tseng JM, Sua TS, Kuob CY. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. Procedia Engineering. 2012;45384-389.

24. Hana S, Dharmavaram S, Zhang J, Sykes I, Witlox H, Khajehnajafi Sh, et al. Comparison of Six Widely-Used Dense Gas Dispersion Models for

Assessment of safe distance for five toxic materials commonly in the accidents of chemical road transportation using ALOHA and PHAST software and CEI index: Case of Tehran-Qazvin Highway

Farideh Atabi¹, Roghayeh Ghorbani², Mousa Jabbari^{3*}

Received: 2016/08/21

Revised: 2017/04/18

Accepted: 2017/07/03

Abstract

Background and aims: Road transportations of chemicals due to occurring various accidents and their hazardous consequences are critical. The aim of this study was to determine safe distance in the accidents of road transportation of toxic chemicals in order to use in emergency response planning.

Methods: In this study, transportable chemicals by road were studied and ammonia, chlorine, 1,3-butadiene, benzene and toluene were selected for further study and modeling of toxic materials releases. Next, chemical exposure index (CEI) was determined and hazard ranking was done. Finally, modeling of toxic substances releases was done using ALOHA and PHAST software.

Results: The results showed that, using the CEI index, ammonia, chlorine and 1,3-butadiene with exposure indexes of 597, 548 and 284, respectively, have high importance and need further investigation. In the final assessment that was done according to ERPG-3 concentration using ALOHA software ammonia with 2800 meters, and using PHAST software chlorine with 3004 meters had the highest hazard distances.

Conclusion: Assessment of the results showed that the used software and the CEI index have not capability of providing correct results at low concentrations (ERPG-1 & 2). Due to difference of the results using PHAST and ALOHA softwares, and CEI index, it is recommended to use the highest hazard distance-obtained by ERPG-3-for emergency response planning, without paying attention to type of the material and type of the softwares.

Keywords: Safe distance, Road transportation, Chemical exposure index, ALOHA, PHAST, CEI

1. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, School of Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Master, Department of Environmental Engineering, School of Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. (**Corresponding author**) Associate Professor, Department of Industrial Safety, School of health, safety and environment, Shahid Beheshti University of Medical Science, Tehran, Iran. Jabbarim@sbmu.ac.ir