نقش مدلسازی و ارزیابی پیامد در بهبود سطح ایمنی تاسیسات مخاطره‌آمیز صنعتی (مطالعه موردی: واحد تولید هیدروژن)

اسماعیل زارعی[۱]، محمد جواد جعفری[۲]، علی درمحمدی[۳]، ولی سرسنگی[۴]

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۹/۱۳ تاریخ ویرایش: ۹۱/۱۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۳/۱۲

چکیده

زمینه و هدف: ارزیابی پیامد خطراتی همچون حریق، انفجار و رها شدن مواد شیمیایی پر خطر در محیط، یکی از ضروری‌ترین و اصلی‌ترین مراحل برای بهبود سطح ایمنی در واحدهای موجود یا در حال طراحی است. فرآیند تولید هیدروژن به‌علت وجود شرایط حاد علمیاتی و گازهای با قابلیت اشتعال و انفجار بالا نظیر متان و هیدروژن بستر حوادث بزرگ صنعتی از بعد تلفات جانی و خسارات مالی می‌باشد، بنابراین ایمنی نگرانی اصلی تولیدکنندگان هیدروژن است.

روش بررسی: ابتدا با به‌کارگیری روشHAZID تمامی خطرات و سناریوهای بالقوه تولید هیدروژن شناسایی شد و بعد از جمع آوری اطلاعات مورد نیاز، مدلسازی پیامد با استفاده از نرم افزار حرفه‌ای PHAST ۶/۵۴ انجام شد. احتمال مرگ میر افراد با استفاده از معادلات معتبر Probit محاسبه گردید و در نهایت شدت خسارات پیامدها با استفاده از معیارهای مرسوم ارزیابی گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشترین مرگ و میر مربوط به آتش فورانی راکتور سولفورزدایی (۲۸ نفر) است. فاصله تاثیر و شدت تشعشع این حادثه به ترتیب برابر۲۵۰متر و $۳۷۰kW/m^2$ است. خطرناک‌ترین آتش ناگهانی ناشی از پارگی کامل رفورمر است، به‌طوریکه افراد تا فاصله ۱۳۰ متر از محل نشتی و مساحت m^2 ۱۵۰۵تحت تاثیر غلظت ۶۱۱۲۰ppm قرار می‌گیرند و همه افراد کشته خواهند شد. بدترین انفجار ابر بخار ناشی از جاذب‌های تصفیه هیدروژن است، به‌طوریکه تا فاصله ۶۰ متری از محل جاذب‌ها همه افراد کشته خواهند شد و تمامی تجهیزات فرآیندی و ساختمانها بطور کامل تخریب خواهند شد. حریم ایمن واحد تولید هیدروژن برابر ۷۴۶ متر از حدود مرزی واحد می‌باشد.

نتیجه‌گیری: ارزیابی پیامد روشی کمی و جامع به منظور برآورد و ارزیابی شدت حوادث بالقوه واحدهای مخاطره آمیز صنعتی می‌باشد. وقوع حوادثی از قبیل حریق و انفجار در فرآیند تولیدهیدروژن خسارات‌های جانی و مالی سنگینی دارد بنابراین، تامین ایمنی صنایع مجاور واحد تولید و مصرف هیدروژن باید به طور ویژه مورد توجه قرارگیرد.

کلیدواژه‌ها: تولید هیدروژن، ارزیابی پیامد، مدلسازی پیامد، صنایع مخاطره آمیز

مقدمه

توسعه، پیشرفت و گسترش فناوری‌های بسیار پیچیده و پراهمیت در صنایع مختلف، به ویژه در صنایع مخاطره‌آمیز سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد [۱]. رویکرد جدید بر پایه شناسایی و کنترل خطر پیش از وقوع حادثه است. بکارگیری ر وز افزون این رویکرد جدید و کاهش تعداد حوادث در صنایع مخاطره‌آمیز نشان دهنده اثرات مثبت این روند در کاهش خسارات می‌باشد [۱]. صنایع مخاطره‌آمیز شامل گستره بسیار بزرگی از صنایع دارویی، شیمیایی و غذایی تا نفت، گاز و پتروشیمی هستند که نکته مشترک آنها انتقال، تولید، تبدیل، جداسازی و ذخیره مواد گوناگون شیمیایی تحت شرایط خاص دما، فشار و وجود جریان مواد است [۲]. این صنایع اغلب با مواد شیمیایی پر خطر و واحدهای عملیاتی تحت شرایط دما و فشار بالا نظیر راکتورها و تانک‌های ذخیره سروکار دارند. بنابراین احتمال وقوع حوادثی از قبیل انفجار، آتش‌سوزی و نشت مواد سمی

۱- (نویسنده مسئول) مربی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی نیشابور، نیشابور، ایران. smlzarei65@gmail.com

۲- دانشیار مهندسی بهداشت حرفه‌ای، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط زیست، پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، مشهد، ایران.

۴- مربی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، کاشان، ایران.

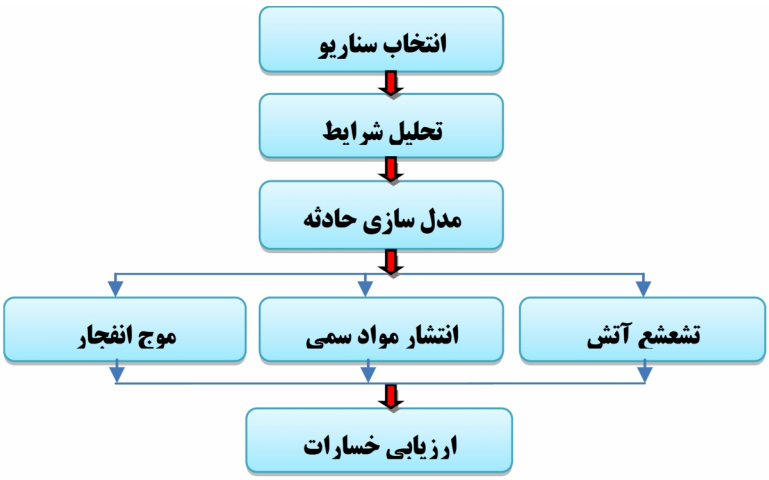
در آنها بسیار بالا است. رشد صنایع مخاطره آمیز در کنار رشد جمعیت انسانی شاغل در این صنایع نه تنها باعث تکرار حوادث، بلکه موجب افزایش خسارات ناشی از حوادث نیز شده است که بعضاً این خسارات سنگین و جبران ناپذیر می‌باشند [۳]. در نتیجه امروزه ایمنی صنایع مخاطره‌آمیز جهت جلوگیری از حوادث و یا کاهش خسارات ناشی از آنها بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین صنایع مخاطره‌آمیز، با توجه به گستردگی زیاد، تعداد پرسنل بالا، وجود حجم قابل توجهی از مواد هیدروکربنی و شیمیایی گوناگون و شرایط عملیاتی حاد، پتانسیل ایجاد حوادث بسیار عظیمی از بعد تعداد تلفات، میزان خسارات و بعد مسافتی بالا را دارا می‌باشند [۳]، لذا آگاهی از حداکثر شعاع‌های ایمن آتش، انفجار و نشر مواد سمی بسیار مهم بوده و نقش بسیار با اهمیتی در مقابله با حوادث در شرایط اضطراری را می‌تواند بازی کند، به‌علاوه اینکه می‌توان با کمک نتایج ارزیابی پیامد تصمیمات درست‌تری برای میزان تناوب بازدیدهای گروه بازرسی فنی و طرحریزی واکنش اضطراری داشت. با پیشرفت تکنولوژی و عظیم‌تر شدن صنایع، مخاطرات مربوط به واحدهای صنعتی هم رشد کرده است. از طرفی مقیاس امروزی تولید، حجم سرمایه گذاری بالا و نزدیک شدن واحدهای صنعتی به مراکز جمعیت، وجود واحدهای ایمن‌تری را ایجاب می‌کند [۱]. آتش سوزی، انفجار و پخش مواد سمی مخاطرات اصلی صنایع مخاطره آمیز را به خود اختصاص می‌دهند [۲]. علاوه بر واحدهای صنعتی، مهمترین و رایج‌ترین حوادث ناگواری که در ساختمانهای عمومی و اماکن پرتردد باعث به خطر انداختن جان انسانها می‌گردند، پدیده‌های آتش و انفجار هستند [۳]. ارزیابی پیامد خطراتی همچون رها شدن مواد شیمیایی پر خطر در محیط، یکی از ضروری‌ترین و اصلی‌ترین مراحل برای افزایش سطح ایمنی در واحدهای موجود یا در حال طراحی است [۳]. ارزیابی پیامد در کشورهای پیشرفته و توسعه‌یافته جزء لاینفک طراحی واحدهای فرایندی می‌باشد که متأسفانه در کشور ما هنوز جایگاه خود را بدست نیاورده است و شاید یکی از دلایل مهم آن عدم آشنایی کافی با مبانی اولیه ارزیابی پیامد است. امروزه هنگام طراحی واحدهای فرآیندی و حتی برای واحدهای در حال کار، مطالعات جامع ارزیابی پیامد انجام می‌شود. امروزه تهیه گزارش ارزیابی پیامد از جمله الزامات طراحی واحدهای فرآیندی می‌باشد. همچنین ارزیابی پیامد یکی از ارکان اصلی مدیریت ریسک می‌باشد که نتایج ارزیابی پیامد را به راحتی می‌توان در مدیریت ریسک واحدهای مورد مطالعه بکار گرفت [۱]. از این رو نمی‌توان مطالعات ریسک‌پذیری را برای یک واحد شیمیایی کامل دانست مگر اینکه مرحله ارزیابی پیامد، نیز برای آن انجام گرفته باشد. به بیان دیگر میزان خسارات و پیامدهای ناشی از حوادث به عنوان معیاری از حاد بودن آنها شناخته شده و در مدیریت ریسک مبنای قضاوت قرار می‌گیرند. به طور کلی پیش‌بینی اثرات و عواقب حوادث نامطلوب در یک واحد صنعتی بوسیله مدل‌های ریاضی، ارزیابی پیامد نامیده می‌شود [۴]. در این مطالعه سعی شده با معرفی و بهره‌گیری از جامعترین و جدیدترین روش، نقش مدلسازی و ارزیابی پیامد در بهبود سطح ایمنی و برآورد میزان مخاطره‌آمیز بودن واحدهای صنعتی با انجام مطالعه موردی تشریح گردد. ارزیابی پیامد در این مطالعه برپایه روابط و اصول مهندسی ایمنی انجام شده و سعی شده از نگرش کمی بجای نگرش کیفی استفاده شود تا بروز خطای ناشی ازقضاوت سلیقه‌ای افراد تیم ارزیابی جلوگیری شده و دقت محاسبات افزایش یابد.

