محاسبهٔ کمینهٔ نرخ هوادهی استاندارد و بررسی پارامترهای عملکردی در سیستم تهویه محیط آزمایشگاه‌های تحقیقاتی هیدروژن و پیل سوختی

ابراهیم علیزاده[۱]، محمد رضایی فیروزجایی[۲]، مجید خورشیدیان[۳]، مجید رهگشای[٤]، سید حسین مسروری سعادت[٥]

۱ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال، آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی، فریدونکنار، fccenter@mut.ac.ir

۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال، آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی، فریدونکنار

۳ کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال، آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی، فریدونکنار

٤ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال، آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی، فریدونکنار

٥ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال، آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی، فریدونکنار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰

چکیده

پیل‌های سوختی در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی از بازدهی بیشتر، آلودگی صوتی و آلایندگی کمتری برخوردارند. سوخت فناوری پیل سوختی گاز هیدروژن است که یکی از خطرناک‌ترین گازها از لحاظ اشتعال‌پذیری و قابلیت انفجار است. لذا طراحی محیط آزمایشگاهی ایمن برای ساخت و تست پیل سوختی لازم و ضروری است. از جمله مهمترین اصولی که در آزمایشگاه مذکور باید براساس استاندارد NFPA 853 و IEC 60079 برای سیستم‌های تولید توان پیل‌سوختی لحاظ شود، طراحی سیستم تهویه مناسب جهت جلوگیری از انتشار و انفجار گاز هیدروژن است. لذا در این مقاله با مروری بر مفاهیم تهویهٔ استاندارد و ایمن، مهمترین پارامترهای طراحی این نوع تجهیزات ایمنی برای محیط‌های آزمایشگاهی پیل‌سوختی مورد بررسی قرار گرفته و به‌عنوان مطالعهٔ موردی، برای یک دستگاه تست با دبی گاز ورودی هیدروژن ۵۴ نرمال‌لیتر بر دقیقه با تبیین الگوریتم بهینهٔ محاسبات، زمان تخلیه برای برون‌رفت از ناحیهٔ خطر و حداقل دبی تخلیهٔ لازم براساس ظرفیت فوت مکعب بر دقیقه برآورد گردید. همچنین اثر پارامترهای فشار، دما و قطر نشتی بر میزان نرخ تهویه و حجم منطقه خطر بررسی شده است. نتایج محاسبات انجام‌شده در آزمایشگاه تحقیقاتی مرکز پیل‌سوختی دانشگاه صنعتی مالک اشتر اجرا و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: تهویهٔ استاندارد، قطر نشتی، حداقل دبی تخلیه، آزمایشگاه هیدروژن، دستگاه تست پیل‌سوختی

۱. مقدمه

از جمله مهمترین مسائلی که نقشی اساسی در توسعهٔ فناوری پیل سوختی و اطمینان کاربران به استفاده از آن را خواهد داشت، استانداردسازی است. استانداردهای ایمنی از مهمترین زیرساخت‌های کاربردی محصولات فناوری پیل‌سوختی هستند. آزمایشگاه تست این فناوری همواره در معرض خطر انفجار و آتش‌سوزی است. در این امکان، که پتانسیل خطر انفجار به‌علت وجود مواد اشتعال‌پذیر به شکل گاز، مایع، مه یا غبار زیاد است، قوانینی برای طبقه‌بندی نواحی خطر وجود دارد. مناطق خطر براساس تعداد رخداد و مدت زمان حضور گاز انفجارپذیر به نواحی مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند.

استاندارد BS EN IEC 60079-10 منبع اصلی برای طبقه‌بندی مناطق خطر براساس خطرات گاز و مایع اشتعال‌پذیر می‌باشد که سعی دارد با تعریف حجمی فرضی براساس نرخ نشتی و نرخ چرخش هوا، محیط را طبقه‌بندی کند. در این استاندارد علاوه بر موارد فوق، اصول اولیه برای طراحی سیستم تهویه ایمن برای محیط‌هایی که با گاز هیدروژن سروکار دارند ارائه شده است و در این مقاله به‌عنوان مرجع اصلی به‌کار رفته است. در این راستا، شیلتون (۲۰۰۹)، با در نظر گرفتن پارامترهای مطرح‌شده در استاندارد فوق، برای چند مورد فرضی تحلیل‌های کمی و کیفی ارائه کرده است [۱]. ایوینگ و همکاران (۲۰۰۸)، اصول کلی برای طبقه‌بندی مناطق خطر سیستم‌های گاز طبیعی فشار پایین بنا نهادند که با انجام تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌توانست دیدی منطقی برمبنای اعداد و ارقام در اختیار طراحان جهت طراحی ادوات تهویه چنین سیستم‌هایی قرار بدهد [۲].

در طی یک تحقیق آزمایشگاهی پیل سوختی که در سال ۲۰۱۱ م توسط کرچیارا و همکاران انجام شد، مشخص شد که با تعیین میزان نشتی گاز هیدروژن می‌توان درباره نحوهٔ به‌کارگیری سیستم تهویه برای مقابله با خطر حریق و انفجار تصمیم‌گیری نمود [۳]. البته اصول طراحی تهویهٔ ایمن بیشتر در استانداردهای بین‌المللی (در مقایسه با مقالات) منتشر شده است که از جمله مهمترین آنها می‌توان به IEC60079 منتشرشده در سال ۲۰۱۰ م اشاره کرد که با ارائهٔ چندین طرح از نحوهٔ طراحی ساختمان‌ها، اطلاعات مناسبی برای طراحی تهویهٔ ایمن و نحوهٔ نصب و جانمایی تجهیزات در اختیاران کاربران قرار می‌دهد [۴].

