

بررسی روش‌های رهاسازی گاز هیدروژن در واحدهای فرایندی مطالعه‌ی موردی: واحد آزمایشگاهی هیدروژن مایع

علی صابری مقدم^{۱*}، محمدمهدی بحری رشت آبادی^۲، زهرا منصوری^۳، وحید خبری^۴، علی نوذری^۲

^۱دانشیار دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۳کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۴دانشجوی دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دریافت: ۹۴/۶/۴ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱

چکیده

رهاسازی گاز هیدروژن در واحدهایی که با هیدروژن سر و کار دارند، سبب بروز خطرات جبران ناپذیر می‌گردد. با در نظر گرفتن تمهیدات خاصی، امکان کاهش میزان خطرات تا حد قابل توجهی وجود دارد. در این مقاله راه‌کارهای موثر برای کاهش خطرات ناشی از سیستم رهاسازی گاز هیدروژن در یک واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا فلوجارت مربوط به روش تصمیم‌گیری برای طراحی ایمن بخش رهاسازی گاز هیدروژن ارائه می‌شود و سپس بر اساس این فلوجارت، روش‌های مختلف کاهش خطر بحث می‌شود. دلایل اشتعال گاز هیدروژن رهاسازی شده مطرح می‌شود و نحوه‌ی کاهش احتمال ایجاد جرقه شرح داده می‌شود. با در نظر گرفتن احتمال بالای ایجاد جرقه در سیستم رهاسازی گاز هیدروژن، قطر مناسب برای لوله‌ی رهاسازی هیدروژن جهت جلوگیری از بازگشت شعله به درون لوله‌ی رهاسازی تعیین می‌گردد.

کلمات کلیدی: هیدروژن، طراحی ایمن، رهاسازی هیدروژن، ایجاد جرقه، هیدروژن مایع

مقدمه

واحدهایی که در حین انجام فرایند با گاز هیدروژن سر و کار دارند، باید برای عملیات عادی و نیز عملیات در شرایط اضطراری، دارای سیستم تخلیه مناسب باشند تا بتوانند هیدروژن را به صورت کاملاً ایمن به محیط بیرون تخلیه کنند. هیدروژن در بین گازها، کم‌ترین چگالی را داراست. از این رو، گاز هیدروژن دارای نیروی

* ali_saberimoghaddam@yahoo.com

شناوری بالایی بوده و تمایل دارد سریعاً در هوا نفوذ کند و با آن مخلوط قابل اشتعال تشکیل دهد. ایمنی سیستم‌های هیدروژنی موضوع مورد توجه عصر حاضر است. کاهش یا حذف خطرات، نیازمند این است که خواص فیزیکی و شیمیایی هیدروژن و نحوه‌ی به‌کارگیری تکنولوژی ایمن در آن به‌خوبی شناخته شود. فرایندهای بسیار زیادی وجود دارد که در حین انجام آن، گاز هیدروژن به محیط رها می‌شود. رهاسازی گاز هیدروژن می‌تواند به صورت مداوم و یا غیرمداوم انجام گیرد. در رهاسازی غیر مداوم، گاز هیدروژن برای مدتی کوتاه به محیط رها می‌شود و سپس جریان آن قطع می‌گردد. معمولاً در رهاسازی غیر مداوم هیدروژن مثل جریان گاز خروجی از شیرهای ایمنی^۱ تمهیدات خاصی برای جریان گاز رهاسازی شده اندیشیده نمی‌شود. رهاسازی گاز هیدروژن به جو می‌تواند باعث ایجاد یک ابر قابل اشتعال پیرامون لوله‌ی رهاسازی شود [۱]. هیدروژن دارای محدوده‌ی اشتعال‌پذیری وسیعی است (۴ تا ۷۵٪) و انرژی لازم برای شروع اشتعال در آن در حدود ۰/۰۱۹ mJ می‌باشد [۲]. این مقدار انرژی، از انرژی مورد نیاز برای احتراق متان (۰/۲۹ mJ) و بنزین (۰/۲۴ mJ) کم‌تر است [۳، ۴]. بر همین اساس، هنگامی که هیدروژن به محیط بیرون رها می‌شود، با تشکیل ترکیب قابل اشتعال، هر لحظه ممکن است شعله‌ور گردد. در این مقاله به صورت مطالعه‌ی موردی، رهاسازی گاز هیدروژن از یک واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش هدفمند برای طراحی سیستم ایمنی رهاسازی گاز هیدروژن به صورت مرحله به مرحله شرح داده می‌شود. با توجه به اینکه رهاسازی گاز هیدروژن در واحدهای مختلف تنها از نظر دبی گاز رهاسازی شده متفاوت می‌باشد، لذا مطالعه‌ی انجام گرفته قابل بسط به سایر واحدها با ظرفیت‌های بالاتر نیز خواهد شد. به منظور مایع‌سازی هیدروژن لازم است که گاز هیدروژن ابتدا توسط کمپرسور فشرده و سپس طی چند مرحله در مبدل‌های حرارتی سرد و پس از عبور از شیر انبساط به مایع تبدیل شود. معمولاً بخش زیادی از گاز هیدروژن پس از عبور از شیر انبساط به مایع تبدیل نمی‌شود. این بخش از گاز هیدروژن که به مایع تبدیل نشده است، مجدداً به ابتدای فرایند و ورودی کمپرسور خوراند می‌شود. در واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع، به دلیل هزینه‌ی زیاد خرید دستگاه کمپرسور نسبت به کل واحد و عدم توجه اقتصادی برای خرید آن، از سیلندر گاز فشرده‌ی هیدروژن به عنوان جایگزین کمپرسور استفاده می‌شود. به دلیل استفاده از سیلندر گاز فشرده‌ی هیدروژن، امکان بازگرداندن گاز هیدروژن از انتهای فرایند به ابتدای فرایند وجود نخواهد داشت و بنابراین ناگزیر باید جریان هیدروژن به محیط بیرون رها شود. در این مقاله، طراحی ایمن یک سیستم رهاسازی^۲ گاز هیدروژن برای واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌های مختلف برای جلوگیری از ایجاد شعله و یا بازگشت آن به درون واحد مطرح می‌گردد.