روش بررسی

روش کار این پژوهش براساس روش مرسومی است که به منظور مدلسازی و ارزیابی پیامد در فرایندی‌های شیمیایی، نفت، گاز و صنایع حمل و نقلی بکار گرفته می‌شود و توسط انستیتوی مهندسی شیمی آمریکا و موسسه DNV(Det Norske Veritas) پیشنهاد گردیده است [۵،۱]. با وجود اینکه مدلسازی و ارزیابی پیامد دو بحث جداگانه‌ی می‌باشد، اما چون در این مطالعه مدل‌سازی پیامد بخشی از مراحل اصلی ارزیابی پیامد می‌باشد، از این پس در ادامه این مطالعه تنها واژه ارزیابی پیامد بجای این دو اصطلاح بکار گرفته شده است. به عنوان روشی مناسب برای ارزیابی پیامدهای ناشی از حوادث محتمل در یک واحد شیمیایی، یک الگوی چهار مرحله‌ای مناسب بصورت شکل ۱ در این مطالعه پیشنهاد شده است.

- مرحله نخست: انتخاب سناریو: سناریو، حادثه یا ترکیبی از حوادث است که وقوع آن منجر به تولید مخاطراتی نظیر آتش، انفجار یا رهایی مواد سمی می‌شود. مهمترین مرحله در ارزیابی پیامد، همین گام نخست است. در این مرحله سناریوهای که اولاً محتمل و ثانیاً دارای شدت و تاثیر قابل توجه هستند، انتخاب می‌شود. در این تحقیق برای انتخاب سناریوها علاوه بر مطالعه فرآیند و بازدید از سایت از دانش و تجربه همکاران صنعتی نیز استفاده شده است. محدوده اندازه لوله‌های واحد تولید هیدروژن بین ۶ تا ۱۲ اینچ بوده و براین اساس تمامی سناریوها در سه اندازه نشتی کوچک (۵ میلی‌متر)، متوسط (۳۰ میلی‌متر)، بزرگ (۳۰۰ میلی‌متر یا پارگی کامل) مدلسازی شد. در مجموع در این مطالعه ۱۵ سناریو برای ارزیابی پیامدهای واحد تولید هیدروژن مورد بررسی قرارگرفت. جدول ۱ لیست سناریوهای انتخابی مطالعه حاضر را همراه با محل وقوع آنها نشان می‌دهد.

- مرحله دوم: تحلیل شرایط: در این مرحله تمام شرایط فیزیکی تأثیرگذار بر چگونگی شکل‌گیری و پیشرفت سناریوها، برای هر یک از سناریوها به طور جداگانه، باید مشخص شود. چگالی ماده رها شده نسبت به هوا، دمای انتشار، دمای محیط، سرعت رهایش ماده، شرایط عملیاتی فرآیند (دما، فشار)، میزان ماده مخاطره آمیز، درصد و ترکیب مولی مواد و... از جمله عوامل مؤثر هستند [۱]. اطلاعات فرآیندی و داده‌های مورد نیاز برای مدلسازی سناریوهای این مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل۱- الگوی چهار مرحله ارزیابی پیامد[۵،۱].

جدول ۱. لیست سناریوهای مطالعه شده واحد تولید هیدروژن

کد سناریو	محل وقوع سناریو	اندازه نشتی (mm)	میزان ماده تخلیه شده (kg)
۱	راکتور سولفورزدایی	۵	۴۲
۲		۳۰	۱۵۱۷
۳		۳۰۰	۱۵۱۷۴۶
۴	مبدل حراراتی	۵	۴۲
۵		۳۰	۴۷۵
۶		۳۰۰	۴۷۴۵۹
۷	رفورمر(کوره)	۵	۴۱
۸		۳۰	۱۵۲۰
۹		۳۰۰	۱۵۲۰۰۲
۱۰	جاذب‌های خالص سازی هیدروژن	۵	۱۱
۱۱		۳۰	۳۸۳
۱۲		۳۰۰	۳۸۲۸۷
۱۳	مخزن گاز ضایعات	۵	۳۶
۱۴		۳۰	۱۳۰۴
۱۵		۳۰۰	۱۳۰۴۲۷

توضیح اینکه نشتی با قطر ۳۰۰ میلیمتر بعنوان پارگی کامل تلقی می‌شود

جدول۲- اطلاعات فرآیندی و دادهای مورد نیاز مدلسازی سناریوها

محل وقوع سناریو	فشار (bar)	دما (°C)	تجهیزات هر سناریو	ترکیب مواد	درصد مولی
راکتور سولفورزدایی	۲۵	۲۰۰	کمپرسور، مبدل حرارتی راکتور سولفورزدایی، ولو، فلنج، لوله	گاز طبیعی(متان)	۹۵
				هیدروژن	۵
مبدل حراراتی	۲۷	۵۳۰	مبدل حرارتی، ولو، فلنج، لوله	گاز طبیعی(متان)	۵۱
				آب	۴۶
				هیدروژن	۳
رفورمر(کوره)	۳۰	۸۵۰	کوره، مبدل‌های حرارتی، کانورتو، چیلر، کندانسور، اکنومایزر، ولو، فلنج، لوله	متان	۵
				هیدروژن	۶۰
				منواکسید کربن	۲
				دی اکسید کربن	۸
				آب	۲۵
جاذب‌های خالص سازی هیدروژن	۱۵	۴۰	جاذب خالص سازی هیدرروژن ولو، فلنج، لوله	هیدروژن	۹۹/۹۹
مخزن گاز ضایعات	۴	۳۵	مخزن گاز ضایعات ولو، فلنج، لوله	متان	۱۳
				هیدروژن	۳۴
				منواکسید کربن	۱۳
				دی اکسید کربن	۴۰