مبحث تهویه در استانداردهای اطفای حریق نیز به‌عنوان یکی از موارد مهم مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این موارد استاندارد NFPA 853 است که در نظر گرفتن سیستم تهویهٔ ایمن و استاندارد را برای سیستم‌های تولید توان همچون پیل سوختی به‌عنوان یک الزام بیان کرده و لحاظ‌کردن این مسئله را خصوصاً در قسمت تأمین سوخت حیاتی و بسیار حائز اهمیت بیان نموده است [۴]. یاسین و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی پارامترهای سیستم تهویهٔ طبیعی به‌هنگام نشت تصادفی هیدروژن در یک پارکینگ مسکونی پرداختند [۵]. آنها با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و بعد از اعتبارسنجی حل این نرم‌افزار به مطالعهٔ مکان تهویه بر میزان غلظت هیدروژن و لایه‌بندی آن پرداختند. همچنین هندسهٔ دریچهٔ خروجی و تعداد آن بر میزان تهویه و غلظت هیدروژن را بررسی نمودند. لیو و دیوید (۲۰۱۵) نیز به تشریح شبیه‌سازی استفاده از دمندهٔ قابل حمل برای پخش و پراکندن هیدروژن منتشرشده از یک وسیلهٔ نقلیه که دچار حادثه شده است پرداختند [۶]. آنها نتایج حل عددی را به خوبی با نتایج تجربی مورد اعتبار سنجی قرار دادند و محاسبات خود را برای پیش‌بینی غلظت هیدروژن پیرامون وسیلهٔ نقلیه در سناریوهای مختلف ارزیابی کردند تا به این وسیله مؤثرترین راه‌حل را برای ایجاد شرایط امن اطراف وسیلهٔ نقلیه بیابند. مطابق یافته‌های آنها نخستین شخصی که به حادثه‌دیدگان کمک می‌کند نباید به وسیلهٔ نقلیه از سمت مخالف دمنده نزدیک شود؛ زیرا در این ناحیه غلظت هیدروژن هنوز نزدیک به حد کمینه اشتعال است. دیکسیت و همکاران (۲۰۱۴) نیز به بررسی روش طراحی سیستم‌های ساده، مقیاس‌پذیر، ماژولار و خودکنترلر برای ایجاد امنیت ناشی از پخش گازهای هیدرژن، مونو اکسید کربن و هیدروکربن‌ها پرداختند [۷]. آنها به بررسی عملکرد این سیستم‌ها در فضای یک آزمایشگاه عمومی که از قبل ساخته شده بود پرداختند و جزئیاتی از سیستم‌های کنترلی، مکانیکی و برقی آزمایشگاه موجود را بررسی کردند و از ابزار CFD برای طراحی سیستم تهویه مطبوع و مکان حسگرهای گاز برای تشخیص انتشار گاز در زمان بهینه پرداختند.

در این مقاله برای نخستین‌بار به ارزیابی درجهٔ تهویه و توسعهٔ تعریف شرایط تهویه پرداخته شده است. همچنین محاسبات و راهنمایی لازم را در ارتباط با طراحی سیستم‌های

تهویهٔ مصنوعی ارائه می‌نماید. گفتنی است این سیستم‌ها دارای درجه اهمیت بالا در کنترل پراکندگی انتشار گازها یا بخارهای اشتعال‌پذیر هستند که با توجه به فقدان منابع محاسبات مهندسی شفاف و استاندارد در این حوزه، ضرورت ارائهٔ الگوریتم محاسباتی مناسب به‌منظور تعیین پارامتر اساسی طراحی سیستم تهویه مورد نظر ضروری می‌نماید. در نهایت با توجه به الگوریتم ارائه‌شده و نتایج حاصل، سیستم تهویه مطبوع برای آزمایشگاه هیدروژن و پیل سوختی پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال دانشگاه مالک اشتر طراحی شد و به مرحلهٔ ساخت و نصب منجر شد.

۲. تعاریف و اصطلاحات

برای درک بهتر مطالب بیان‌شده، خلاصه‌ای از اصطلاحات تخصصی و کاربردی که در متن طراحی مفهومی سیستم تهویه اشاره می‌شود، در این بخش بیان می‌شود.

۲-۱. محیط گازی انفجارپذیر

ترکیبی از یک مادهٔ اشتعال‌پذیر به شکل گاز یا بخار (تحت شرایط محیطی) با هوا که پس از اشتعال شعله توسط ترکیب موجود منتشر می‌شود.

۲-۲. ناحیهٔ خطرناک

ناحیه‌ای که ترکیب گازی انفجارپذیر در آن موجود یا انتظار ایجاد آن به مقداری است که نیاز به توجه جدی برای ساخت، نصب و استفاده از تجهیزات وجود دارد.

۲-۳. ناحیهٔ غیرخطرناک

ناحیه‌ای که انتظار ایجاد ترکیب گازی انفجارپذیر در آن به مقداری که توجه جدی برای ساخت، نصب و استفاده از تجهیزات باشد، نیازی نیست.