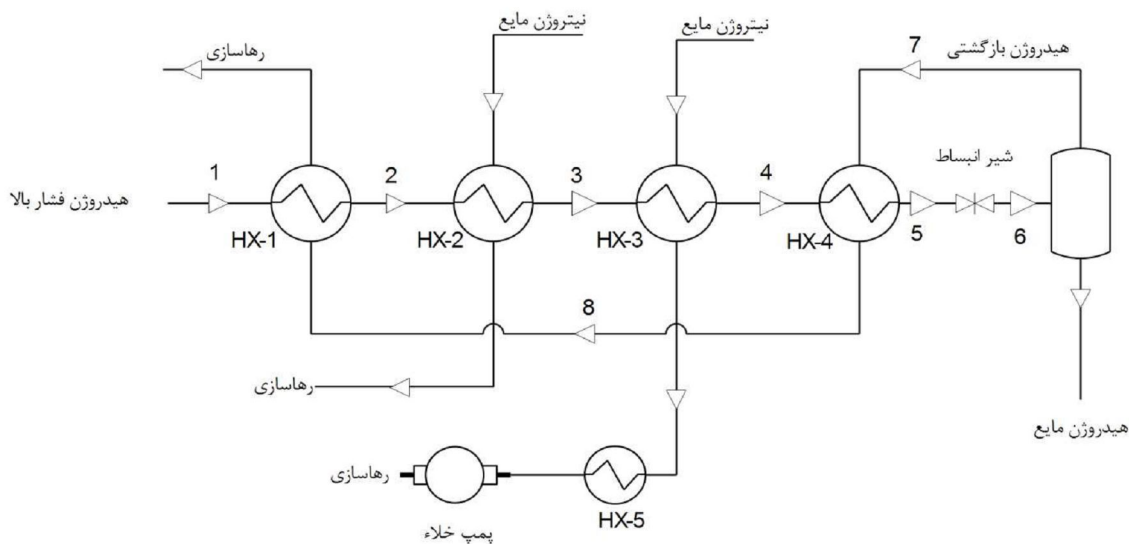
شرح فرایند

نمایی از فرایند مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده

^۱ Relief Valves

^۲ Venting system

است، گاز پر فشار هیدروژن در مبدل حرارتی HX-1 توسط گازهای بازگشتی (جریان ۸) سرد می‌شود و سپس از طریق جریان ۲ وارد حمام نیتروژن مایع (HX-2) شده و بعد از آن از طریق جریان ۳ وارد حمام نیتروژن مایع تحت خلاء (HX-3) می‌شود. جریان هیدروژن پر فشار سرد از طریق جریان ۴ وارد مبدل حرارتی HX-4 می‌شود. هیدروژن در مبدل حرارتی HX-4 توسط بخارات هیدروژن برخاسته از انتهای فرایند (جریان ۷) سرد می‌شود و از طریق جریان ۵ وارد شیر انبساط ژول-تامسون^۱ می‌شود. جریان هیدروژن پس از عبور از شیر انبساط به صورت جزئی به مایع تبدیل می‌شود. بخش مایع شده در جداساز فازی جدا شده و ذخیره می‌گردد و بخش مایع نشده از طریق جریان ۷ و ۸ و پس از عبور از مبدل حرارتی HX-1 و HX-4 به محیط رها می‌شود. این جریان گاز هیدروژن رها شده به محیط از لحاظ پارامترهای ایمنی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. آنچه در ادامه‌ی مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد، تدابیر لازم جهت ایمنی مربوط به رهاسازی این بخش از گاز هیدروژن در واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع است.



شکل (۱). نمودار طراحی فرایند مربوط به واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع.

جدول (۱) خلاصه‌ای از جزییات مربوط به واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع را ارائه می‌دهد. مقدار گاز هیدروژن برای رهاسازی به محیط برابر با $0/21 \text{ kg/h}$ می‌باشد. برای این مقدار گاز هیدروژن باید روش‌های مختلف و ایمن رهاسازی آن را مورد بررسی قرار داد که در ادامه ارائه خواهد شد.

^۱ Joule-Thomson



جدول (۱). خلاصه‌ای از جریات مربوط به واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع

۸۰	فشار طراحی (bar)
۰/۲۵	دبی جرمی گاز ورودی (kg/h)
۱۶	بازده مایع سازی (%)
۵۴۷	هیدروژن مایع تولیدی (cc/h)
۰/۲۱	دبی جرمی هیدروژن رها شده به محیط (kg/h)

به طور کلی حوادث مربوط به رهاسازی گاز هیدروژن به علت ورود هوا به لوله و یا مسدود شدن مسیر آن می‌باشد. ۵۳ درصد از حوادث صنعتی گزارش شده مربوط به نشتی و پارگی تجهیزات فرآیندی می‌باشد. ۱۵ درصد حوادث مربوط به فرآیند پاک‌سازی با گاز بی‌اثر و خروجی‌های لوله‌ی رهاسازی و ۳۲ درصد باقیمانده مربوط حوادث دیگر است [۵]. خطر اولیه که در بحث طراحی لوله‌ی رهاسازی ایجاد نگرانی می‌کند، اشتعال‌پذیری هیدروژن و وقوع آتش سوزی درون لوله می‌باشد. مواردی که در جدول ۲ آورده شده است، سناریوهای احتمالی خرابی و راه حل‌های احتمالی برای رفع آن‌ها است که در اغلب لوله‌های رهاسازی مورد توجه قرار گرفته است [۶،۷].

جدول (۲). سناریوهای احتمالی خطر در رهاسازی هیدروژن و راه حل‌های موجود برای رفع آن‌ها