یکی از مهمترین عوامل در انتشار مواد، شرایط آب و هوایی منطقه می‌باشد. تمامی سناریوهای این مطالعه با در نظر گرفتن اطلاعات حاصل از نمودارهای گلباد منطقه‌ای (طی یک دوره ۵ ساله) در دو شرایط آب و هوایی گرم (شش ماه اول سال بعنوان روز) و سرد (شش ماه دوم سال به‌عنوان شب) مدلسازی شده است. پارامترهای جوی محل مورد مطالعه از طریق نزدیکترین ایستگاه هواشناسی تهیه گردید است و در جدول ۳

جدول۳- میانگین پارامترهای جوی واحد تولید هیدروژن

پارامتر جوی	روز	شب
سرعت باد (m/s)	۵	۲
کلاس پایداری جو	D	F
دمای محیط(°C)	۲۸/۳۳	۲/۷۷
رطوبت نسبی(%)	۱۹/۳۵	۶۷/۲۷

جدول۴- مدل‌های مورد استفاده در شبیه سازی حوادث واحد تولید هیدروژن[۱].

انفجار	TNT model
آتش فورانی(Jet fire)	Mudan and Croce model
آتش ناگهانی (Flash fire)	Vulnerability model

نشان داده شده است.

- مرحله سوم: مدل سازی حادثه: در این مرحله با استفاده از مدل‌های ریاضی، توالی رخدادها پس از وقوع یک سناریو پیش بینی می‌شوند. مدلسازی حادثه چهار مرحله اصلی دارد [۱]: ۱- مدلسازی تخلیه ۲- مدلسازی انتشار ۳- مدلسازی آثار حوادث(تشعشع، موج انفجاری و رهایش مواد سمی) ۴- تخمین تعداد تلفات و میزان خسارات.

در مرحه نخست مدلی برای پیش‌بینی چگونگی رهایش آن از منبع انتخاب می‌شود و در مرحله دوم با در نظر گرفتن عوامل موثر در انتشار مواد مانند پایداری جو، وزش باد و دمای محیط و انتخاب مدل مناسب، تراکم غلظت ماده رها شده نسبت به مسافت از منبع انتشار محاسبه می‌شود. در مرحله سوم با انتخاب مدل مناسب میزان تشعشع، موج انفجاری و میزان غلظت ماده مورد نظر در زمان و مکان مناسب محاسبه می‌شود. در مرحله آخر با استفاده از معادلات پرابیت[1] میزان مرگ و میر افراد محاسبه می‌شود. امروزه به دلیل پیچیدگی زیاد روابط و زمان بر بودن محاسبات دستی از نرم افزارهای تخصصی مرتبط استفاده می‌شود. در این مطالعه از نرم افزار شبیه ساز تخصصی ایمنی (PHAST[2]) استفاده شده است که توانایی منحصر به فرد، دقت و صحت بیشتری نسب به سایر نرم افزارهای موجود در مدلسازی رهایش مواد و حوادث ناشی از آنها را دارد [۴،۳،۱]. این نرم افزار بطور اختصاصی برای مدلسازی هیدروژن اعتبارسنجی شده است و نتایج آن در مقالات بین المللی متعددی چاپ شده است [۶].

برای محاسبه شدت گاز خروجی در مدلسازی تخلیه از رابطه ۱ استفاده شد [۱]:

$$\dot{m}=C_D A P_1\sqrt{\frac{2g_c}{R_g}.\frac{M}{T_1}.\frac{k}{k-1}\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$\dot{m}$: دبی موادخروجی (kg/s)

P_1، P_2 : فشار مواد قبل و بعد از خروج (kPa)

T_1، T_2 : دمای مواد قبل و بعد از خروج (K)

A: مساحت شکاف ایجاد شده (m^2)

R_g: ثابت گازها ($Pa.m^3/mole.K$)

g_c: ثابت گرانشی زمین ($N.s^2/Kg.m$)

M: جرم مولکولی گاز (kg/mole)

K: نسبت ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت به حجم ثابت (بدون بعد)

[1]. Probit

[2]. Process Hazard Analysis Software Tool

جدول۵- معیارهای ارزیابی پیامد حوداث واحد تولید هیدروژن و توصیف آنها[۹،۸،۱]

آتش فورانی			آتش ناگهانی		انفجار	
$Kw/m^2$۴	$Kw/m^2$۱۲/۵	$Kw/m^2$۳۷/۵	LFL	1/2LFL	bar۰/۰۱	bar۰/۸۳
حد آستانه درد	حداقل انرژی برای ذوب لوله های پلاستی و...	تشعشع کافی برای آسیب به تجهیزات و مرگ آنی افراد	مرگ آنی	مشکلات تنفسی	حریم ایمن (شکستگی پنجره)	تخریب کامل ساختمانها و تجهیزات، مرگ افراد

پس از مدل‌سازی آثار حوادث نوبت به محاسبه میزان تلفات و خسارتهای ناشی از پیامدهای نهایی (آتش، انفجار و پخش مواد) هر کدام از سناریوها می‌باشد. در این مطالعه از معادلات معتبری بنام معادلات Probit به منظور محاسبه درصد افرادی که تحت تاثیر یک حادثه خاص قرار می‌گیرند استفاده شده است [۱]:

معادلات پرابیت را بصورت کلی می‌توان با رابطه ۲ نشان داد [۱]:

(۲)

$$Y = K_1 + K_2.Ln(D)$$

Probit: متغیر Y

k_1 و k_2: مقادیر ثابت تجربی

D_1: دوز خطر (تشعشع، موج انفجار و ماده سمی)

بعد از محاسبه مقدار متغیر پرابیت (Y)، با استفاده از رابطه ۳ احتمال مرگ و میر (درصد مرگ و میر) این افراد (P) بدست می‌آید [۷،۱]:

(۳)

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

u: متغیر یکپارچگی (Integration Variable)

با ترکیب معادله۳ با توزیع جمعیت(P) در محل وقوع حادثه، تعداد افرادی که کشته خواهند شد (N) براساس رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$N = D_p A V_c \qquad (۴)$$

N: تعداد مرگ و میر (تعداد مرگ و میر/ حادثه)

D_p: توزیع جمعیت (نفر/ مترمربع)

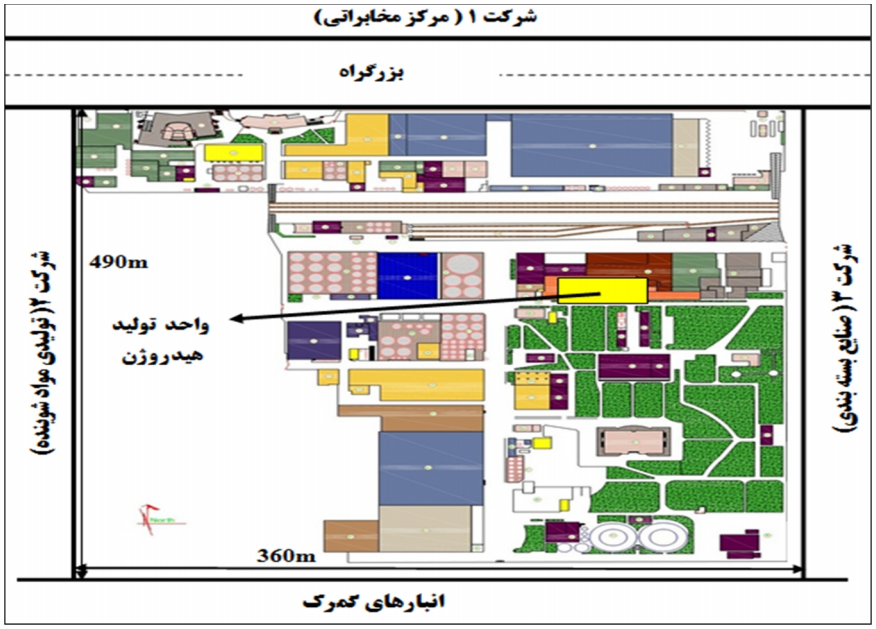
A: مساحت ناحیه تحت تاثیر (مترمربع)