۲-٤. مناطق

مناطق خطرناک براساس تکرار رخداد و طول زمان، وجود ترکیب گازی انفجارپذیر به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱. ناحیهٔ صفر: منطقه‌ای که در آن ترکیب گازی انفجارپذیر، به‌طور دائم یا برای مدت زمان طولانی موجود است

۲. ناحیهٔ یک: منطقه‌ای که در آن ترکیب گازی انفجارپذیر، در شرایط عملکرد عادی وجود دارد

۳. ناحیهٔ دو: منطقه‌ای که در آن وجود ترکیب گازی انفجارپذیر در شرایط عملکرد عادی امکان ندارد و در صورت امکان، تکرار آن بسیار کم و برای مدت زمان کوتاه است

۲-۵. منبع انتشار

نقطه یا محلی که می‌تواند از آن یک گاز، بخار یا مایع اشتعال‌پذیر به‌صورتی که ترکیب گازی انفجارپذیر را تشکیل دهد، آزاد شود. سه درجهٔ اصلی انتشار برحسب میزان ایجاد ترکیب گازی انفجارپذیر وجود دارد که یک منبع انتشار ممکن است دارای یکی از این درجات انتشار یا ترکیبی از آنها را باشد:

۱. انتشار پیوسته: انتشاری که دائم است یا امکان وجود آن برای مدت زمان طولانی وجود دارد

۲. انتشار اولیه: انتشاری که امکان وجود آن به‌صورت دوره‌ای یا گاه‌گاهی هنگام شرایط کارکرد عادی وجود دارد

۳. انتشار ثانویه: انتشاری که امکان وجود آن هنگام شرایط کارکرد عادی نیست و در صورت وجود، امکان تکرار آن بسیار کم و برای مدت زمان کوتاه است

۲-٦. تهویه

تهویه حرکت هوا و جایگزینی آن با هوای تازه ناشی از باد، تغییرات دما یا وسائل مصنوعی (مثل: پروانه‌ها یا تهویه‌کننده‌ها) می‌باشد.

۲-۷. محدودیت‌های انفجار

غلظت گاز یا بخار اشتعال‌پذیر که در پایین‌تر از آن محیط گازی انفجارپذیر نیست را حد پایین انفجار می‌نامند. از طرفی غلظت گاز یا بخار اشتعال‌پذیر که در بالاتر از آن محیط گازی انفجارپذیر نیست را حد بالای انفجار می‌نامند.

۲-۸. گاز یا بخار اشتعال‌پذیر

گاز یا بخاری که وقتی با هوا در شرایط مناسب مخلوط می‌شود و محیط انفجارپذیر شکل می‌دهد را گاز یا بخار اشتعال‌پذیر می‌نامند.

۲-۹. وسعت مناطق

فاصله منبع نشتی تا نقطه‌ای که ترکیب گاز/هوا به پایی‌ن‌تر از محدوده پایین انفجار رقیق شده باشد.

۲-۱۰. نقطهٔ اشتعال

پایین‌ترین دمای مایع که در آن (تحت شرایط ویژه استاندارد) یک مایع مقداری تبدیل به بخار می‌شود و توانایی ایجاد یک ترکیب هوا-بخار اشتعال‌پذیر را دارد.

۲-۱۱. درجهٔ تهویه

میزان تأثیر تهویه در کنترل پراکندگی و میزان دوام محیط انفجارپذیر، به درجه و میزان دسترسی به سیستم تهویه و طراحی آن بستگی دارد. مثلاً تهویه ممکن است برای جلوگیری از تشکیل محیط انفجارپذیر کافی نباشد، اما برای جلوگیری از پایداری محیط انفجارپذیر کافی باشد. اساساً سه درجهٔ تهویه به شرح زیر قابل تعریف است:

۱. تهویهٔ قوی که می‌تواند غلظت منابع نشتی را به‌طور آنی کاهش دهد، در نتیجه غلظت زیر محدودهٔ پایین انفجار قرار گیرد و منطقهٔ قابل چشم‌پوشی را توسعه دهد.

۲. تهویهٔ متوسط؛ در مدتی که نشتی در حال پیشرفت است، تهویه متوسط می‌تواند غلظت را کنترل کند و محیط انفجار بعد از قطع منبع نشتی بیش از اندازه نمی‌تواند ماندگار باشد. نتیجهٔ آن شرایط پایدار منطقه است.

۳. تهویهٔ ضعیف؛ وقتی که نشت در حال پیشرفت است تهویهٔ ضعیف نمی‌تواند غلظت را کنترل کند و از افزایش بیش از اندازه محیط انفجار بعد از قطع نشتی جلوگیری نماید.

۲-۱۲. پیل سوختی

پیل سوختی دستگاهی الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. در این س‌ی‌ستم تبدیل انرژی، سوخت (ه‌ی‌دروژن) و اکس‌ی‌دانت (هوا یا اکس‌ی‌ژن) از دو سمت مقابل وارد م‌ی‌شوند و طی یک فرایند الکتروشیمیایی، انرژی الکتریسیته، حرارت و آب تولید می‌شود.