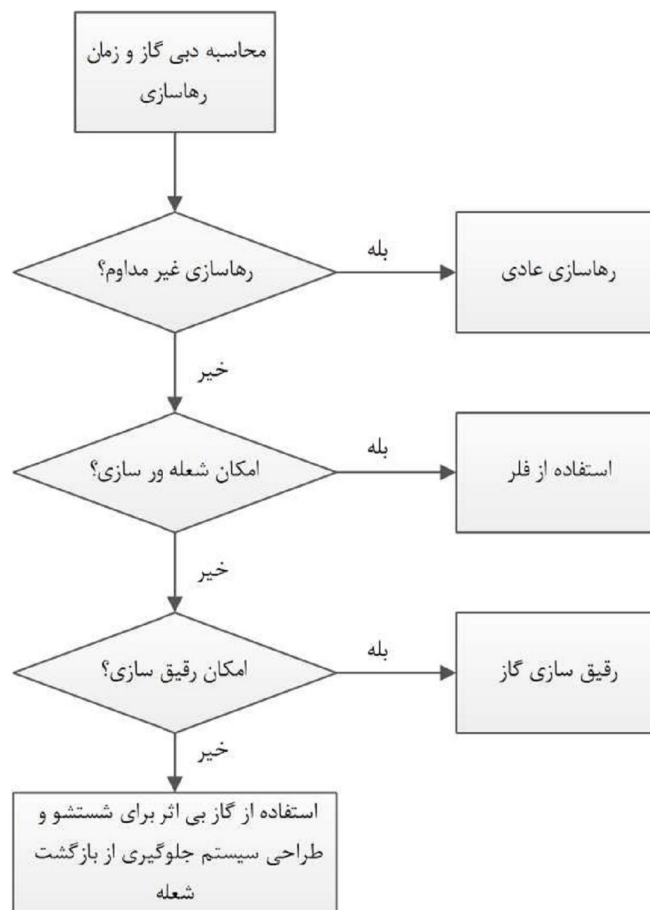
سناریو	راه حل کاهش آن
سوختن هیدروژن درون لوله	جلوگیری از ورود هوا به درون لوله و طراحی و تست لوله برای تحمل فشار داخلی ۱۵۰ psig.
اگر درون لوله رهاسازی هیدروژن به سرعت بسوزد شوک فشار ایجاد شده می‌تواند به منبع اصلی هیدروژن آسیب بزند و باعث ترکیدن ظرف گردد.	به منظور جلوگیری از وارد شدن امواج شوک به داخل ظرف یک شیر یک طرفه ^۱ در ابتدای مسیر ونت نصب گردد.
در هنگام تهویه سریع هیدروژن به محیط، لوله رهاسازی سرد می‌شود و انقباض و انقباض گرمایی لوله می‌تواند باعث آسیب فیزیکی به لوله شود و می‌تواند منجر به نشت هیدروژن از سیستم لوله کشی شود.	در هنگام طراحی لوله رهاسازی باید به تنش‌های گرمایی وارد شده بر لوله توجه نمود.
ممکن است لوله رهاسازی به علت بارگذاری‌های ^۲ مکانیکی ماندن دوزش باد، بارش برف و ... خراب شود.	نگهدارنده‌های ساختار لوله به گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر توانایی تحمل وزن لوله، توانایی تحمل بارگذاری‌های احتمالی را نیز داشته باشد.
برگشت جریان هوا از بیرون به سمت داخل لوله	طراحی مناسب خط لوله رهاسازی با انتخاب قطر و ارتفاع مناسب

¹ Check valve

² Loading

روش طراحی

حال پس از شناخت خطرات احتمالی مربوط به سیستم رهاسازی هیدروژنی، استراتژی روش طراحی برای لوله رهاسازی گاز هیدروژن بر اساس فلوچارت نمایش داده شده در شکل (۲) ارائه می‌شود. برای طراحی سیستم رهاسازی گاز هیدروژن، ابتدا دبی گاز و مدت زمان رهاسازی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر مدت زمان رهاسازی کوتاه و یا دبی آن مقدار کمی باشد، رهاسازی بدون نیاز به تمهید خاصی انجام می‌گیرد. اگر مقدار دبی زیاد باشد و یا زمان رهاسازی طولانی باشد، باید به فکر سوزاندن گاز هیدروژن افتاد. اگر شعله‌ور-سازی هیدروژن در محیطی که رهاسازی گاز انجام می‌گیرد، مجاز نباشد، آنگاه باید گاز هیدروژن خروجی از لوله را رقیق ساخت. اگر رقیق‌سازی گاز هیدروژن امکان‌پذیر نباشد، باید تمهیدی برای جلوگیری از ورود شعله به داخل لوله اندیشید. چنین روندی در مقاله‌ی پیش رو برای سیستم آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت تصمیم نهایی برای طراحی سیستم رهاسازی گاز هیدروژن اتخاذ می‌گردد.



شکل (2). فلوچارت جهت طراحی سیستم ایمن رهاسازی گاز هیدروژن

بحث و نتایج

رها سازی مستقیم هیدروژن

همان طور که در بخش روش طراحی بیان شد، ابتدا باید دبی گاز رها سازی و مدت زمان رها سازی گاز مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول (۱)، دبی جرمی گاز هیدروژن که باید به محیط رها شود برابر با $0/21 \text{ kg/h}$ است. با در نظر گرفتن دانسیته‌ی برابر با $0/08 \text{ kg/m}^3$ برای گاز هیدروژن در فشار 1 bar و دمای محیط [۸]، مقدار دبی حجمی گاز هیدروژن برابر با 729 cc/s خواهد بود. این مقدار دبی باید در تمام مدتی که سیستم مایع سازی هیدروژن در حالت عملیات است، به محیط بیرون رها شود. بنابراین امکان رها سازی مستقیم گاز به سادگی امکان پذیر نیست، زیرا بر اساس آنچه در ادامه شرح داده خواهد شد، امکان شعله ور شدن خود به خودی جریان گاز هیدروژن وجود خواهد داشت.

شعله ور سازی گاز هیدروژن

هنگامی که قرار باشد مقادیر زیادی از هیدروژن به محیط رها شود، ساده ترین و کم هزینه ترین راه دفع آن، سوزاندن است، زیرا هیدروژن می تواند در نزدیکی مکان رها سازی در محدوده قابل اشتعال قرار بگیرد و این مسأله خطر ساز است [۵]. اگر فرایند اصلی نیاز به حرارت داشته باشد، امکان بهره گیری از انرژی حاصل از احتراق هیدروژن در بخش هایی از فرایند امکان پذیر خواهد بود. بر اساس آنچه شرح داده شد، فرایند مورد نظر در دمای پایین و بدون نیاز به حرارت انجام می گیرد. بنابراین امکان استفاده از حرارت حاصل از احتراق هیدروژن در بخش های از فرایند وجود ندارد. در صورتی که نرخ رها یی هیدروژن در سیستم $0/226 \text{ kg/s}$ باشد، می توان با رعایت تمهیدات ایمنی آن را به محیط رها نمود، اما اگر نرخ جریان پیوسته آن از $0/23 \text{ kg/s}$ بیش تر شود به فلر^۱ منتقل گشته و سوزانده می شود [۹].

برای نرخ حجمی یکسان، با اینکه گرمای احتراق هیدروژن ۳ برابر بیش تر از متان و پروپان است، اما هیدروژن تابش حرارتی کمتری نسبت به این دو گاز دارد. در صورتی که قرار باشد هیدروژن رها شده به فلر فرستاده شود و بسوزد، باید اثر دریافت تابش حرارتی ناشی از سوختن هیدروژن بر روی تجهیزات مجاور و کارکنان در حال رفت و آمد بررسی گردد [۱].