V_c: ضریب آسیب‌پذیری

- مرحله چهارم، ارزیابی خسارات: بر اساس نتایج خروجی از مدلسازی و سنجیدن آنها با معیارهای موجود، شدت آسیب‌رسانی حادثه مورد بررسی مشخص می‌شود. برای مثال فشار ایجاد شده در اثر انفجار یا میزان تشعشع حرارتی رسیده در اثر آتش، برای نقاط با فواصل مختلف از مبداء حادثه، با مقادیر مجاز مقایسه می‌شود. جدول ۵ معیارهای ارزیابی پیامد مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

در ارزیابی پیامدهای ناشی از آتش ناگهانی فرض می‌شود افرادی که در محدوده این آتش یعنی فاصله بین غلظت‌های LFL[۳] (حداقل غلظت قابل اشتعال) و UFL[۴] (حداکثر غلظت قابل اشتعال) ماده اشتعال‌پذیر و به عبارتی در تماس مستقیم با شعله قرار می‌گیرند به احتمال بسیار زیاد کشته می‌شوند و افرادی که مواجهه با غلظت های نصف LFL قرار می گیرند، دچار

[3]. Lower Flammability Limit
[4]. Upper Flammability Limit



شکل ۲- جانمایی واحد تولید هیدروژن در مجتمع مورد مطالعه و موقعیت صنایع فعال اطراف آن

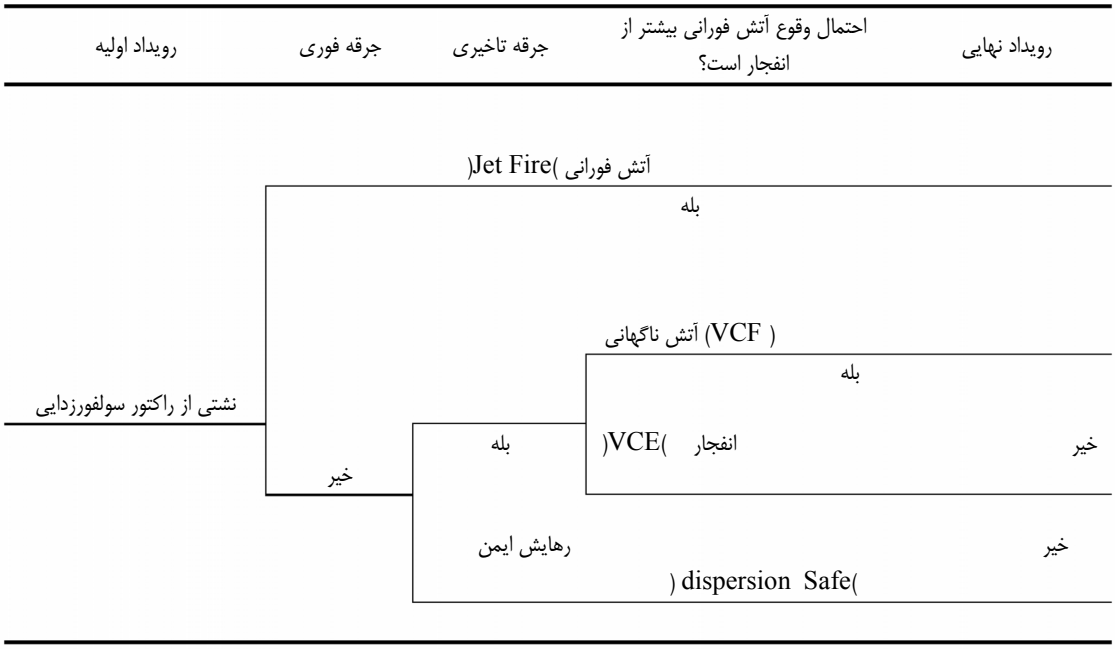
مشکلات تنفسی می شوند [۱].

مطالعه موردی:

- فرایند مورد مطالعه: واحد تولید هیدروژن مورد مطالعه بزرگترین واحد تولید هیدروژن خاورمیانه است. طی فرآیند رفورمینگ گاز طبیعی، هیدروژن تولید می‌شود و برای هیدروژنه کردن روغن‌های نباتی استفاده می‌گردد. گاز طبیعی ورودی به مجموعه تولید هیدروژن با فشار ۲ بار با جریان هیدروژن برگشتی مخلوط می‌گردد و سپس بوسیله کمپرسور تا فشار ۲۲ بار فشرده می‌شود. گاز فشرده شده بوسیله مبدل حرارتی تا حدود۳۸۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود و سپس در راکتور دیسولفورایزر[5]، عمل جداسازی گوگرد از ترکیب گاز متان انجام می‌شود. گاز طبیعی دیسولفورایز شده با بخار مخلوط شده و در واحد رفورمینگ، طی یک واکنش گرماگیر و هنگام گذر از لوله‌های کراکینگ شکافته می‌شود. در خلال این واکنش کراکینگ حرارتی، هیدروژن، مونواکسیدکربن و مقداری گاز متان نسوخته تولید می‌گردد. گاز کراکینگ شده با دمای حدود۸۵۰ درجه سانتیگراد از لوله‌های رفورمر[6] خارج می‌شود و طی گذر از چیلرها خنک‌تر می‌شود. در مرحله آخر، جریان گاز طی عبور از ۴ جاذب تصفیه هیدروژن به خلوص ۹۹/۹۹٪ رسیده و با فشار ۱۵ بار و دمای۴۰ درجه سانتیگراد به واحدهای مورد استفاده مجتمع تزریق می‌شود. ضایعات جاذبهای تصفیه در مخزن گاز ضایعات جمع آوری شده و به عنوان بخشی از سوخت رفورمر سوخته می‌شود. مجموعه تولید گاز هیدروژن، کاملا"خودکار عمل می-کند و از طریق مرکز فرمان فرآیند نظارت و کنترل می‌شود[۱۰]. واحد تولید هیدروژن در یک مجتمع صنعتی با مساحت کل ۱۷۷۶۷۴ مترمربع و جمعیت کل۱۲۰۰نفر قرار دارد که ۸۰۰ نفر در روز و ۴۰۰ نفر در

[5] .Desulphurizing reactor

[6]. Reformer tubes



شکل۳- نتایج درخت رویداد سناریوی اول

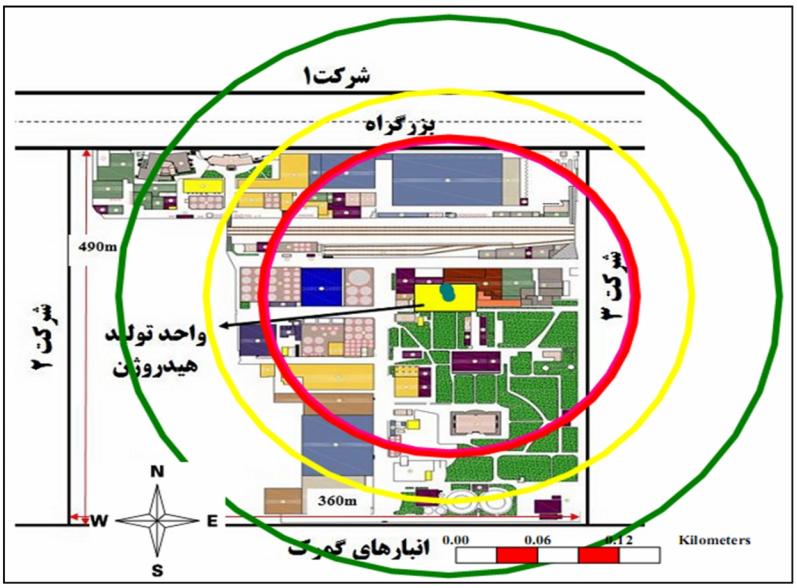
شب مشغول بکار هستند. میانگین توزیع جمعیت در روز و شب به ترتیب برابر ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۲ نفر به ازای هر مترمربع می‌باشد. شکل ۲ جانمایی واحد تولید هیدروژن در مجتمع مورد مطالعه و موقعیت شرکت‌ها و مراکز فعال اطراف این مجتمع را نشان می‌دهد.