۳. طراحی سیستم تهویهٔ استاندارد و ایمن

جهت طراحی و نصب سیستم‌های تهویه محاسبات کمی باید انجام شود که اهداف ذیل را دنبال می‌کند و در این محاسبات از اصول مطرح‌شده در منابع [۸-۱۰] استفاده شده است:

۱. تخمین حداقل نرخ مورد نیاز تهویه برای جلوگیری از گسترش محیط انفجارپذیر

۲. محاسبهٔ حجم فرضی منطقهٔ خطر برای مشخص کردن درجهٔ تهویه

۳. تخمین زمان پراکندگی $t_{discharge}$

۴. تعیین نوع ناحیه از روی درجه و میزان دسترسی به تهویه و درجه انتشار

در ابتدا باید حداقل نرخ جریان تهویهٔ نظری هوای تازه برای رقیق‌کردن نشتی مواد اشتعال‌پذیر برای کاهش غلظت زیر محدودهٔ پایین انفجار را تعیین نمود. این نرخ را می‌توان به‌وسیلهٔ معادلهٔ ۱ محاسبه کرد [۴]:

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \frac{\left(\frac{\mathrm{dG}}{\mathrm{dt}}\right)_{\max}}{k \times LEL_m} \times \frac{T}{293} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که $dV/dt_{\min}$ مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه، $\mathrm{dG/dt_{max}}$ ماکزیمم نرخ نشتی منابع، LEL_m محدودهٔ پایین انفجار و k فاکتور ایمنی به‌کار رفته برای LEL_m است که به‌طور معمول عدد ۰/۲۵ برای درجهٔ پیوسته و اولیهٔ نشتی و ۰/۵ برای درجهٔ ثانویهٔ نشتی در نظر گرفته می‌شود. همچنین T دمای محیط است. چون محدودهٔ پایین انفجار براساس درصد حجمی می‌باشد، برای تبدیل آن به درصد جرمی در شرایط اتمسفر می‌توان از معادلهٔ ۲ استفاده کرد [۴]:

$$LEL_m = 0.416 \times 10^{-3} \times M \times LEL_v \qquad (۲)$$

در معادلهٔ ۱، فرایند محاسبهٔ کمیت $\mathrm{dG/dt_{max}}$ قدری پیچیده است. معادلات زیر برای تخمین نرخ نشتی گازها و مایعات اشتعال‌پذیر ارائه شده است. اگر دانسیتهٔ گاز فشرده خیلی کمتر از دانسیتهٔ گاز مایع شده باشد، نرخ نشتی گاز از محفظه را می‌توان با انبساط آدیاباتیک گاز ایده‌ال در نظر گرفت. سرعت گاز نشتی سرعت صوت می‌باشد، اگر فشار داخل محفظه از فشار بحرانی، که با توجه به معادلهٔ ۳ به‌دست می‌آید، بزرگتر باشد [۴].

$$P_c = P_0\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} \pi r^2 \qquad (۳)$$

در این رابطه P_0 فشار خارج از محفظه برحسب بار و γ ضریب انبساط گاز است.

حالت ۱: سرعت گاز در این حالت برابر با سرعت صوت در نظر گرفته شده است که این مقدار حداکثر سرعت نظری برای سرعت تخلیه می‌باشد. اگر سرعت گاز سرعت صوت باشد نرخ نشتی گاز از محفظه را می‌توان توسط رابطهٔ ۴ تخمین زد.

$$\frac{dG}{dt} = C_d S_p \sqrt{\gamma \frac{M}{RT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \qquad (۴)$$

به‌طوری‌که dG/dt نرخ نشتی گاز (جرم بر زمان، کیلوگرم بر ثانیه)، C_d ضریب تخلیه، S مساحت برشی که نشتی وجود دارد (مساحت سطح، متر مربع)، P فشار داخل محفظه، M جرم ملکولی گاز، T دمای مطلق داخل محفظه برحسب کلوین و نهایتاً R ثابت جهانی گازها می‌باشد.

حالت ۲: سرعت گاز در این حالت کمتر از سرعت صوت می باشد. نرخ نشتی گاز از محفظه در این حالت را می‌توان به‌کمک معادلهٔ ۵ برآورد کرد.

$$\frac{dG}{dt} = C_d S_p \sqrt{\frac{M}{RT}\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right)\left(1-\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \qquad (۵)$$

ارتباط میان محاسبهٔ $dV/dt_{\min}$ و نرخ تهویهٔ واقعی در حجم مطرح‌شده V_0 در نزدیکی نشتی را می‌توان به‌عنوان یک حجم (V_k) بیان کرد:

$$V_k = \frac{\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min}}{C} \qquad (۶)$$

به‌طوری‌که C تعداد چرخش هوا در واحد زمان (s^{-1}) است که با استفاده از معادلهٔ ۷ محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{\left(\frac{dV_0}{dt}\right)}{V_0} \qquad (۷)$$

به‌طوری‌که در این رابطه dV_0/dt نرخ جریان کلی هوای تازه در حجم مورد نظر و V_0 حجم کل به‌کار رفته برای تهویهٔ واقعی در مجاورت نشتی (حجم احاطه‌شده زیر هود تهویه) می‌باشد. معادلهٔ ۷ برای مخلوط آنی و همگن در منابع نشتی با شرایط جریان ایده‌ال هوای تازه داده شده است. در عمل، شرایط ایده‌ال به‌طور کلی پیدا نمی‌شود. مثلاً ممکن است موانع برای جریان هوا سبب تهویهٔ نامناسب قسمتی از محوطه شود. بنابراین تبادل هوای مؤثر در منبع نشتی کمتر از مقدار C در معادلهٔ ۶ شده و در نتیجه سبب افزایش حجم (Vz) می‌شود. با معرفی یک فاکتور تصحیح اضافی f به معادلهٔ ۷ داریم:

$$V_z = f \times V_k = \frac{f \times \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min}}{C} \qquad (۷)$$