رقیق سازی گاز هیدروژن

روش ایده آل برای دفع گاز هیدروژن رقیق سازی آن با یک گاز بی اثر است. این رقیق سازی باید به صورتی انجام گیرد که ترکیب حاصل همواره در همه زمان ها غیر قابل اشتعال باشد. متأسفانه این روش برای رها سازی طولانی مدت گاز هیدروژن در شدت جریان های بالا عملی نیست. ایجاد یک مخلوط کاملاً بی اثر، یکی از راه هایی است که از تشکیل ترکیب گاز اشتعال پذیر در هنگام مخلوط شدن گاز هیدروژن با هوای بیرون جلوگیری می کند. دلیل آن این است که نسبت گاز بی اثر (مثل نیتروژن) به هیدروژن در این ترکیب

^۱ Flare

به اندازه‌ی کافی بالاست. با فراهم کردن مقدار کافی از گاز بی‌اثر، وقتی که هیدروژن رها می‌شود، در هنگام مخلوط شدن با هوا در هر نسبتی، یک ترکیب کاملاً غیراشتعال پذیر ایجاد خواهد شد. بر اساس رابطه‌ای که بودورتا^۱ در سال ۱۹۸۰ ارائه داد، حداکثر غلظت هیدروژن در مخلوط نیتروژن/هیدروژن می‌تواند از رابطه‌ی زیر تخمین زده شود [۱۰]:

$$C_{max} = \frac{C_{Air} \times C_{IfI}}{(C_{Air} - C_{moc})} \quad (1)$$

که C_{max} بیانگر حداکثر غلظت هیدروژن در مخلوط نیتروژن/هیدروژن است که هنگام رقیق شدن با هوا غیر قابل اشتعال خواهد بود. C_{Air} غلظت اکسیژن در هوا، C_{IfI} غلظت محدوده‌ی پایین اشتعال‌پذیری هیدروژن و C_{moc} حداقل غلظت اکسیژن برای احتراق جزء قابل اشتعال (هیدروژن) در مخلوط است. از آنجا که غلظت محدوده‌ی پایین اشتعال‌پذیری برای هیدروژن برابر با ۴٪ حجمی و حداقل غلظت اکسیژن برای احتراق ۵٪ است، لذا با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی فوق، حداکثر غلظت هیدروژن مجاز به دست خواهد آمد.

$$C_{max} = \frac{20.8 \times 4}{(20.8 - 5)} = 5.26\%$$

بنابراین برای رسیدن به غلظت مورد نظر، به یک جریان گاز بی‌اثر (نیتروژن) با دبی حجمی حدود ۲۰ برابر دبی هیدروژن نیاز خواهد بود تا از تشکیل ترکیب اشتعال‌پذیر جلوگیری به عمل آید [۱۰]. در واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع، دبی جرمی هیدروژن رهاشده به محیط بیرون برابر با ۰/۲۱ kg/h است که معادل با ۷۲۹ cc/s است. اگر ۲۰ برابر این مقدار گاز نیتروژن جهت رقیق‌سازی گاز هیدروژن رها شده به محیط مورد استفاده قرار گیرد، در حدود ۱۴/۶ lit/s نیتروژن گازی مورد نیاز خواهد بود. دانسیته‌ی گاز نیتروژن در دما و فشار محیط برابر با ۱/۱ kg/m³ است [۱۱] که با یک محاسبه‌ی ساده، مقدار جرمی نیتروژن مورد نیاز برای رقیق‌سازی برابر خواهد بود با:

$$m_{N_2} = \rho_{N_2} \times F_{N_2} = 1.1 \frac{kg}{m^3} \times 14.6 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \approx 0.016 \frac{kg}{s} \approx 160 \frac{g}{s}$$

کپسول حاوی گاز نیتروژن فشرده موجود در آزمایشگاه دارای فشار ۱۵۰ bar و حجم ۵۰ lit است. این کپسول در حدود ۸ kg نیتروژن گازی را در خود جای می‌دهد. بنابراین یک کپسول حاوی گاز نیتروژن فشرده اگر برای رقیق‌سازی گاز هیدروژن مورد استفاده قرار گیرد، در طول مدت حدود ۵۰ s به صورت کامل مصرف خواهد شد:

$$t = \frac{8000 \text{ g}}{160 \frac{g}{s}} = 50 \text{ s}$$

این حجم زیاد از نیتروژن مورد نیاز سبب می‌شود که ایده‌ی رقیق‌سازی گاز هیدروژن منتفی شود. رقیق‌سازی با حجم زیادی از هوا نیز قابل انجام است، اما باید به این نکته توجه داشت که این راه‌حل به عنوان آخرین گزینه برای رقیق‌سازی مطرح است. دلیل این امر به حجم بسیار زیاد هوای مورد نیاز مربوط

¹Bodurtha

می‌شود. رقیق‌سازی با هوا باید تا ۲۵٪ محدوده‌ی اشتعال‌پذیری هیدروژن انجام بگیرد [۱۰]. از آنجا که محدوده‌ی اشتعال‌پذیری هیدروژن ۴٪ است، لذا رقیق‌سازی آن باید توسط جریان هوایی با دبی حجمی در حدود ۱۰۰ برابر دبی گاز هیدروژن انجام بگیرد. استفاده از دمنده‌های بزرگ می‌تواند حجم مخلوط قابل اشتعال را به حداقل برساند، اما تشکیل جو قابل اشتعال در طول دوره‌ی رقیق‌سازی غیر قابل اجتناب است و چنین روشی نمی‌تواند به عنوان یک روش ایمن جهت کاهش خطر اشتعال هیدروژن معرفی شود [۱۰]. بنابراین ایده‌ی رقیق‌سازی گاز هیدروژن به نظر کاری غیر منطقی و هزینه‌بر خواهد بود.