یافته‌ها

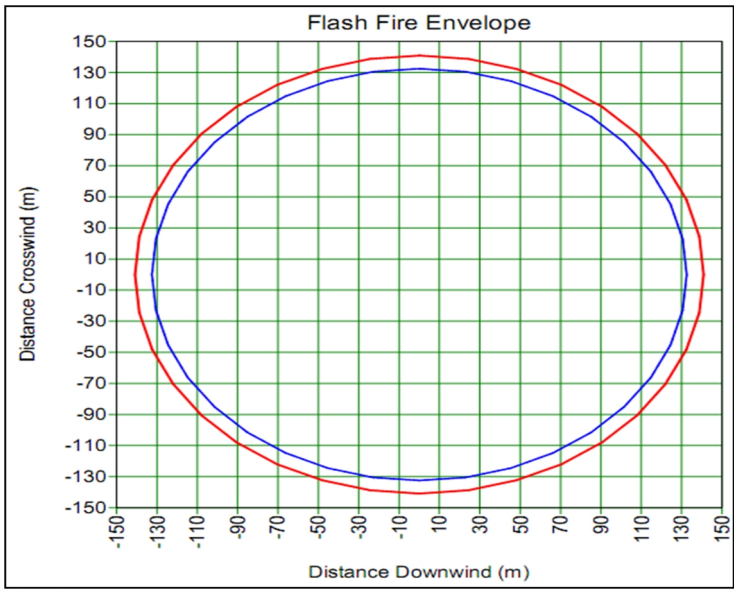
در این مطالعه رهایش مواد در همه سناریوها بصورت دائمی در نظر گرفته شده است. پیامدهای رهایش دائمی بستگی به زمان رسیدن به جرقه (آنی یا تاخیری) دارد. جرقه آنی مستقیماً سبب آتش فورانی می‌شود، درحالیکه جرقه تاخیری منجر به یکی از پیامدهای، آتش ناگهانی و انفجار می‌شود. در صورتیکه رهایش در یک فضای بسته و یا با تراکم بالای تجهیزات صورت گیرد پیامد نهایی انفجار خواهد بود. در صورتی که جرقه تاخیری وجود نداشته باشد و ماده پخش شده سمی باشد، رهایش سمی وجود خواهد داشت [۱]. در شکل ۳ پیامدهای نهایی رهایش مواد از راکتور سولفورزدایی با استفاده از روش درخت رویداد[7] به عنوان مثال نشان داده شده است. نتایج مدلسازی پیامد نشان داد که آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار پیامدهای اصلی واحد تولید هیدروژن است که در صورت نشتی مواد قابل اشتعال احتمال وقوع آنها وجود دارد (شکل۳).

ارتفاع رهایش مواد در تمام سناریوها ۱ متر در نظر گرفته شده است، زیرا غالب لوله‌ها تا نزدیک سطح زمین بودند و به همین دلیل کمترین ارتفاع که بیشترین خطر را دارد به منظور مدلسازی مد نظر قرار گرفته شده است [۱]. نتایج محاسبات فاصله تحت تاثیر[8] پیامدهای مختلف واحد تولید هیدروژن بر حسب روز و شب در جدول۶ نشان داده شده است. نتایج مدلسازی نشان داد که سناریوهای با نشتی کوچک (۵ mm) پیامدهای قابل

[7]. Event Tree
[8]. Harm Effect Distance



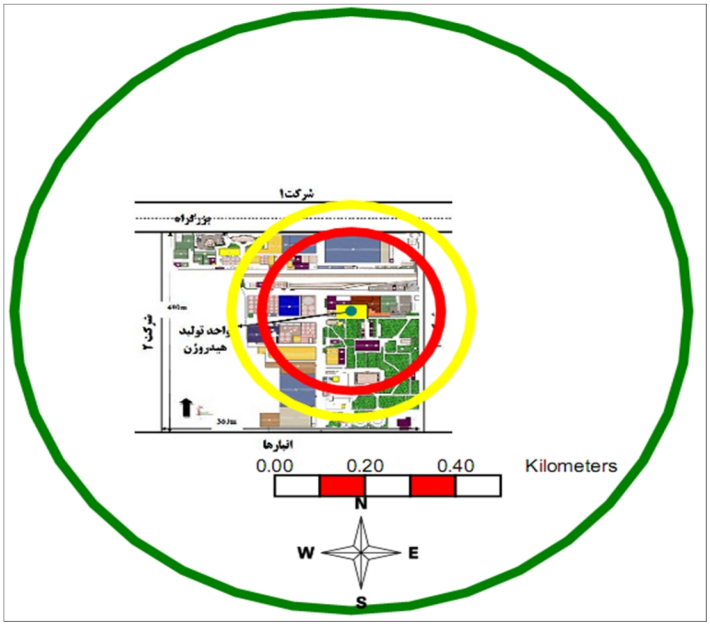
شکل ۴- شدت تشعشع آتش فورانی ناشی از پارگی کامل راکتور سولفورزدایی در روز
نمودار سبز (بیرونی)، زرد (میانی) و قرمز رنگ (درونی) به ترتیب شدت تشعشع 12.5، 4 و $37.5Kw/m^2$ را نشان می‌دهد



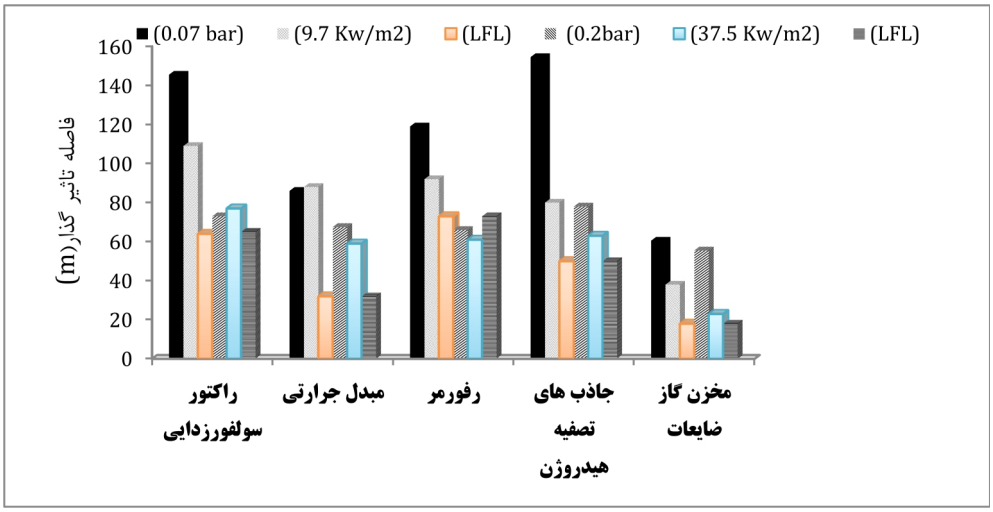
شکل ۵- محدود تحت تاثیر آتش ناگهانی ناشی از پارگی کامل رفورمر در روز(دایره بیرونی) و شب(دایره درونی)

ملاحظه‌ای ندارند، به همین خاطر از ارائه نتایج آنها در جدول۶ خوداری شده است.