به‌طوری‌که f بازدهی مؤثر تهویه در رقیق‌کردن محوطهٔ گاز انفجاری است که عدد یک برای شرایط ایده‌آل و به‌طور معمول عدد 5 برای جریان هوا با موانع در نظر گرفته می‌شود. پارامتر $t_{discharge}$ زمان مورد نیاز برای کاهش میانگین غلظت از مقدار اولیهٔ X_0 به k مرتبه LEL بعد از توقف نشتی را می‌توان تخمین زد:

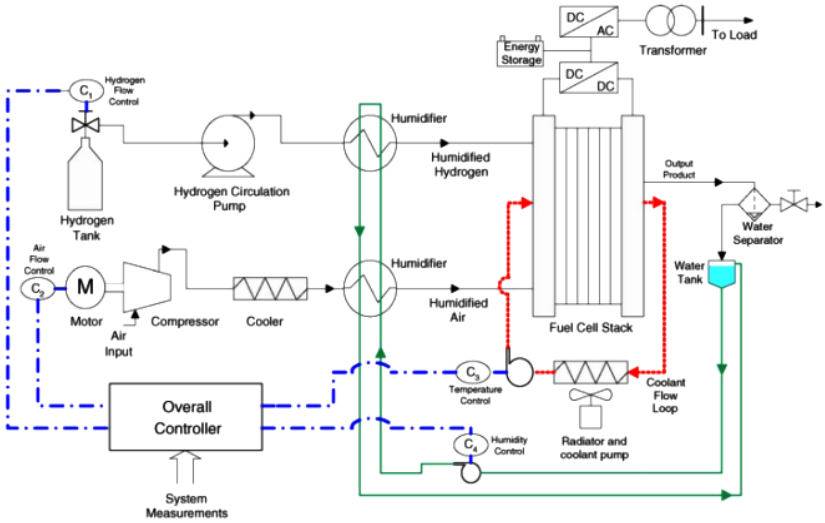
$$t_{discharge} = -\frac{f}{C}\ln\left(\frac{LEL \times k}{X_0}\right) \qquad (۹)$$

به‌طوری‌که در این رابطه X_0 غلظت اولیهٔ اندازه‌گیری شده مواد اشتعال‌پذیر با واحد برابر با LEL مانند $\%vol$ یا kg/m^3 می‌باشد. جایی‌که منطقهٔ گاز انفجارپذیر می‌باشد، ممکن است غلظت مواد اشتعال‌پذیر به ۱۰۰ درصد حجمی (در نزدیکی منبع نشتی) نیز برسد. با این‌وجود برای محاسبهٔ زمان $t_{discharge}$، میزان مورد قبول X_o را می‌توان وابسته به موارد خاصی دانست: از قبیل در نظر گرفتن دیگر جنبه‌های تأثیر حجم مانند زمان و تکرار نشتی. هدف از به‌کارگیری سیستم تهویه، قراردادن فضای آزمایشگاه در منطقهٔ ۲ است. بنابراین با توجه به جدول پیوست ۱ برگرفته از استاندارد IEC 60079-10-1 و با در نظر گرفتن درجهٔ نشتی ثانویه، می‌توان با یک تهویهٔ متوسط برای فضای آزمایشگاه به این هدف دست یافت. چنین تهویه‌ای قادر خواهد بود که پراکنده‌گی نشتی بخار یا گاز اشتعال‌پذیر را کنترل نماید. بنابراین کافی است که در محاسبات شرط $V_z \le V_0$ برقرار باشد. برای حصول اطمینان بیشتر قید $t_{discharge} \le 5min$ را نیز می‌توان در محاسبات اعمال نمود. الگوریتم بهینهٔ انجام محاسبات در شکل ۲ ارائه شده است.

٤. بحث و نتایج

با توجه به مدلسازی که در بخش قبل انجام شده است، یک سیستم تهویهٔ ایمن باید قادر باشد که به‌محض مشاهده نشتی در سیستم حجم منطقه خطر را در مدت زمان $t_{discharge}$ به کمتر از V_z کاهش دهد. لذا میزان قدرت هوادهی فن که با توجه به

قابلیت اشتعال‌پذیری بالای گاز هیدروژن باید از نوع ضد انفجار تهیه شود، چنین شرایط ایمنی را فراهم سازد. برای نمونه در ادامه برای دستگاه تست ۵ کیلووات سیستم پیل‌سوختی ساخت دانشگاه آلوبامای جنوبی که در شکل ۱ و جدول ۱ به‌ترتیب نحوهٔ عملکرد و مشخصات آن ارائه شده است، محاسبات تهویه ایمن انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است [۱۱].