با توجه به نکاتی که بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به مقیاس آزمایشگاهی واحد و راه‌اندازی آن در یک محیط محدود که ساختمان و رفت و آمد افراد در آن وجود دارد، امکان سوزاندن هیدروژن در یک فلر و در فضای آزاد وجود نخواهد داشت. از این رو، سوزاندن و از بین بردن هیدروژن نیز منتفی خواهد بود. رقیق‌سازی اتمسفر پیرامون سیستم رهاسازی با نیتروژن نیز به دلیل مصرف بالای آن لغو گردید. رقیق‌سازی با هوا نیز پیشنهاد ایمنی به حساب نمی‌آید. از آنجا که نرخ هیدروژن رها شده کم می‌باشد و در محدوده‌ی بین ۰/۲۲۶-۰/۱۱۳ kg/s باشد، می‌توان بدون سوزاندن آن هیدروژن را به محیط رها نمود، اما از آنجا که هیدروژن بسیار اشتعال‌پذیر است، امکان اشتعال آن همواره وجود دارد، از این رو باید تمهیدات ایمنی خاصی برای آن در نظر گرفت.

جلوگیری از ایجاد جرقه و نفوذ شعله به داخل لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن

شعله‌ور شدن گاز هیدروژن خروجی از لوله‌ی رهاسازی گاز معمولاً با فعالیت‌های الکتریکی جو همراه است. به همین دلیل هنگامی که احتمال وقوع رعد و برق وجود دارد، واحدهای تولید هیدروژن باید گاز بی‌اثر بیش‌تری را با هیدروژن به محیط بیرون بفرستند تا از خطرات ناشی از ایجاد اشتعال جلوگیری شود. در هر حال به دلیل حساسیت بسیار بالای هیدروژن به جرقه و انرژی بسیار پایین مورد نیاز برای اشتعال آن، رعد و برق دلیل اصلی اشتعال گاز هیدروژن رها شده به محیط نیست و به وسیله‌ی عوامل بسیار ضعیف‌تر از آن نیز اشتعال هیدروژن رخ خواهد داد. معمولاً تخلیه‌ی کرونا^۱ از انتهای لوله‌ی رهاسازی گاز، برای شروع اشتعال هیدروژن کافیست. تخلیه‌ی کرونا هنگامی ایجاد می‌شود که میدان الکتریکی افزایشی در هوا وجود داشته باشد. وقتی که یک الکتروود (در اینجا منظور همان لوله‌ی رهاسازی است) دارای یک اختلاف پتانسیل نسبت به محیط باشد، یک تخلیه‌ی کرونا می‌تواند اتفاق بیفتد [۱۲] که این تخلیه به اندازه‌ی کوچکترین شعاع در لوله‌ی رهاسازی بستگی دارد. کراس^۲ در سال ۱۹۸۷، آستانه‌ی میدانی را که باید در یک نقطه با شعاع r وجود داشته باشد تا تخلیه‌ی کرونا اتفاق بیفتد به صورت زیر نشان داده است [۱۰].

$$E_c = \frac{18}{r^2} \quad (2)$$

که E_c آستانه‌ی میدان بر حسب kVcm^{-1} و r شعاع لوله بر حسب cm است. محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل

¹corona discharge

²Cross

مورد نیاز برای تولید آستانه‌ی میدان در بیش‌تر موارد پیچیده است، اما برای هندسه‌های ساده امکان محاسبه‌ی آن وجود خواهد داشت. در مورد یک لوله‌ی رهاسازی گاز، نوک لوله می‌تواند به عنوان یک نقطه-ی منفرد برای تخلیه و لایه‌ی توده‌ی هوای بالای آن می‌تواند به عنوان یک صفحه مسطح فرض شود. برای انجام محاسبه‌ی تقریبی، فرض می‌شود که پتانسیلی که باید بین یک نقطه‌ی تخلیه و یک صفحه اعمال شود تا میدان E_c ایجاد شود، مستقل از فاصله‌ی آن با زمین است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_c = \frac{V_s}{r} \quad (3)$$

که E_c میدان الکتریکی‌ای است که تخلیه‌ی بار در آن رخ خواهد داد. V_s پتانسیل الکتروود بر حسب kV و r شعاع انحنای بر حسب cm است. با ترکیب دو رابطه‌ی فوق، ولتاژ مورد نیاز برای تخلیه‌ی کرونا به صورت رابطه‌ی زیر به دست خواهد آمد:

$$V_s = 18\sqrt{r} \quad (4)$$

در حالت عادی، در شرایط آب و هوایی خوب، گرادیان پتانسیل در حدود 100 Vm^{-1} است. یک لوله با ارتفاع ۱۰ m در اثر میدان الکتریکی، اختلاف پتانسیلی به صورت زیر به دست خواهد آورد:

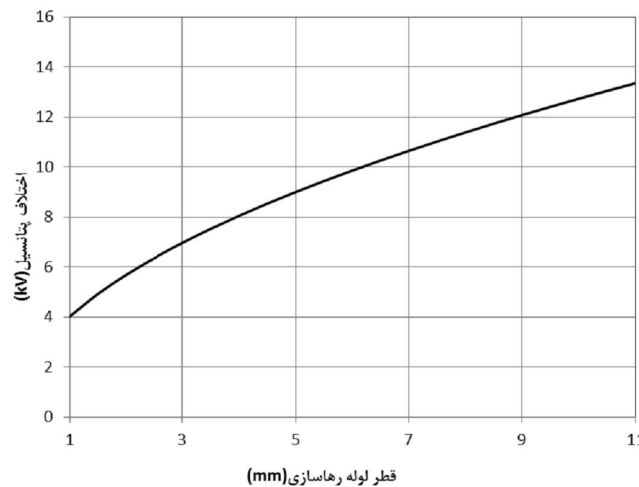
اختلاف پتانسیل = گرادیان پتانسیل \times ارتفاع = $10 \times 100 \text{ V/m} = 1000 \text{ V}$

ولتاژ بحرانی برای شروع تخلیه‌ی کرونا از یک لوله‌ی رهاسازی گاز با شعاع موثر ۱ mm به صورت زیر است [۱۱]:

$$V_s = 18\sqrt{r} = 18\sqrt{0.1} \quad (5)$$

$$V_s = 5.69 \text{ kV}$$

مقدار محاسبه شده بیش‌تر از مقدار پتانسیلی است که در شرایط آب و هوایی خوب در لوله ایجاد می‌گردد و بنابراین تخلیه‌ی کرونا اتفاق نخواهد افتاد. ولتاژ بحرانی برای تخلیه‌ی کرونا در قطرهای مختلف لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن در شکل 3 رسم شده است.