شکل۴ محدوده تحت تشعشع بدترین آتش فورانی واحد تولید هیدروژن را نشان می‌دهد. هر کدام از منحنی‌ها شدت تشعشع خاصی و متعاقباً فاصله تحت تاثیر خاصی را نشان می‌دهند. براساس شکل ۴ فاصله‌های تحت تاثیر شدت تشعشع ۴، ۱۲/۵ و $۳۷/۵Kw/m^2$ به ترتیب برابر ۱۳۰، ۱۸۰ و ۲۵۰ متر از محل وقوع حادثه است. احتمال مرگ و میر افرادی که داخل دایره قرمز رنگ قرار دارند برابر ۱ است.



شکل۶- حریم ایمن واحد تولید هیدروژن بر اساس معیارهای مختلف موج انفجار
نمودار سبز (بیرونی)، زرد (میانی) و قرمز رنگ (درونی) به ترتیب موج افزایش فشار0.01، 0.07 و0.2 bar را نشان می‌دهد



شکل۷ – فاصله تاثیر گذار پیامدهای مختلف واحد تولید هیدروژن بر انسان‌ها و تجهیزات

نتایج نشان داد کـه خطرنـاکترین آتـش ناگهـانی بـه دنبال پارگی کامـل رفـورمر اتفـاق مـی‌افتـد. شـکل ۵ محدوده تحت تاثیر بدترین آتش ناگهانی را در شـرایط آب و هوایی روز و شب نشان می‌دهد. احتمال مـرگ و میر افراد بخاطر شدت تشعشع بسیار بالا تا فاصله۱۴۰- ۱۳۰ متری برابر ۱ است، به عبارتی دیگر افرادی که در این فاصله قرار دارند بخاطر مواجهه با شدت تشعشع بالا در صـورت وقـوع آتـش ناگهـانی کشـته خواهنـد شـد. مساحت تحت تاثیر این حادثه در روز و شب بـه ترتیـب برابرm^2 ۱۵۰۵ و m^2 ۱۴۰۵ و غلظت گاز پخـش شـده

در این محدوده برابر ppm ۶۱۱۲۰ می‌باشد.

کانتور سبز رنگ شکل ۶ (موج انفجار ۰/۰۱بار) حریم ایمن واحد تولید هیدروژن را نشان می‌دهد، در حالیکه کانتور سبز و قرمز رنگ به ترتیب فاصله تحت تاثیر مجاز انفجار برای انسان (موج انفجار ۰/۰۷بار) و تجهیزات (موج انفجار ۰/۲بار) را براساس آستانه مجاز EIGA[9] نشان می‌دهند [۱۱]. نتایج مدل‌سازی نشان داد که انفجار ناشی از پارگی کامل جاذبهای تصفیه هیدروژن دارای بیشترین فاصله تحت تاثیر در میان تمامی پیامدهای واحد تولید هیدروژن است (جدول۶). در نتیجه این حادثه برای محاسبات حریمن ایمن واحد تولید هیدروژن تعیین شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که حریمن ایمن واحد تولید هیدروژن برابر ۷۴۶ متر از حد مرزی این واحد می‌باشد و فاصله ایمن برای مقادیر آستانه مجاز موج انفجاری EIGA برای انسان و تجهیزات نیز به ترتیب برابر ۲۷۰ و ۱۹۸ متر می‌باشد.

EIGA معیارهای برای فواصل ایمن در برابر آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار برای انسان و تجهیزات بطور جداگانه ارائه کرده است. بر این اساس حد آستانه مجاز آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار برای انسان به ترتیب برابر $9/7\ kw/m^2$، LFL ماده، ۰/۰۷bar و برای تجهیزات به ترتیب برابر $37/5\ kw/m^2$، LFL ماده، ۰/۲bar است [۱۱]. در این مطالعه یک تحلیل بیشتر بر اساس معیارهای EIGA برروی پیامدهای واحد تولید هیدروژن انجام شد. نتایج نشان داد که انفجار جاذبهای تصفیه هیدروژن و آتش ناگهانی مخزن گاز ضایعات به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فاصله تاثیر در بین همه پیامدها و محل‌های وقوع حوادث واحد تولید هیدروژن است (شکل۷).

بحث و نتیجه‌گیری

پیامدهای اصلی واحد تولید هیدروژن آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار است، نوع فرآیند تولید هیدروژن، یک فرآیند گازی تحت فشار است و هیچ گونه مایع قابل اشتعال (Flammable Liquid) در فرآیند وجود ندارد، بنابراین امکان وقوع آتش استخری (Pool fire) و انفجار بخار مایع در حال جوشان (BLEVE[10]) وجود ندارد (شکل۳) [۱]. نتایج مدلسازی پیامد نشان داد که اندازه نشتی نسبت به سایر متغیرها از جمله، مقدار ماده قابل اشتعال موجود، دما و فشار فرآیندی، شرایط آب و هوایی و ... بیشترین تاثیر در شدت پیامد نهایی دارد، بطوریکی پیامد سناریوهای با نشتی کوچک (۵mm) دارای فواصل تاثیر ناچیز و نشتی بزرگ (۳۰۰mm) دارای بیشترین فاصله تاثیر می‌باشد (جدول۶). نشتی بزرگ منجر به تخلیه و متعاقباً انتشار بیشتر مواد قابل اشتعال در محیط شده و در صورت وجود منابع جرقه منجر به حوادث خطرناکتر می‌شود. تحلیل نتایج فواصل تحت تاثیر انفجار در شرایط آب و هوایی مختلف نشان داد که فاصله تحت تاثیر انفجار در تمامی سناریوها در روز نسبت به شب بیشتر است (جدول۶). کاهش دمای محیط، افزایش رطوبت نسبی و نوع پایداری جو در شب کمک می‌کند تا گاز هیدروژن فاصله بیشتری را در سطح زمین نسبت به روز طی کرده و در نتیجه در صورت وقوع انفجار سبب فاصله تاثیر بیشتری خواهد شد [۱۴،۱۳]. نتایج نشان داد که بیشترین مرگ و میر ناشی از آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار به ترتیب ناشی از پارگی کامل راکتور سولفورزدایی، رفورمر و جاذب‌های تصفیه هیدروژن است (جدول۷) و در این میان آتش فورانی ناشی از راکتور سولفورزدایی دارای بیشترین مرگ و میر (۲۸ نفر) است، وجود گاز متان با