شکل ۱. نمایی از سیستم تست ۵ کیلووات پیل‌سوختی دانشگاه آلوبامای جنوبی

جدول ۱. مشخصات سیستم تست ۵ کیلووات [۱۱]

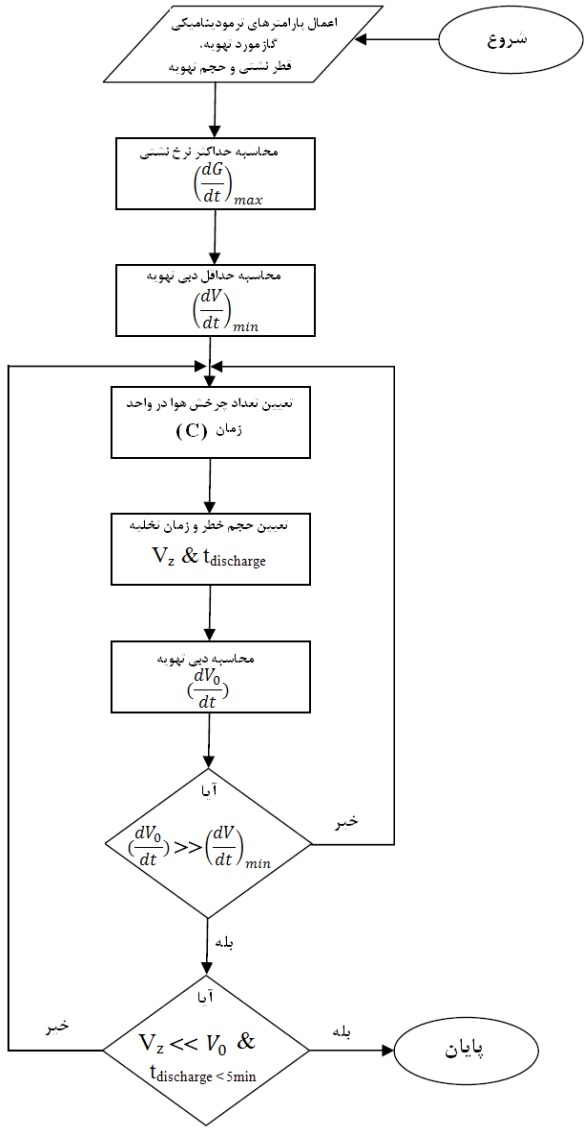
پارامتر	واحد	مقدار
دبی هیدروژن مصرفی	slpm	۵۴
دبی هوای ورودی	slpm	۱۳۵
دمای سری	K	۳۵۳
فشار گاز هیدروژن	atm	۱/۰۸۷
فشار گاز اکسیژن	atm	۲/۱۷
تعداد سل	-	۱۰۰

جدول ۲. مشخصات سیستم‌های تهویه مناسب جهت مواجه با نشتی گاز هیدروژن

تجهیزات	مشخصات	$t_{discharge}$ (دقیقه)	V_z (متر مکعب)	کمینه نرخ هوادهی (فوت مکعب بر دقیقه)
دستگاه تست ۵ کیلووات	مکندهٔ ضد انفجار	۳	۷/۲	۱۵۹۰

بر اساس مراجع [۴] و [۹] و معادلات فوق و در نظرگرفتن قطر نشتی ۲/۵ میلی‌متر مربع در خطوط انتقال هیدروژن، میزان نشت $۳/۳\times۱۰^{-۴}$ کیلوگر بر ثانیه به‌دست آمده است که برمبنای آن محاسبات مرتبط با سیستم‌های تهویه جهت مدیریت این مقدار نشتی در جدول ۲ آمده است. زمان ذکرشده در جدول ۲ بیانگر این است که در هنگام بروز نشتی، اگر کل فضای تحت پوشش تهویه، که در بالای سیستم تست نصب می‌شود، به‌طور کامل از گاز هیدروژن انباشته شود، به اندازهٔ $t_{discharge}$ زمان نیاز است تا کل هوای مجموعه تخلیه شود. در استانداردها توصیه می‌شود (نه الزام) که مدت زمان مذکور زیر ۵ دقیقه باشد. با توجه به الگوریتم محاسباتی ارائه‌شده، طراحی سیستم تست پیل سوختی ۵ کیلووات که دارای پارامترهای طراحی همانند نمونهٔ ارائه‌شده دانشگاه آلوبامای جنوبی می‌باشد، در پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال انجام گرفته است. براساس پارامترهای

جدول فوق طراحی سیستم تهویه انجام و در قسمت فوقانی سیستم نصب و مورد بهره‌برداری قرار گرفت (شکل ۳). در شکل ۴ تأثیر دمای عملکردی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه و افزایش حجم نمایش داده شده است.

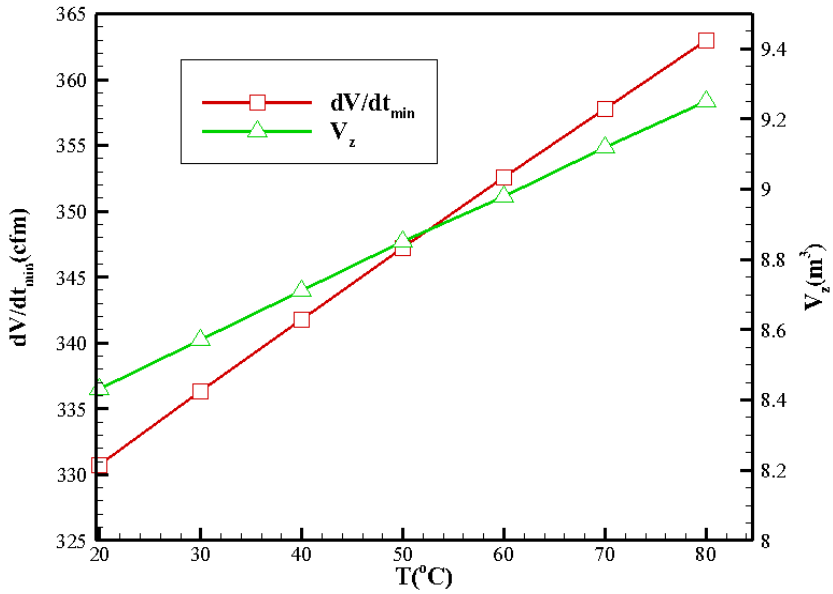


شکل ۲. الگوریتم بهینهٔ محاسبهٔ نرخ هوادی تهویهٔ ایمن و استاندارد برای محیط آزمایشگاه تحقیقات صنعتی هیدروژن و پیل‌سوختی