شکل (3). ولتاژ بحرانی برای ایجاد تخلیه‌ی کرونا در قطرهای مختلف لوله‌ی رهاسازی

بر اساس شکل ۳، با افزایش قطر لوله از ۱ mm تا ۱ cm، ولتاژ بحرانی برای ایجاد تخلیه‌ی کرونا تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. همان‌طور که محاسبه شد، اختلاف پتانسیل ایجاد شده در یک لوله‌ی ۱۰ متری در شرایط آب و هوایی خوب برابر با ۱ kV است. بنابراین فاصله‌ی بین اختلاف پتانسیل ایجاد شده در لوله و اختلاف پتانسیل لازم برای ایجاد کرونا حدود ۱۰ برابر خواهد شد و احتمال ایجاد جرقه به صفر می‌رسد. در شرایط آب و هوای برفی، میدان الکتریکی می‌تواند تا $۶/۶ \text{ kV m}^{-1}$ افزایش یابد [۱۰]. از این رو، تخلیه‌ی کرونا در آب و هوای برفی اتفاق خواهد افتاد. باید توجه داشت که اختلاف پتانسیل متناسب با ارتفاع لوله‌ی رهاسازی است، بنابراین با افزایش ارتفاع لوله‌ی رهاسازی برای بهبود پراکنده‌سازی گاز هیدروژن، مقدار پتانسیل در لوله افزایش یافته و در نتیجه احتمال ایجاد خطر افزایش خواهد یافت. برای جلوگیری از ایجاد کرونا در لوله‌ی رهاسازی گاز می‌توان از حلقه‌ی آنتی کرونا^۱ استفاده کرد. این حلقه با افزایش شعاع موثر لوله‌ی رهاسازی گاز از ایجاد کرونا جلوگیری می‌کند [۱۰].

بر اساس آنچه شرح داده شد، برای جلوگیری از ایجاد جرقه باید قطر لوله‌ی رهاسازی گاز زیاد و ارتفاع آن کم باشد، اما بدون در نظر گرفتن سایر پارامترها نمی‌توان در رابطه با قطر و ارتفاع مناسب لوله‌ی رهاسازی گاز قضاوت نمود.

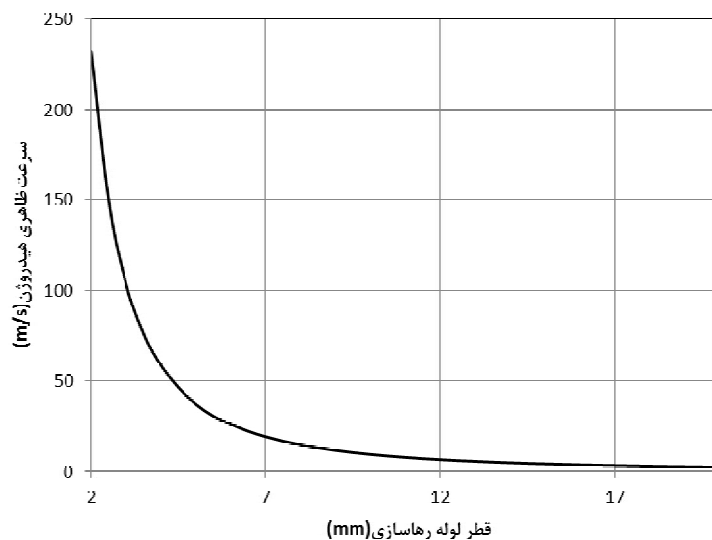
صرف نظر از بحثی که در رابطه با ایجاد جرقه‌ی کرونا در انتهای لوله‌ی رهاسازی گاز مطرح شد، باید به این نکته توجه نمود که به هر دلیل دیگری ممکن است در انتهای لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن، احتراق صورت بگیرد. بنابراین یکی از نکات مهم، جلوگیری از ورود شعله به درون لوله و جلوگیری از انفجار ترکیب اشتعال‌پذیر در آن است. استفاده از صفحه‌ی سوراخ‌دار در انتهای لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن یکی از اقدامات لازم جهت جلوگیری از بازگشت شعله است. سرعت گاز در هنگام عبور از صفحه سوراخ‌دار زیاد می‌شود و این عمل باعث پایداری شعله شده و احتمال بازگشت آن به درون لوله را کاهش می‌دهد. هوارد^۲ در سال ۱۹۸۸ ضریب اطمینان ۴ برابر سرعت حداقل را برای جلوگیری از بازگشت شعله به درون لوله مناسب دانسته است. همچنین هوارد حداقل سرعت برای بازگشت غیر آرام شعله را به صورت رابطه‌ی ۶ ارائه داده است [۱۰]:

$$U_T = 0.2015 g_L D_h \quad (۶)$$

که U_T سرعت بازگشت غیر آرام شعله بر حسب g_L ، m/s، گرادیان سرعت مرزی بحرانی (برای جریان آرام) است که در مقادیر کم‌تر از آن بازگشت شعله رخ می‌دهد (s^{-1}) و D_h قطر سوراخ بر حسب m است. حداکثر g_L برای هیدروژن که توسط هوارد (۱۹۸۸) گزارش شده است، برابر با ۱۰۰۰۰ s^{-1} می‌باشد. برای جریان گاز هیدروژن رهاسازی شده در واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع، تغییرات سرعت جریان بر حسب تغییرات قطر لوله‌ی رهاسازی در شکل ۴ ارائه شده است.