[9]. European Industrial Gases Association

[10]. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

خلوص بالا (۸۳٪) و سایر گازهای قابل اشتعال در راکتور سولفورزدایی، هیدروژن با خلوص ۶۰٪ و ۹۹/۹۹٪ به ترتیب در رفورمر و جاذب‌های تصفیه هیدروژن به همراه شرایط عملیاتی شدید (دما و فشار، جدول۲) از جمله عوامل اصلی تاثیرگذار بر خسارت این سناریوها می‌باشد. شکل ۴ خطرناکترین آتش فورانی فرآیند تولید هیدروژن که ناشی از پارگی کامل راکتور سولفورزدایی است را نشان می‌دهد. در داخل دایره قرمز رنگ این شکل مکانهای پرازدحام از جمله رستوران مرکزی و ساختمان اداری قرار دارد که در صورت وقوع این حادثه تلفات انسانی زیادی خواهد داشت. محدوده تحت تاثیر و فاصله ایمن نیز برای این حادثه محاسبه شد. تا محدود ۵۱۰۲ متر مربع از محل وقوع حادثه افراد، متحمل حد آستانه درد ($4\ Kw/m^2$) می‌شوند و احتمال مرگ و میر این افراد ۱٪ می‌باشد. فاصله ایمن این حادثه برابر ۲۵۰ متر از محل وقوع حادثه می‌باشد. شکل۳ نشان می‌دهد که حریم ایمن آتش فورانی نه تنها از حد مرزی واحد تولید هیدروژن عبور کرده بلکه از حد مرزی مجتمع‌ای که واحد تولید هیدروژن در آن واقع شده نیز عبور کرده است و پرسنل شرکت ۱،۳، انبارهای گمرگ و عابران اتوبان نیز متحمل تشعشع ناشی از این حادثه می‌شوند. علت اصلی خطرناک بودن این حادثه بخاطر وجود مواد با قابلیت اشتعال بالا از جمله گاز متان (۸۳٪) در راکتور سولفور زدایی است. ژیانگ در سال ۲۰۱۰ فواصل تحت تاثیر پیامدهای جایگاه توزیع هیدروژن را ارزیابی کرد، نتایج مطالعه ایشان نشان داد که بیشترین فاصله تحت تاثیر آتش فورانی (تشعشع $37.5kW/m^2$) برابر ۲۸ متر است [۱۲]که نسبت به نتایج مطالعه حاضر کمتر می‌باشد. بیشترین شدت تشعشع آتش فورانی برابر $۳۵۰kW/m^2$ (فصل بهار و تابستان) و $۳۷۰kW/m^2$ (فصل زمستان و بهار) است، که بیشتر از حد ایمن تشعشع ($۰/۱۳۹W/cm^2$) [۱۵] است. همچنین براساس EIGA آستانه مجاز مواجهه برای انسان و تجهیزات با تشعشع ناشی از حریق قابل ملاحضه به ترتیب برابر ۹/۵ و kW/m^2 ۳۷/۵ است [۱۱] که شدت تشعشع آتش واحد تولید هیدروژن نسب به این آستانه مجاز بیشتر است. شکل۵ محدوده تحت تاثیر خطرناکترین آتش ناگهانی واحد تولید هیدروژن را نشان می‌دهد، افرادی که در داخل کانتور آبی رنگ قرار دارند تحت تاثیر غلظت ۶۱۱۲۰ppm (LFL مخلوط) و افراد داخل کانتور قرمز رنگ تحت تاثیر نصف غلظت LFL قرار می‌گیرند. مواجهه با غلظت نصف LFL در افراد سبب بروز مشکلات تنفسی می‌شود[۱]. علت اصلی این حادثه در رفورمر بعلت وجود گازهای هیدروژن (۶۰٪)، متان و شرایط عملیاتی شدید (دما و فشار، جدول۲) است. همچنین فشار پایین (کمترین فشار واحد تولیدهیدروژن) و عدم وجود گازهای قابل اشتعال با خلوص بالا در مخزن گاز ضایعات منجر به کمترین فاصله تاثیر پیامدهای این مخزن شده است (جدول و شکل۷). تحلیل نتایج فواصل ایمن پیامدهای مختلف در شرایط آب و هوایی متفاوت نشان داد که فاصله تحت تاثیر آتش ناگهانی در روز بخاطر سرعت باد بیشتر نسبت به شب افزایش می‌یابد (شکل۵) که با نتایج مطالعه ژیانگ همخوانی دارد [۱۲]. یک مقایسه معتبر بین نتایج مدلسازی آتش ناگهانی در شرایط آب و هوایی متفاوت توسط یوسف زاده و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان داد که فاصله تحت تاثیر آتش ناگهانی در شرایط آب و هوایی گرم بیشتر است [۱۵] که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. مونیس و والدی در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که فاصله تحت تاثیر آتش ناگهانی ناشی از تانکر حمل هیدروژن برابر ۴۰۰ متر است [۱۶] که نسبت به نتایج مطالعه حاضر بیشتر است. در این

مطالعه رفورمر حاوی ۶۵٪ مواد قابل اشتعال است (جدول۲) درحالیکه در مطالعه مونیس و والدی ۱۰۰٪ تانکر حاوی گاز هیدروژن است که منجر به وقوع آتش ناگهانی خطرناکتر می‌شود. درصد خلوص بالای هیدروژن در مطالعه مونیس و والدی علت اصلی افزایش فاصله تحت تاثیر آتش ناگهانی نسبت به مطالعه حاضر می‌باشد. مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۹ توسط گربونی نشان داد که آتش ناگهانی و آتش فورانی ناشی از نشت هیدروژن در خطوط انتقال به ترتیب برابر ۱۳ و ۳۰ متر است [۱۷] که نسبت به نتایج مطالعه حاضر کمتر می-باشد. علت بیشتر بوده محدوده تحت تاثیر آتش در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه گربونی شرایط فرآیندی شدید و اندازه نشتی بزرگ در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه گربونی است. ژیانگ در سال ۲۰۱۰ نشان داد که بیشترین فاصله تاثیر آتش فوارنی جایگاه توزیع هیدروژن برابر ۴۷ متر است [۱۲] که نسبت به نتایج مطالعه حاضر کمتر است. اندازه نشتی کوچک (۱۵میلی متر) نسبت به اندازه نشتی مطالعه حاضر (۳۰۰ میلی متر) علت اصلی کمتر بودن فاصله تاثیر آتش فورانی مطالعه ژیانگ نسبت به مطالعه حاضر می‌باشد. در ضلع شرقی مجتمع مورد نظر شرکت شماره ۳، در ضلع غربی شرکت شماره ۲، در ضلع جنوبی انبارهای گمرک قرار دارد. همچنین در ضلع شمالی اتوبان و در کنار اتوبان شرکت شماره ۱ قرار دارد (شکل۴ و۶) که همه این صنایع مجاور از مکان‌های است که روزانه افراد بسیار زیادی در آنها فعالیت می‌کنند و از مکانهای حساس از بعد تلفات انسانی می‌باشد، همچنین در داخل مجتمع مورد نظر مکانهای بسیار حساس به حریق و انفجار از جمله مخازن بزرگ ذخیره فرآورده، قطار حمل فرآورده و مکانهای پر ازدحام اداری وجود دارد که در داخل کانتور مجاز موج انفجاری قرار گرفته‌اند، مخازن و واگن‌های قطارحمل فرآوده قابل اشتعال از جمله مکان‌های مستعد به حوادث زنجیره‌ای (Domino Effect) در این صنعت می‌باشند. در صورت وقوع انفجار و متعاقباً وقوع حوادث زنجیره‌ای خساراتهای سنگین مالی و جالی به مجتمع مورد نظر متحمل خواهد شد. نتایج مدلسازی انفجار ابر بخار هیدروژن نشان داد که انفجار ناشی از جاذب‌های تصفیه هیدروژن در بین همه پیامدهای واحد تولید هیدروژن داری بیشترین فاصله تحت تاثیر است (جدول و شکل ۷)، به همین خاطر حریم ایمن واحد تولید هیدروژن براساس این رویداد تعیین شد. ژیانگ در سال ۲۰۱۰ در مطالعه برروی جایگاه توزیع هیدروژن نشان داد که انفجار ابر بخار بیشترین فاصله تاثیر در بین پیامدهای مختلف هیدروژن را دارد [۱۲] که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد، اما فاصله تاثیر انفجار در مطالعه حاضر بیشتر از مطالعه ژیانگ است. طراحی خوب تهویه، اندازه نشتی کوچک، تکنولوژی جدید، تغییرات کم دما و عدم واکنش شیمیایی در جایگاه توزیع هیدروژن نسبت به فرآیند تولید هیدروژن از جمله عوامل اصلی فاصله تاثیر کم انفجار در مطالعه ژیانگ نسبت به مطالعه حاضر می‌باشد. مطالعه دیگری توسط عبدول روسید در سال ۲۰۰۶ نشان داد که فاصله تحت تاثیر موج انفجار ۰/۰۱ بار برابر ۱۱۰ متر [۱۸] که نسبت به نتایج مطالعه حاضر کمتر است، تولید خورشیدی هیدروژن در مطالعه عبدول روسید بجای رفورمینگ گاز طبیعی(مطالعه حاضر) و عدم وجود گاز متان سبب فاصله تاثیر کمتر انفجار در مطالعه روسید نسبت به مطالعه حاضر می‌باشد.