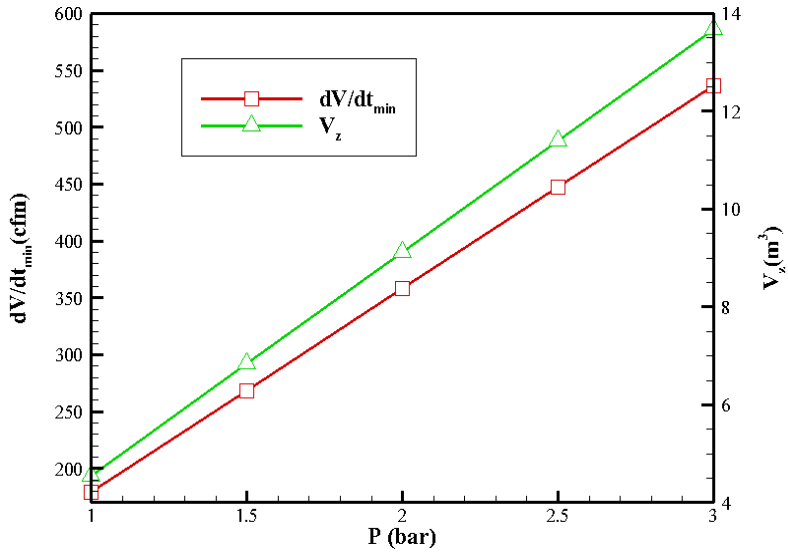
نتایج نشان می‌دهد با افزایش دما از ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد به ۸۰ درجه سانتی‌گراد مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه بیش از ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این امر در مورد افزایش حجم نیز صادق است. بنابراین دمای کاری را باید در انتخاب سیستم تهویه مدنظر قرار دارد. تأثیر فشار عملکردی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه و افزایش حجم در شکل ۵ نمایش داده شده است با افزایش فشار عملکردی از ۱ بار به ۳ بار مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه به ۳ برابر مقدار اولیه افزایش می‌یابد. این امر احتمال جدی به نرخ نشتی در فشارهای کاری بالا را نشان می‌دهد. این امر در مورد افزایش حجم به بیش از سه برابر مقدار اولیه می‌رسد. بنابراین فشار کاری را باید در انتخاب سیستم تهویه مد نظر قرار دارد.

یکی از متغیرهای نرخ نشتی که اطلاع دقیقی از آن در دست نیست، قطر نشتی است. با توجه به مطالعات انجام‌شده این عدد در محاسبات مهندسی نزدیک به ۲/۵ میلی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. لذا تأثیر مساحت نشتی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه و افزایش حجم را مورد بررسی قرار داده و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

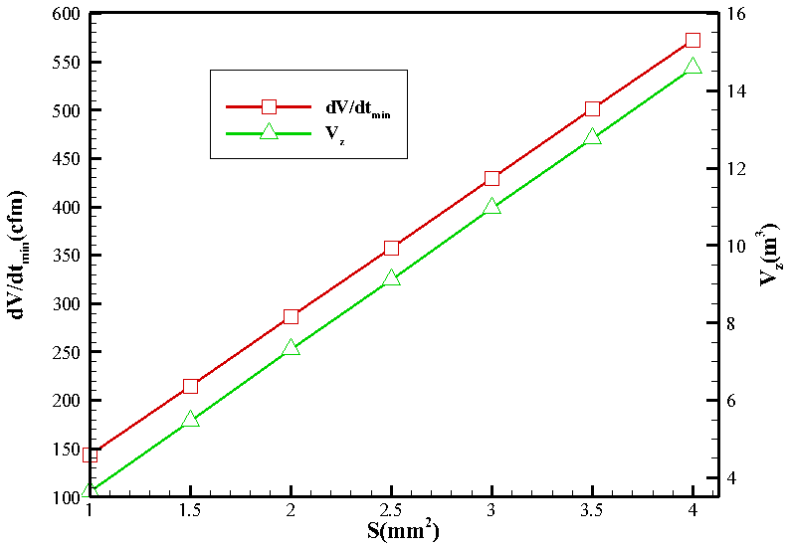
شکل ۳. نحوهٔ جانمایی سیستم هود سقفی و فن ضدانفجار روی دستگاه تست ۵کیلووات پیل‌سوختی هیدروژنی