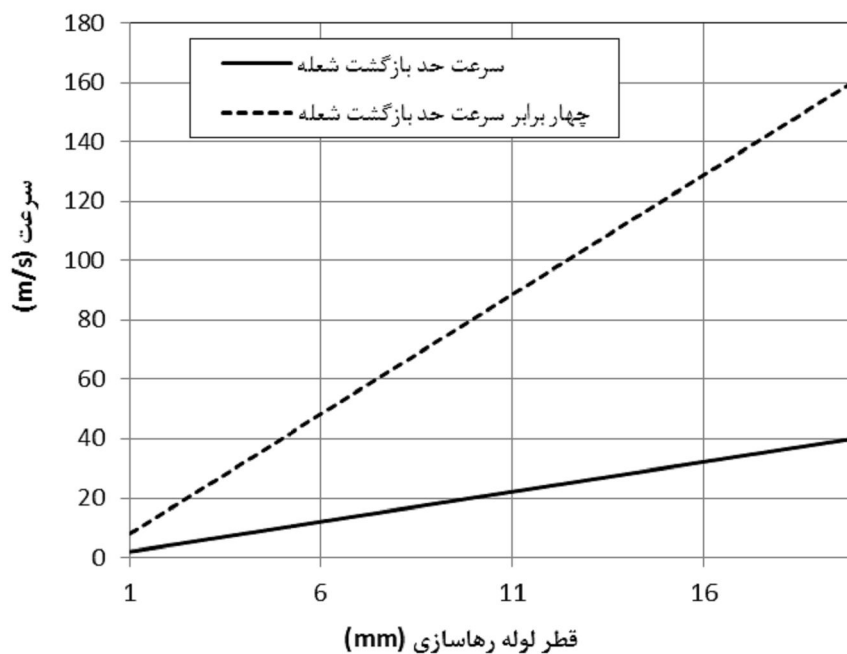
^۱anti-corona ring

^۲Howard



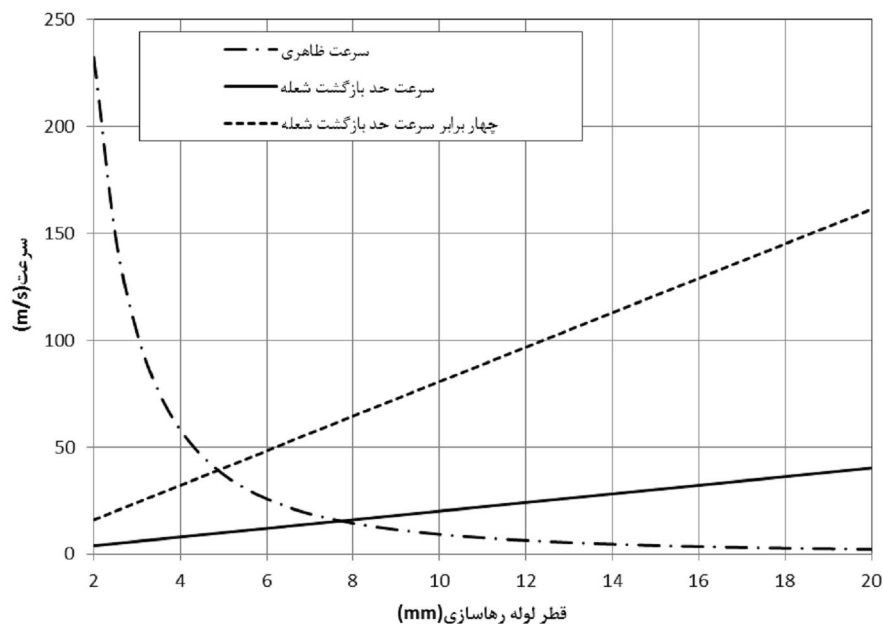
شکل (۴). تغییرات سرعت گاز هیدروژن در داخل لوله‌ی رهاسازی نسبت به قطر لوله‌ی رهاسازی

همان‌طور که قابل مشاهده است، سرعت گاز با کاهش قطر لوله به شدت افزایش می‌یابد. اگر در قطرهای مختلف لوله، سرعت حد بازگشت شعله در لوله توسط رابطه ۶ رسم شود، نمودار خطی ارائه شده در شکل (۵) حاصل خواهد شد. در شکل (۵)، چهار برابر سرعت حد بازگشت شعله نیز رسم شده است.



شکل (۵). حداقل سرعت مجاز برای گاز جهت جلوگیری از بازگشت شعله به درون لوله‌ی رهاسازی در قطرهای مختلف لوله.

شکل ۶ از ترکیب شکل‌های ۴ و ۵ حاصل شده است. همان‌طور که قبلاً بحث شد، سرعت گاز هیدروژن در خروجی از لوله‌ی رهاسازی گاز باید برابر یا بیش‌تر از چهار برابر سرعت حد بازگشت شعله باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، این پدیده در قطرهای کم‌تر از ۵ mm اتفاق می‌افتد. به دلیل اینکه سرعت گاز در داخل لوله با کاهش قطر لوله به شدت افزایش می‌یابد و این به دلیل ایجاد آلودگی صوتی و همچنین تخریب لوله مطلوب نیست، لذا نقطه‌ی تقاطع بین منحنی سرعت واقعی گاز و نمودار خطی چهار برابر سرعت حد بازگشت شعله (قطر ۵ mm) به عنوان حداکثر قطر برای لوله‌ی رهاسازی گاز انتخاب می‌گردد.



شکل (۶). تخمین سرعت مناسب برای گاز هیدروژن در درون لوله‌ی رهاسازی

بر اساس رابطه ۴، مقدار ولتاژ لازم برای تخلیه‌ی کرونا در یک لوله با قطر مورد نظر (۵ mm) چیزی در حدود ۹ kV است. بنابراین در یک شرایط آب و هوایی خوب، حتی اگر لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن دارای ارتفاع تا ۸۰ m باشد نیز امکان ایجاد تخلیه‌ی کرونا وجود نخواهد داشت. بر اساس آنچه شرح داده شد، قطر لوله‌ی رهاسازی گاز نمی‌تواند از ۵ mm بیش‌تر باشد، چرا که با افزایش قطر لوله، در صورت شعله‌ور شدن گاز هیدروژن رهاسازی شده، امکان بازگشت آن به درون واحد آزمایشگاه و بروز صدمات جبران‌ناپذیر وجود خواهد داشت. قطرهای کم‌تر از ۵ mm نیز به دلیل سرعت بسیار بالای گاز و ایجاد آلودگی صوتی و ساییدگی لوله مناسب نیست. به این نکته نیز باید توجه داشت که حداکثر سرعت مجاز نباید از ۰/۲ عدد ماخ بیش‌تر باشد. با توجه به سرعت صوت ۱۳۰۰ m/s در گاز هیدروژن، قطر لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن نباید از ۲ mm کم‌تر باشد. بنابراین اگر از یک لوله‌ی واحد برای رهاسازی گاز هیدروژن استفاده شود، لازم است قطر لوله بین ۲ تا ۵ mm باشد و اگر از قطرهای بیش‌تر برای لوله استفاده شود، باید در انتهای باز لوله

از صفحات سوراخ‌دار با قطرهای کوچکتر استفاده شود. برای مثال اگر از قطر لوله‌ی ۱۰ mm برای رهاسازی گاز استفاده شود، باید در انتهای لوله از صفحه‌ی سوراخ‌داری استفاده شود که دارای حداقل یک سوراخ با قطر ۵ mm یا پنج سوراخ با قطر ۱ mm باشد تا از بازگشت شعله به درون لوله رهاسازی جلوگیری به عمل آید و همچنین سرعت گاز بیش‌تر از ۰/۲ ماخ نشود. لازم به ذکر است که صفحه‌ی سوراخ‌دار می‌تواند با افزایش شعاع موثر لوله، ولتاژ لازم برای تخلیه‌ی کرونا را نیز به مقدار قابل توجهی افزایش دهد [۱۰]. به منظور ارائه‌ی یک الگوی روشمند برای تخمین ارتفاع و قطر لوله‌ی رهاسازی هیدروژن پیشنهاد می‌شود مراحل زیر به ترتیب انجام پذیرد.