ارزیابی پیامد امروزه جزء الزمات واحدهای صنعتی مخاطره آمیز است. کنترل مهندسی و دقیق مخاطرات فرآیندی (آتش و انفجار) واحدهای صنعتی تنها از طریق برآورد کمی و دقیق شدت پیامد و با بکارگیری معادلات

ریاضی و نرم افزارهای حرفه‌ای به منظور ارزیابی آنها امکان پذیر است. مطالعه حاضر با بکارگیری روش نوین ارزیابی پیامد در تولید یکی از بهترین و در عین حال خطرناکترین حامل‌های انرژی امروزی، انجام شده است. این روش، مدلسازی کاملی از پیامدها را انجام می دهد که این مدل سازی، چگونگی حرکت و تغییرات فیزیکی و شیمیایی توده مواد از هنگام تخلیه به محیط تا مکان تاثیرگذاری را به دقت پیش‌بینی نموده و پیامدهای محتمل را تخمین می‌زند. همچنین مدلسازی، رژیم‌های مختلف جریان، تشکیل و تقسیم فازها، بارش، جاری شدن روی زمین، فازتبخیر، رقیق شدن و سایر پدیده‌های فیزیکی مواد را در نظر گرفته و متناسب با نتایج آنها، مکان و زمان تاثیرگذاری نهایی مواد و شدت آن را تعیین می‌نماید. تولید هیدروژن بسترحوادث بزرگ صنعتی می‌باشد و در صورت وقوع آتش و انفجار در فرآیند تولید هیدروژن صنعت مورد استفاده آن، دچار خسارات جانی و مالی زیادی خواهد شد. مطالعه نشان داد که فاصله تاثیر پیامدهای تولید هیدروژن بسیار زیاد است و نه تنها از حدود مرزی واحد تولید هیدروژن عبور کرده بلکه از حدود مرزی مجتمع‌ای که هیدروژن در آن تولید و مصرف می‌شود نیز فراتر است، بنابراین توجه به تامین ایمنی صنایع مجاور واحدهای تولید هیدروژن یک چالش عمده ایمنی می‌باشد و بایستی توجه ویژه‌ای در این زمینه انجام شود. نتایج ارزیابی پیامد بهترین و دقیق‌ترین تصمیم‌گیری را به منظور مکان‌یابی (Siting) ایمن صنایع مجاور واحدهای تولید هیدروژن را در اختیار مسئولان حوزه مدیریت ریسک واحدهای مخاطره‌آمیز قرار می‌دهد. بنابراین انجام مطالعات ارزیابی پیامد بعنوان ابزاری مناسب به منظور طراحی و راه اندازی ایمن واحدهای مخاطره‌آمیز صنعتی توصیه می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از پایان نامه اسماعیل زارعی به استاد راهنمایی دکتر محمد جواد جعفری تحت عنوان" ارزیابی ریسک کمی یک واحد تولید هیدروژن در تهران در مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد، بدینوسیله نویسنده این مقاله، از گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط زیست مجتمع صنعتی بهشهر که در تحقق این امر همکاری داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی می‌نماید.

منابع

1. Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for chemical process quantitative risk analysis: American Institute of Chemical Engineers; New York, 2000.
2. Abdolhamidzadeh B. Present a model for evaluation of domino effects second level in process industrials [Thesis, Phd]. Tehran: Sharif University of Technology, 2010.[Persian].
3. Badri N, Rashtchian D. Quantitative Risk Assessment to Site CNG Refueling Stations. [Thesis, M.Sc]. Tehran: Sharif University of Technology, 2008.[Persian].
4. Zarei E. Quantitative risk assessment of a hydrogen production plant in Tehran. [Thesis, M.Sc]: Tehran: Shahid Beheshti University of Medical Sciences, 2012. [Persian].
5. Det Norske Veritas. ARF-activity responsible function. DNV Proprietary Documentation; 1998.
6. Det Norske Veritas. H2 release and jet dispersion-validation of PHAST and KFX, Report for DNV research CT1910.DNV energy 2008.
7. Jafari MJ, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit, International Journal of Hydrogen Energy; 2012, 37(24).
8. Health and safety authority. Policy & Approach of the Health & Safety Authority to COMAH Risk-based Land-use Planning: 2010.
9. CCPS, Guidelines for Evaluation Process Plant Building for Explosions and Fire: New York;1996.
10. Evt M. Process description of hydrogen plant, EVTMAHLER GMBH (internal documents of

studied plant); 2011.
11. IGC Doc 75/07/E/rev. Determination of safety distances. European industrial gases association. 2007.
12. Zhiyong LI, Xiangmin PAN, Jianxin MA. Harm effect distances evaluation of severe accidents for gaseous hydrogen refueling station. International Journal of Hydrogen Energy; 2010, 35(3): 1515 - 1521.
13. Zarei E, Jafari MJ, Badri N. Risk Assessment of Vapor Cloud Explosions in a Hydrogen Production Facility with Consequence Modeling. J Res Health Sci. 2013; 13(2):181-187.
14. National Aerodynamics and Space Administration. Safety Standard for hydrogen and hydrogen systems. In: Guidelines for hydrogen system design, material selection, operation, storage and transportation; 1997. Report No: NSS 1740e16.
15. Yousefzadegan MS, Masoudi AM, Kazemi Ashtiani Y, Kambarani M. Consequence Analysis for probable accidents of filter separators installed in Gas Pressure Reduction Stations:2011 2nd International Conference on Environmental Science and Development IPCBEE vol.4 .2011.
16. Moonis M, Wilday AJ, Wardman, MJ. Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society. Process Safety and Environmental Protection; 2010, 88(2):p 97-108.
17. Gerboni R, Salvador E. Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis. Energy; 2009,34(12):p 2223e9.
18. Rosyid O. System – analytic Safety Evaluation of the [Thesis, PhD]: Germany: University of Magdeburg; 2006.

The role of modeling and consequence evaluation in improving safety level of industrial hazardous installations: a case study: hydrogen production unit

E. Zarei[1], MJ. Jafari[2], A. Dormohammadi[3], V.Sarsangi[4]

Received: 2012/12/03 Revised: 2013/02/22 Accepted: 2013/06/02

Abstract

Background and aims: One of the most essential and important steps for improving safety level in existing or designing units is consequence evaluation of hazards such as fire, explosion and dispersion of hazardous chemical substances. Due to severe operational conditions, high explosive and flammable gases such as methane and hydrogen, hydrogen production process is causing major industrial accidents of the view life and financial losses. Therefore safety is main concern of hydrogen producers.

Methods: First, all hazards and potential scenarios of hydrogen production were identified by applying HAZID Technique, and after collecting the required data, consequence modeling was done by means of professional software PHAST6.54. Death probability of people by means of valid equations of probit was calculated and ultimately, the severity of the consequences was estimated using conventional criteria.

Results: The results revealed that, jet fire caused by a full bore rupture in Desulphurization reactor has the highest fatality (26person). The harm effect distance, maximum radiations of this incident were 250 m, 370kW/m2 respectively. A full bore rupture in Reformer can lead to the most dangerous flash fire. So that people at distance up 130 m from placing leakage and affected area 1505m2 were exposed to concentration of 61120 ppm and all people would be killed. The most dangerous vapor cloud explosion caused by hydrogen purification absorbers, so that distances up to 60m from absorbers location all people would be killed and all process equipments and buildings will be completely destroyed. The safe distance of hydrogen production unit equals to 746 m from its boundary limit.

Conclusion: Consequence evaluation is a quantitative and comprehensive method for estimation and evaluation of potential incidents severity of industrial hazardous units. The occurrence of incidents such as fires and explosions has the great life and financial losses in the hydrogen production process, Thus safety of industries nearby hydrogen production and consume must be specifically considered.

Keywords: Hydrogen Production, Consequence Evaluation, Consequence Modeling, Hazardous Industries.

1. (**Corresponding author**) MSc, Department of Occupational Health Eng, Faculty of Health, Neyshabur University of Medical Sciences, Neyshabur, Iran. smlzarei65@gmail.com
2. PhD, Department of Occupational Health Eng, Faculty of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
3. MSc, Occupational Health Eng, Health, Safety and Environment Management, Mashhad subway Line 2 Project, Mashhad, Iran.
4. MSc, Department of Occupational Health Eng, Faculty of Health, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, Iran.