شکل ٤. تأثیر دمای عملکردی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه



شکل۵. تأثیر فشار عملکردی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه



شکل ٦. تأثیر مساحت نشتی بر مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است مفاهیم و پارامترهای مهم و تأثیرگذار در طراحی یک سیستم تهویهٔ ایمن و استاندارد معرفی شود و نحوهٔ مدلسازی ریاضی ارتباط بین آنها تشریح گردد. در بخش دوم نتیجهٔ مدلسازی بخش اول برای یک دستگاه تست پیل سوختی ۵ کیلووات به اجرا درآمد و خروجی نهایی آن در قالب الگوریتم محاسبات و مشخصات فنی تهویهٔ مناسب ارائه شد. برآوردها حاکی است که برای سیستم تست مذکور به یک فن مکندهٔ ضد انفجار با قدرت هوادهی کمینه ۱۵۹۰ فوت مکعب بر دقیقه نیاز است که اگر کل فضای زیر هود سقفی نصب‌شده در بالای سیستم، از ۱۰۰درصد گاز هیدروژن اشباع شود، فن پیشنهادشده قادر خواهد بود که در مدت زمان کمتر از ۳ دقیقه حجم گاز هیدروژن را به‌طور کامل تخلیه نماید. در این صورت فضای آزمایشگاه سیستم تست در منطقهٔ ایمن ۲ قرار خواهد گرفت. گفتنی است تمامی روابط استفاده‌شده براساس استاندارد [۴] بوده و برای اطمینان بیشتر در برخی از موارد ضرایبی به‌عنوان فاکتور ایمنی مورد استفاده قرار گرفته که تضمین‌کنندهٔ در نظر گرفتن تمامی جوانب برای مقابله با حوادث پیش‌بینی‌نشده ناشی از نشتی گاز هیدروژن در محیطهای آزمایشگاهی پیل سوختی است. نتایج حاکی است با افزایش

فشار، دما و قطرنشتی میزان مینیمم نرخ دبی حجمی هوای تازه افزایش می‌یابد که باید در انتخاب سیستم تهویه لحاظ شود.

جدول پیوست ۱. راهنمای کاربردی جهت تعیین میزان تهویه محیط آزمایشگاه (برگرفته از استاندارد IEC60079-10-1)

درجهٔ نشتی	تهویه						
	درجه						
	بالا			متوسط		پایین	
	قابلیت دسترسی						
	خوب	متوسط	ضعیف	خوب	متوسط	ضعیف	خوب، متوسط و ضعیف
پیوسته	(منطقه NE 0) بدون- خطر[1]	(منطقه NE 0) منطقه 2[1]	(منطقه NE 0) منطقه 1	منطقه 0	منطقه 0 + منطقه 2	منطقه 0 + منطقه 1	منطقه 0
اولیه	(منطقه NE 1) بدون- خطر[1]	(منطقه NE 1) منطقه 2[1]	(منطقه NE 1) منطقه 2[1]	منطقه 1	منطقه 1 + منطقه 2	منطقه 1 + منطقه 2	منطقه 1 یا منطقه 0[3]
ثانویه[2]	(منطقه NE 2) بدون- خطر[1]	(منطقه NE 2) بدون- خطر[1]	منطقه 2	منطقه 2	منطقه 2	منطقه 2	منطقه 1 یا حتی منطقه 0[2]

۱. منطقه NE 0، NE 1، و NE 2 نشان‌دهندهٔ یک منطقهٔ فرضی است که فضای ناچیزی تحت شرایط نرمال را نشان می‌دهد.

۲. منطقه 2 بموجود آمده بوسیله نشتی درجه ثانویه ممکن است به درجه اولیه پیوسته تجاوز کند که دراین مورد فاصله بیشتری باید در نظر گرفته شود.

۳. منطقه 0 خواهد بود اگر تهویه خیلی ضعیف باشد و در عمل نشتی محیط گاز انفجار بطور بالقوه و پیوسته وجود داشته باشد.

۷. مآخذ

[1] Chilton, D., Confirmation of Zoning-Gas Panel Enclosure MCE Hydrogen System, REPORT No. 09, 2009.

[2] Ivings, M. J., S. Clarke, S. E. Gant, B. Fletcher, A. Heather, D. J. Pocock, D. K. Pritchard, R. Santon, C. J. Saunders, Area classification for secondary releases from low pressure natural gas systems, Health and Safety Laboratory, 2008.

[3] Cerchiara, Gennaro M., Nicola Mattei, Martino Schiavetti, and Marco N. Carcassi. "Natural and forced ventilation study in an enclosure hosting a fuel cell." *International Journal of Hydrogen Energy* 36, no. 3 (2011): 2478-2488.

[4] Electrical apparatus for explosive atmospheres-Classification of hazardous areas, 2002.

[5] Hajji, Yassine, Mourad Bouteraa, Afif ELCafsi, Ali Belghith, Philippe Bournot, and Ftouh Kallel. "Natural ventilation of hydrogen during a leak in a residential garage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50 (2015): 810-818.

[6] Liu, Wei, and David M. Christopher. "Dispersion of hydrogen leaking from a hydrogen fuel cell vehicle." *International Journal of Hydrogen Energy* 40, no. 46 (2015): 16673-16682.

[7] Dixit, Marm, Yogesh Fulpagare, Jalay Shukla, Pratik Basarkar, Dhrupad Parikh, Rajat Jain, and Atul Bhargav. "Design of fuel cell systems laboratory for hydrogen, carbon monoxide and hydrocarbon safety." *International Journal of Hydrogen Energy* 39, no. 31 (2014): 17929-17940.

[8] NFPA 853, Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Plants, 2000 Edition.

[9] NASA NSS 1740.16, Safety standard for hydrogen and hydrogen systems, 1997.

[10] HSE RR630, Area classification for secondary releases from low pressure natural gas system, 2008.

[11] Tanrioven, M., and M. S. Alam. "Impact of load management on reliability assessment of grid independent PEM fuel cell power plants." *Journal of power sources* 157, no. 1 (2006): 401-410.