- در مرحله اول سرعت حداقل با استفاده از رابطه (۶) برای قطرهای مختلف محاسبه می‌شود (شکل ۵).
- چهار برابر سرعت حداقل به دست آمده در مرحله قبل، محاسبه می‌شود (شکل ۵).
- با توجه به دبی جرمی ثابت فرایند، سرعت گاز در درون لوله با قطرهای مختلف محاسبه می‌شود (شکل ۴).
- سه نمودار به دست آمده در مراحل قبل در یک شکل رسم می‌شود (شکل ۶).
- محل برخورد نمودار چهار برابر سرعت حداقل با سرعت گاز در لوله، حداکثر قطر لوله برای رهاسازی را مشخص می‌کند.
- با قرار دادن این قطر در رابطه (۴) مقدار ولتاژ برای تخلیه کرونا به دست می‌آید.
- با در نظر گرفتن گرادیان پتانسیل برای آب و هوای مورد نظر و تقسیم ولتاژ به دست آمده در مرحله قبل بر گرادیان پتانسیل، ارتفاع لوله به دست می‌آید.

در نهایت با توجه به اینکه قطر لوله استفاده شده برای رهاسازی گاز در واحد مایع‌سازی هیدروژن در حدود ۵mm محاسبه و مناسب دیده شد، لذا از لوله‌های استاندارد یک چهارم اینچ (که دارای قطر داخلی حدود ۴ میلی‌متر هستند) و از جنس فولاد ضد زنگ کلاس ۶۰۰۰ استفاده شد تا در مقابل تنش‌های احتمالی از مقاومت کافی برخوردار باشد. علاوه بر این یک شیر رهایش با فشار عملیاتی ۰/۵ bar در مسر رهاسازی گاز قرار گرفت تا از ورود امواج شوک به داخل ظرف نگهدارنده‌ی هیدروژن جلوگیری به عمل آید. لوله‌ی رهاسازی هیدروژن از بالاترین نقطه سوله‌ی محل نصب واحد به بیرون هدایت گردید تا حتی الامکان از ساختمان‌های و محل عبور و مرور فاصله داشته باشد.

نتیجه‌گیری

بر اساس آنچه شرح داده شد، امکان رهاسازی مستقیم گاز هیدروژن بدون در نظر گرفتن قطر مناسب برای لوله‌ی رهاسازی وجود ندارد، زیرا به دلیل امکان ایجاد تخلیه‌ی کرونا و همچنین بازگشت شعله به درون واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع، امکان بروز خطرات جدی وجود خواهد داشت. رقیق‌سازی گاز هیدروژن نیز به دلیل حجم زیاد گاز نیتروژن مورد نیاز امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این سوزاندن گاز هیدروژن



در فضای آزاد به دلیل موقعیت مکانی واحد آزمایشگاهی تولید هیدروژن مایع منطقی نیست. به همین دلیل با فرض اینکه احتمال وجود جرقه و شعله‌ور شدن هیدروژن همواره وجود دارد، جلوگیری از بازگشت شعله و نیز در نظر گرفتن شرایطی که امکان ایجاد جرقه به حداقل ممکن برسد، مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به سرعت حادی بازگشت شعله به درون لوله و همچنین دبی حجمی گاز خروجی از لوله، قطر مناسب برای لوله‌ی رهاسازی گاز هیدروژن تخمین زده شد. همچنین در صورت استفاده از قطرهای بزرگتر و امکان بازگشت شعله به درون لوله، استفاده از صفحه‌ی سوراخ‌دار در انتهای باز لوله پیشنهاد شد. باید توجه داشت که تمامی تدابیر در نظر گرفته شده، برای کاهش ایجاد خطرات ناشی از انفجار گاز هیدروژن و تشکیل ترکیب اشتعال‌پذیر است و معمولاً برای حجم‌های کم هیدروژن رها شده به محیط بیرون، در نظر گرفتن این تدابیر ضروری نخواهد بود.

منابع

- [1] Tchouvelev, A.V; Benard, P; Agranat, V; Cheng,Z."Detemination of clearance distance for venting of hydrogen storage"; 2005.
- [2]V.Molkov."Hydrogen safety research: state-of-the-art"; proceeding of the 5th international on fire & explosion hazards; 2007; 23-27.
- [3] Bennaceur.K and et all." Hydrogen: A future energy carrier!", Gas 25, 2005; no 20.1.
- [4] Astbury, G.R; Hawksworth, S.J."Spontaneous ignition of hydrogen leaks:Areviewof postulated mechanisms"; International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32, 2178-2185.
- [5] Ordin, P.M." Safety standard for hydrogen and hydrogen systems"; Office of Safety and Mission Assurance, Washington NASA, 2005.
- [6]CGA P-28;" OSHA process safety management and EPA risk management plan quidance document of bulk liquid hydrogen supply system"; compressed gas association.INC; fourth edition; 2014.
- [7] Penttila.S;"Design criteria for the NPDGamma liquid hydrogen target vent stack on Bldg MPF-30, in flight path 12 ER20"; 2004.
- [8] Molkov, V." Fundamentals of hydrogen safety engineering"; Ventus publishing Aps, 2012.
- [9] Beauvais, R; Mayinger.F.M; Strube, G." Hydrogen combustion-safety hazards in hydrogen systems"; University munchen ,federal republic of Germany,1998.
- [10] G.R, Astbury; "Venting of law pressure hydrogen gas, a critique of the literature"; Health and safety laboratory; trans IChemE part B, 2007.
- [11] Aspen Hysys Database, Aspen Software version 7.1.
- [12] N.Allen;" A Clearly Explained and Illustrated Story About Three Types of Corona Discharge and Their Relationship to Radio Interference"; Hubbell power systems, INC,2004.
- [13]T,Orch;" Hazardous process-hazardous gas design"; engineering standards manual ISD 341-2; 2006.
- [14] CGA G-5.5;" Hydrogen vent systems"; compressed gas association.INC; third edition; 2014.